

ЭОХ

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ДЕНИКИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ЦЫГАНКОВ
Владимир Александрович

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ
(на карьерах)

Специальность 05.13.14 -
"Автоматическое управление и регулирование"

Автореферат диссертации на
исследование ученой степени
доктора технических наук

ЧЕЛЯБИНСК-1973

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления" и в научно-исследовательской лаборатории НИЛ САУ Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола в содружестве с Научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом по добыче полезных ископаемых открытым способом (НИИОГР, г.Челябинск).

Научный консультант - доктор технических наук профессор ЧЕРНОРУЦКИЙ Г.С.

Официальные оппоненты:

- лауреат Государственной премии доктор технических наук профессор В.В. КАЗАКЕВИЧ;
- доктор технических наук профессор Н.И. АНДРЕЕВ;
- доктор технических наук профессор П.И. ЧИНАЕВ.

Ведущее предприятие - горнometаллургический комбинат "Печнеганикель".

Автореферат разослан "___" апреля 1973 г.

Задача состоится 30 мая 1973 г. в 15 часов в аудитории 244 на заседании Совета по присуждению ученых степеней Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола (454044, Челябинск, 44, проспект им. В.И.Ленина, 76, главный корпус).

Прошу Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв (в двух экземплярах, заверенных печатью).

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук доцент

(Г.С. ЛЕОНТЬЕВА)

Перспективный план развития народного хозяйства предусматривает существенное увеличение добычи полезных ископаемых, значительная часть которых добывается открытым способом.

Открытый способ разработки месторождений обеспечивает возможности резкого увеличения производительности и снижения затрат общественного труда в горной промышленности. К 1980 году на его долю будет приходиться 75% всего объема горного производства. Значительное место в технологии открытой разработки ископаемых занимают буровые работы. Из применяемых в СССР на открытых горных работах различных способов бурения наибольшее распространение получил шарошечный способ, который на мощных карьерах страны достигает 75-80% всего объема буровых работ.

Одним из важных резервов улучшения технико-экономических показателей бурения на каждом этапе его технического развития является разработка методов и средств оптимизации процесса. С развитием техники и технологий бурения указанному вопросу уделяется все большее внимание, как одному из важнейших факторов повышения технико-экономических показателей.

Основным направлением исследований в области оптимизации процесса бурения на карьерах было изучение механизма разрушения пород при бурении, сбор и обработка обширного экспериментального материала с целью получения и уточнения математических моделей процесса, позволяющих определить рациональные режимы бурения в различных условиях. Все эти работы неопровержимо доказывают, что технико-экономические показатели вращательного (в частности, шарошечного) бурения на карьерах существенным образом зависят от выбора режимных параметров процесса. Ручное регулирование режимных параметров машинистом бурового станка, до сих пор без исключения применяемое на практике, весьма затруднительно, вследствие непрерывной случайной вариации свойств буриемых пород.

Указанные обстоятельства выдвигают в число важных и актуальных научно-технических проблем задачу автоматического управления процессом бурения, позволяющего, как показали исследования, повысить стойкость долот на 35-40%, снизить расход электроэнергии на 15-20%, повысить среднюю скорость бурения на 10-20% и т.д.

В отличие от известных работ по проблеме автоматического управления процессом бурения взрывных скважин в данной диссертационной работе задача оптимального и адаптивного управления бурением впервые сформулирована и решена как задача управления объектом с неполной информацией. Исследование базируется на современных общих методах теории стохастических и адаптивных систем с неполной априорной информацией об объекте. Указанный подход позволил получить обоснованные рекомендации по построению различного вида систем автоматического управления процессом бурения и достаточно полно исследовать их свойства.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ.

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Краткий критический обзор работ по автоматическому управлению процессом бурения на карьерах. Проблема автоматического управления процессом бурения. Задачи, методы и цель исследования.

ГЛАВА II. ПРОЦЕСС БУРЕНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ. О некоторых закономерностях разрушения пород при вращательном бурении. О критериях эффективности управления процессом бурения. Зависимость производительности процесса бурения от режимных параметров. Зависимость себестоимости процесса бурения от режимных параметров.

ГЛАВА III. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. О математических моделях процесса бурения. Математические модели процесса для некоторых частных случаев. Ограничения на пространство управлений.

ГЛАВА IV. СИНТЕЗ СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ. Система управления процессом бурения по возмущению. Вывод основных уравнений для определений статистически оптимальных управлений по возмущению. Синтез оптимальных управлений процессом бурения для случая, когда вариации физико-механических свойств пород рассматриваются как случайные константы. Оптимальный риск в системе с компенсацией случайной константы. Синтез оптимальных управлений процессом бурения для случая, когда изменение физико-механических свойств пород интерпретируется как марковский процесс. Исследование оптимального риска в системе с компенсацией марковского возмущения.

ГЛАВА V. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОПТИМАЛЬНЫХ САУ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ. Реализация алгоритма оценки возмущения. Об оценке физико-механических свойств пород в процессе бурения. Возможные функциональные схемы оптимальных САУ процессом бурения.

ГЛАВА VI. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИМАЛЬНЫХ САУ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ. Вводные замечания. Буровой станок как объект автоматического управления. Статические и динамические свойства САУ бурением.

ГЛАВА УП. СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ САУ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ. Задача адаптивного управления процессом бурения и возможные пути ее решения. Математическая формулировка задачи. Рассмотрение одного частного случая. Синтез адаптивной САУ процессом бурения, оптимальной по критерию минимума удельного риска. Синтез адаптивной САУ процессом бурения, субоптимальной по критерию минимума полного риска. Обобщение на случай неизвестного математического ожидания априорной плотности вероятности неизвестных параметров модели процесса. Учет ограничений на управление. Исследование сходимости алгоритмов адаптивного управления. Цифровое моделирование алгоритмов функционирования адаптивных САУ процессом бурения.

ВЫВОДЫ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

ЛИТЕРАТУРА.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Описание патентов и изобретений. Результаты опытно-промышленного внедрения статистически оптимальных САУ процессом бурения. Таблицы. Программы цифрового моделирования адаптивных САУ процессом бурения. Метод решения системы линейных уравнений.

Г л а в а I. Задача оптимального управления процессом бурения представляет собой достаточно сложную научно-техническую проблему, требующую для своего разрешения проработки обширного круга взаимосвязанных вопросов, к которым, в частности, следует отнести:

- 1) формирование структуры математической модели процесса и обоснование критерия эффективности управления процессом;
- 2) идентификация модели на объекте и исследование принципиальных свойств процесса как объекта управления;
- 3) синтез оптимальных алгоритмов управления процессом;
- 4) исследование свойств (сходимости, эффективности) алгоритмов оптимального управления;
- 5) разработка принципов построения САУ, реализующих алгоритмы оптимального управления;
- 6) разработка конкретных САУ на основе предложенных принципов и их промышленное внедрение.

Решением указанных вопросов занимаются многие исследователи. Основное внимание при этомделено фундаментальным технологическим исследованиям и меньшее – проблемам собственно управления процессом бурения. Много работ последних лет посвящено вопросам изучения технологических аспектов управления процессом бурения. Предложены разнообразные модели процесса, базирующиеся как на основе представлений о механизме разрушения пород при бурении, так и на основе различных экспериментально-статистических мето-

дов. Полученные модели используются, как правило, для определения оптимальных технологических режимов.

Результаты, достигнутые в области автоматического управления режимами вращательного бурения на открытых горных разработках (ОГР), пока скромны. Как показал обзор имеющегося незначительного числа работ по автоматическому управлению процессом бурения на ОГР, все предложенные САУ можно разделить на две группы:

1) реализующие критерий минимума себестоимости бурения на основе принципа компенсации и, таким образом, разомкнутые по функции цели управления;

2) реализующие критерий максимума механической скорости бурения с использованием экстремальных регуляторов, то есть работающие по замкнутому циклу.

Не разрабатывались и не исследовались САУ бурением, замкнутые по целевой функции, имеющей технико-экономический характер. Предложенные САУ не вышли из стадии экспериментальных работ или опытных партий либо не получили распространения вследствие ошибочных принципов построения. Такое положение объясняется прежде всего отсутствием научно-обоснованных и разработанных принципов построения и теории указанных САУ, сложностью проблемы, трудностями технической реализации и внедрения. Общим недостатком предложенных САУ является в значительной степени эвристический подход к их построению, не использующий современные идеи и методы оптимального и адаптивного управления в условиях неопределенности. Современный уровень развития технологических основ управления процессом бурения, с одной стороны, и общетеоретические результаты технической кибернетики, с другой, создали к настоящему времени реальные предпосылки решения на научной основе проблемы автоматического управления процессом вращательного бурения.

В связи с изложенным, в работе поставлены задачи:

1) сформировать математическую модель процесса бурения, пригодную для синтеза алгоритмов управления процессом;

2) осуществить синтез оптимальных и адаптивных алгоритмов управления процессом бурения и исследовать их свойства;

3) разработать принципы построения оптимальных и адаптивных САУ, пригодных в своей основе для управления процессами бурения в различных условиях;

4) провести исследование свойств САУ и показать эффективность автоматического управления процессом бурения.

Основное внимание при этом уделено синтезу и исследованию свойств оптимальных и адаптивных САУ, то есть теоретическим аспектам проблемы оптимального управления процессом вращательного бурения. Исследование базируется на современных общих методах теории стохастических и адаптивных систем с неполной информацией об объекте и с пассивным или активным (в случае дуэльного управления) ее накоплением [1, 2, 3 и др.]. Такой подход, обладая общностью, позволяет получить оптимальные алгоритмы и структуры САУ бурением, инвариантные к особенностям конкретных процессов.

Таким образом, основной целью диссертационной работы является построение и теоретическое исследование оптимальных и адаптивных систем управления процессом вращательного бурения на открытых горных разработках.

Гла́ва II. Оптимальное управление процессом бурения есть, очевидно, частный случай проблемы оптимизации вообще или, с более общих позиций, частный случай операции. В настоящее время не имеется формальных методов определения целей операций. Как правило, оперирующая сторона (то есть совокупность лиц и автоматов, осуществляющих операцию), полагаясь на опыт и интуицию, по своему произволу формирует цель операции [4].

Общей целью управления процессом бурения в конечном итоге является проходка некоторого числа скважин при наименьших затратах общественного труда. Какие-либо формальные доводы в пользу названной цели привести затруднительно. Однако, интуитивно цель управления представляется очевидной.

Критерий эффективности – математический эквивалент цели управления Q является функционалом, зависящим от какой-либо одной, нескольких или, в общем случае, всех фазовых координат процесса (механической $v_m(t)$ или технической $v_t(t)$ скорости бурения, стойкости $I_g(t)$ инструмента, энергоемкости $n(t)$, производительности $P(t)$, себестоимости $c(t)$ процесса и др.)

$$Q = Q[v_m(t), I_g(t), n(t), P(t), c(t) \dots]. \quad (I)$$

Основная трудность практического использования критерия (I) заключается в том, что остается неясным, какие комбинации конкретных значений фазовых координат следует предпочесть другим,

так как обычно нет возможности увеличивать или уменьшать их одновременно. Поэтому на практике различные авторы в качестве критерия оптимальности используют, как правило, какой-либо один технико-экономический показатель, по их мнению наиболее соответствующий поставленной цели управления.

Достаточно адекватно поставленную цель управления отражает критерий, учитывающий лишь основные технико-экономические показатели – производительность и себестоимость бурения. Этот критерий, являющийся частным случаем (1), может быть представлен как:

1) функция производительности

$$Q(t) = P(t) \quad (2a)$$

при ограничениях на себестоимость $C \leq C_{pl}$, где C_{pl} – плановая (заданная) себестоимость;

2) функция себестоимости

$$Q(t) = C(t) \quad (2b)$$

при ограничениях на производительность $P \geq P_{pl}$, где P_{pl} – плановая (заданная) производительность;

3) функционал, зависящий от производительности и себестоимости процесса

$$Q(t) = Q[P(t), C(t)], \quad (2c)$$

например, в виде линейной суперпозиции

$$Q(t) = \varphi_1[C(t)] + \alpha \varphi_2[P(t)], \quad (2d)$$

где α – весовой коэффициент, устанавливающий компромисс между стремлением получить максимальную производительность и минимальную себестоимость процесса.

Задача объединения критериев (2a) и (2b) в единый критерий, например, (2d) является типичной проблемой векторной (многокритериальной) оптимизации. Возникающие при этом трудности, связанные с выбором схемы компромисса, приведением критериев к единому масштабу измерения, учетом степени их важности, носят концептуальный, а не вычислительный характер [7]. Здесь уместно подчеркнуть необходимость использования принципа свободы выбора критериев оперирующей стороной [4]. Достаточно обоснованным, в указанном смысле, является критерий оптимальности, построенный только на основе себестоимости процесса, комплексно учитывающий как техническую, так и экономическую стороны процесса.

Задача минимизации критерия в любой момент времени $t \in [0, T]$ не корректна, поэтому критерий эффективности функционирования САУ правильное задавать в виде некоторого функционала от $Q(t)$

$$\Phi = \Phi [Q(t)]. \quad (3a)$$

Принимая во внимание технико-экономический характер критерия, оператор Φ можно представить как усреднение во времени

$$\Phi = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt, \quad (3b)$$

или по множеству

$$\Phi = \int_{\Omega} Q(\lambda) P(\lambda) d\Omega(\lambda), \quad (3v)$$

где $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ - вектор случайного стационарного процесса с компонентами $\lambda_i = \lambda_i(t)$ и плотностью распределения $P(\lambda)$; $\Omega(\lambda)$ - область вариаций вектора λ .

Для эргодических стационарных процессов критерии (3б) и (3в), отличающиеся способом усреднения, эквивалентны [8]. Выражения (3б) и (3в) вводят новый критерий эффективности, получающийся при свертывании критериев (2), зависящих в общем случае от каких-либо неконтролируемых параметров. Практически использование критериев вида (3) означает, что гарантированный результат управления процессом представляет собой достижение экстремально-го значения критерия эффективности в среднем. Тем самым какая-либо гарантия для отдельного t ликвидируется.

Г л а в а Ш. Реализация целевого функционала, например, вида (2) предполагает предварительное формальное математическое описание процесса бурения как объекта автоматического управления.

В общем виде математическая модель процесса бурения может быть записана как

$$Q(t) = Q(t, \vartheta, f, J, k); \quad \vartheta \in V, \quad (4)$$

где $\vartheta = \{\vartheta_i\}$, $i = \overline{1, g}$ - управления (режимные параметры: скорость вращения инструмента, осевое усилие на забое, количество промывочного агента); V - пространство допустимых управлений; $f = \{f_j\}$, $j = \overline{1, k}$ - компоненты вектора физико-механических свойств породы (контактная прочность, абразивность, хрупко-пластические свойства); $J = \{J_p\}$, $p = \overline{1, P}$ - неконтролируемые возмущения; $k = \{k_s\}$, $s = \overline{1, W}$ - постоянные (тип долота, диаметр и глубина скважины и др.)

Так как технико-экономические показатели процесса бурения имеют интегральный характер и могут быть определены лишь по результатам законченного бурения, время их существенного изменения значительно превосходит время переходных процессов по каналам управления. Кроме того, как отмечалось, для синтеза САУ целесообразно использовать уордненный критерий вида (3). Следовательно, динамикой процессов по каналам управления при построении модели возможно и целесообразно пренебречь и, таким образом, осуществить синтез САУ на основе статической модели процесса.

В качестве такой модели целесообразно использовать полиномиальное соотношение не ниже второго порядка, включающее основные управление θ и основное возмущение, приводящее к дрейфу экстремума целевого функционала – изменение физико-механических свойств бурильных пород, интегрально оцениваемых одним обобщенным показателем f (контактной прочностью, крепостью, бурильностью). При указанном подходе статическая модель процесса бурения имеет следующий общий вид:

$$Q = \Phi'(\theta, f) \bar{a}, \quad (5)$$

где $\Psi(\theta, f) = \{\psi_i(\theta_i, \dots, \theta_n; f)\}$, $i = 1, m$ – известные функции управления θ_i и возмущения f ; $\bar{a} = \{a_i\}$, $i = 1, m$ – коэффициенты.

Вектор-функция $\Phi(\theta, f)$ определяет полноту и порядок уравнения модели. Выбор функций $\Phi(\theta, f)$, как обычно, требует некоторого компромисса между наиболее точным описанием процесса и формулировкой, наиболее удобной для решения математической задачи [9].

Аппроксимирующий полином, являющийся частным случаем (5), при условии, что в качестве критерия оптимальности принята себестоимость C бурения единицы длины скважины, может быть представлен как

$$\begin{aligned} C = & a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + \sum_{i=1}^m a_{2+i} \theta_i + \sum_{i=1}^m a_{2+2i} \theta_i^2 + \\ & + \sum_{i=1}^m a_{2(2+i)+i} \theta_i \psi_{\theta i}(f) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m a_{3i+j} \theta_i \theta_j. \end{aligned} \quad (6)$$

Два последних слагаемых в (6) учитывают взаимодействие управлений и интегрального показателя физико-механических свойств пород. На основании экспериментальных данных, имеющихся в литературе, в работе установлен конкретный вид (6) для наиболее распространенного ядроочечного способа бурения.

Показано, что для буровых стакнов типа 2СБШ-200, БАШ-250 полином (6) приобретает вид

$$C = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 \omega + a_4 F + a_5 \omega^2 + a_6 f^3 + a_7 \omega^3 + a_8 Ff, \quad (7)$$

где $\{\omega, F\} = \vartheta$; ω — скорость вращения бурового инструмента; f — осевое усилие на забое; показатель $a = -1$ для стакнов типа 2СБШ-200 и $a = 1,2$ для стакнов типа БАШ-250.

Ограничения на пространство управлений определяются конструктивными ограничениями, накладываемыми буровыми стакнами и инструментом, а также ограничениями по вибрациям, и имеют вид неравенств

$$\sigma_{min} < \sigma_i < \sigma_{max}. \quad (8)$$

Вибрации могут существенно ограничить область допустимых управлений. В принципе возможна ситуация, когда строго оптимальное (в смысле, например, минимума себестоимости) управление процессом из-за вибраций не может быть реализовано. Практически в этом случае должно быть обеспечено управление, осуществляющее ведение процесса на границе области допустимых вибраций. При наличии датчика вибраций техническая реализация подобного управления не представляет затруднений.

Г л а в а IV. Существенным при построении систем управления процессом бурения является то, что практически невозможно получать текущие (непрерывно или с приемлемыми интервалами дискретности) значения целевого функционала. Цель управления в этом случае технически наиболее просто достигнуть, используя систему управления с инвариантными связями по возмущениям, приводящим к дрейфу экстремума целевого функционала. При синтезе САУ необходимо учитывать статистическую природу шумов и возмущений, характерных для ее функционирования в реальных условиях.

Расчетная структурная схема системы представлена на рис. 1, где A — управляющее устройство; c — автономные САР режимных координат; O — объект управления; I — канал наблюдения возмущения; U — управляющие воздействия; ϑ — режимные координаты объекта; f — контролируемое возмущение; ϵ , \tilde{f} — соответственно шумы в каналах наблюдения возмущения и передачи управляющих воздействий; Q — целевой функционал.

Процессы в системе рассматриваются в дискретно-непрерывном времени $t = 0,1,2,\dots,l,\dots,s,\dots,n$. Сигналы представлены в виде про-

странных и (или) временных векторов (матриц). Использован байесовский подход, плотности вероятности шумов и возмущений полагаются известными. Шумы в каналах I и C , отражающие реальную погрешность наблюдения свойств бурильных пород и ошибки САР режимных координат, интерпретированы как нормальные случайные последовательности с нулевыми средними. Основное возмущение (случайное изменение контактной прочности породы) интерпретировано как стационарный нормальный марковский процесс

$$P(\vec{f}_s) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} \sigma^d} \exp \left\{ -\frac{(f_s - m)^2}{2\sigma^2} \right\} \prod_{i=0}^{d-1} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} \sigma^d} \exp \left\{ -\frac{(f_{s-i} - \varphi f_i - (1-\varphi)m)^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (9)$$

где $\varphi, m, \sigma^2, \sigma_f^2$ – соответственно коэффициент корреляции, математическое ожидание, дисперсия начальной плотности и дисперсия плотности перехода. Использование в качестве модели реального возмущения марковского процесса позволило получить общие результаты. Принято, что каналы I и C не имеют памяти и содержит аддитивную смесь сигналов с шумами. Уравнение объекта полагается известным, в общем случае имеющим вид (5) и в частных – вид (7).

Функция потерь принята в виде

$$L_s(\vec{y}_s, f_s) = \vec{y}_s^T (\vec{y}_s, f_s) \vec{y}_s - \vec{y}_s^T (\vec{y}_s^*, f_s) \vec{y}_s, \quad (10)$$

где $\vec{y}_s^*(\vec{y}_s^*, f)$ представляет собой уравнение кривой, являющейся геометрическим местом минимальных значений целевого функционала в породах с различными физико-механическими свойствами. Функция потерь в виде (10) является мерой инвариантности экстремума целевого функционала Q_s относительно возмущения f_s , действующего на объект в момент $t=s$.

Оптимальной стратегией управляющего устройства является стратегия, при которой достигается минимум среднего риска

$$R = M \left\{ \sum_{s=0}^n L_s \right\} = \sum_{s=0}^n M \{ L_s \} = \sum_{s=0}^n R_s, \quad (II)$$

где R_s – удельный риск.

Для нейтральных систем, к числу которых относится рассматриваемая система, минимизация среднего риска достигается минимизацией удельного риска на каждом такте $t=0, 1, 2, \dots, n$ [1].

Выражение для удельного риска R_s имеет вид

$$R_s = \int_{\Omega(\vec{x}_{s-1}, \vec{y}_{s-1}, \vec{f}_{s-1})} P(\vec{y}_s / \vec{x}_{s-1}) P(\vec{f}_s) h_s(\vec{x}_{s-1}, \vec{y}_s, \vec{f}_s) d\Omega, \quad (12)$$

$$\text{где } h_s(\bar{x}_{s+1}, \bar{u}_s, \bar{f}_s) = \int_{\Omega(\bar{\theta}_s)} L_s(\bar{\theta}_s, f_s) \rho(\bar{\theta}_s / \bar{u}_s) \rho(\bar{x}_{s+1} / \bar{f}_s) d\Omega. \quad (13)$$

Здесь $\rho(a/b)$ – условные плотности соответствующих случайных величин; Ω – область их изменения.

Синтез статистически оптимальных управлений режимными координатами процесса бурения из условия минимума риска (II), что, в свою очередь, гарантирует достижение в среднем цели управления вида

$$Q_s^* = \min_{\bar{\theta}_s} Q_s(\bar{\theta}_s, f_s)$$

осуществлен в два этапа [10]. На первом этапе из условия

$$h_s(\bar{u}_s, \bar{x}_{s+1}, \bar{f}_s) = \min_{\bar{\theta}_s} \quad (14)$$

определен оптимальные управление, параметрически зависящие от предположительно известного возмущения $f_s - \bar{u}_s^*(\bar{x}_{s+1} / \bar{f}_s)$. На втором этапе из условия

$$\int_{\Omega(\bar{f}_s)} \rho(\bar{f}_s) h_s \left\{ \bar{u}_s^* [\bar{\lambda}_s(\bar{x}_{s+1})], \bar{x}_{s+1}, \bar{f}_s \right\} d\Omega = \min_{\bar{\lambda}_s} \quad (15)$$

определен оптимальные оценки $\bar{\lambda}_s^*$ контролируемого возмущения f_s . В результате найдены оптимальные управление в виде:

для станков типа БСШ-2М, 2СБШ-200 ($d = -1$ в модели (7))

$$u_{1s}^{**} = \frac{1}{2a_s} (a_3 + a_7 \lambda_{1s}^*), \quad (16)$$

$$u_{2s}^{**} = \frac{1}{2a_s} (a_7 + a_8 \lambda_{2s}^*); \quad (17)$$

для станков типа БАШ-250 ($d = 1$)

$$u_{1s}^{**} = -\frac{1}{2a_s} (a_3 - a_7 \lambda_{1s}^*). \quad (18)$$

Соотношение для u_{2s}^{**} совпадает с выражением (17).

Оценки $\bar{\lambda}_s$ определены как

$$\lambda_{1s}^* = \frac{\sum_{i=0}^{s-1} \rho^{s-i-1} \bar{x}_i}{\sum_{i=0}^{s-1} \rho^{s-i-1}}, \quad \text{где } 0 < \rho < 1. \quad (19)$$

$$\lambda_{1s}^* = \lambda_{2s}^* = \frac{q}{\xi_s} \left[\sum_{i=0}^{s-1} \frac{\bar{x}^{s-i} \bar{x}_i}{\sum_{j=i}^{s-1} k_j} + m(t-z) \left(1 + \frac{\bar{x}^s}{\prod_{i=0}^{s-1} k_i} + (t-z) \sum_{i=0}^{s-1} \frac{\bar{x}^{s-i}}{\prod_{j=i}^{s-1} k_j} \right) \right], \quad (20)$$

где $q = \frac{\sigma_e^2}{\bar{\sigma}_e^2}$; $k_i = 1 + q + z^2 (1 - \frac{1}{k_{i-1}})$; $\xi_s = 1 - \bar{\sigma}_e^2 / k_s$;

$\bar{\sigma}_e^2$ – дисперсия погрешностей наблюдения f .

Как видно, скорость вращения инструмента — U_{13} должна изменяться обратно пропорционально асимптотически-оптимальной оценке возмущения (соотношение (16)) или уменьшаться с ростом f по линейному закону (соотношение (18)). Осевое усилие — U_{43} на забое должно увеличиваться прямо пропорционально оптимальной оценке свойств породы. Управление режимными параметрами процесса для модели (7) при $\alpha = 1$ оказывается строго оптимальным в смысле критерия (II), а при $\alpha = -1$ управление осевым усилием является оптимальным, а скоростью вращения инструмента — асимптотически оптимальным. Эти особенности объясняются различными способами комбинации возмущения f с режимными координатами объекта, как это видно из уравнения (7).

После решения задачи синтеза оптимальных управлений $\bar{U}_3(\bar{x}_s)$ в работе найден соответствующий этим управлениям оптимальный удельный риск R_s^* (при $\alpha = 1$).

$$\begin{aligned}
 R_s^* = & a_5 \sigma_g^2 q_1 + a_6 \sigma_g^2 q_2 + \sigma_e^2 A \left(\frac{q^2}{\xi_s^2} \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=i}^{s-1} \frac{e^{2(s-i)}}{\prod_{l=j}^{s-1} k_l^2} + \right. \\
 & + \sigma_e^2 A \left(\frac{q^2}{\xi_s^2} \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{k=0}^i \sum_{l=0}^{s-i} \frac{e^{-l-k}}{\prod_{m=k}^{s-i} k_m^2} e^{2j+l} \frac{e^{2s-l}}{\prod_{n=l}^{s-1} k_n^2} + \right. \\
 & \left. \left. + \sigma_e^2 A \left(1 - \frac{q}{\xi_s} \sum_{i=0}^{s-1} \frac{e^{2(s-i)}}{\prod_{j=i}^{s-1} k_j^2} \right)^2 \right) \right), \quad \text{где } A = \frac{a_7^2}{4a_5} + \frac{a_8^2}{4a_6}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Оптимальный риск (21) представляет собой погрешности компенсации возмущения в системе управления бурением. Потери из-за наличия ошибок автономных САР режимными параметрами определяются среднеквадратическими значениями этих ошибок σ_g^2 , σ_e^2 и не зависят от времени. Другие составляющие представляют собой потери из-за неточного измерения контролируемого компонента физико-механических свойств пород, а также стохастической природы этих свойств. Величина указанных потерь определяется уровнем шума в канале наблюдения возмущения (погрешностями его измерения) дисперсией начальной плотности σ^2 и плотности перехода σ^2 , характеризующих возмущение, а также коэффициентами уравнения модели и временем наблюдения.

Асимптотический оптимальный риск определяется выражением

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} R_s^* = \sigma_g^2 a_g + \sigma_{g_2}^2 a_{g_2} + \sigma_e^2 A \frac{f^2 \delta^2}{(1-\varepsilon \delta)^2 (1-\delta^2)} + \sigma^2 A \left[1 - \frac{q_2 \delta}{(1-\varepsilon \delta)^2} \right]^2 + \sigma_e^2 A \frac{f^2 \delta^2}{1+\varepsilon \delta}, \quad \text{где } \delta = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon K_3}. \quad (22)$$

Точная компенсация невозможна даже при неограниченном времени наблюдения, что обусловлено марковским характером возмущения.

Наиболее благоприятные условия наблюдения возмущения f создаются при бурении в однородной породе. При этом $\varepsilon \rightarrow 1$, а риск будет минимальным

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 1} R_s^* = \sigma_g^2 a_g + \sigma_{g_2}^2 a_{g_2} + \sigma_e^2 A \frac{f^2 s}{(1-f^2 s)^2} + \sigma^2 A \left(1 - \frac{f^2 s}{1+f^2 s} \right)^2, \quad (23)$$

где $s = \frac{\sigma}{\sigma_e}$.

В асимптотике при $\varepsilon \rightarrow \infty$ риск определяется как

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty, s \rightarrow \infty} R_s^* = \sigma_g^2 a_g + \sigma_{g_2}^2 a_{g_2}, \quad (24)$$

то есть зависит лишь от погрешностей автономных САР. Абсолютная инвариантность целевой величины Q относительно возмущения f может быть достигнута только в установившемся режиме и при условиях, что компенсируемое возмущение является неизвестной константой (бурение в однородной породе с неизвестной, но неизменной контактной прочностью), а среднеквадратические погрешности САР режимных координат отсутствуют.

При бурении пород с весьма случайными свойствами и (или) значительными интервалами времени (превышающими время корреляции) между соседними моментами их наблюдения имеет место условие $\varepsilon \rightarrow 0$. В этом случае наблюдение возмущения f , являющегося последовательностью независимых случайных величин, никакой дополнительной информации к имеющейся априорной не дает. В указанных условиях нет смысла контролировать в процессе бурения физико-механические свойства пород, а целесообразно заранее установить режимные параметры, соответствующие априорному среднему значению компонента физико-механических свойств пород, входящего в модель процесса. Оптимальный риск, соответствующий такому подходу, определяется соотношением

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} R_s^* = \sigma_g^2 a_g + \sigma_{g_2}^2 a_{g_2} + \sigma^2 A. \quad (25)$$

Сравнение (24) и (25) дает максимальный выигрыш, который достигается в системе управления процессом бурения, работающей по разомкнутому циклу за счет введения инвариантных связей по основному возмущению — случайному изменению физико-механических свойств бурильных пород

$$\Delta R_{s_{max}}^* = \sigma^2 \left(\frac{a_7^2}{4a_5} + \frac{a_4^2}{4a_6} \right). \quad (26)$$

Реальный выигрыш с учетом марковского характера возмущения меньше максимального и определяется соотношением

$$\Delta R_s^* = \sigma^2 \left(\frac{a_7^2}{4a_5} + \frac{a_4^2}{4a_6} \right) \left[\frac{q\delta^2(1-e^{-2})}{(1-q\delta)^2(1-\delta^2)} + \frac{q^2\delta^2(1-e^{-2})}{1+2\delta} + \left(1 - \frac{q^2\delta}{(1-q\delta)^2} \right)^2 \right]. \quad (27)$$

Г л а в а У. Реализация алгоритмов (19,20), определяющих оценки контролируемого возмущения в системе в принципе может быть осуществлена с помощью специализированного вычислительного устройства, выполняющего и другие, необходимые для организации управления алгоритмы. Однако, с практической точки зрения целесообразнее блок вычисления оценки возмущения реализовать в виде некоторого фильтра. В работе показано, что фильтр, на вход которого для определения оценки $\lambda(t)$ возмущения $f(t)$ должен быть подан процесс его наблюдения $\tilde{x}(t)$, описывается следующим дифференциальным стохастическим уравнением

$$T_\varphi(t) \frac{d\lambda(t)}{dt} + \lambda(t) = T_\varphi(t) \left[\tilde{x}(t) + \frac{S_e}{2G^2} m \right], \quad (28)$$

где постоянная времени фильтра

$$T_\varphi(t) = \left[\frac{S_e}{2G^2} + \frac{D(t)}{S_e} \right]^{-1}. \quad (29)$$

Здесь S_e , S_o — спектральные плотности шумов, а функция $D(t)$ представляет собой апостериорную дисперсию условной плотности $P(f_s/\tilde{x}_{s-t})$ и определяется стохастическим уравнением

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{D(t)} \right] = \frac{1}{S_e} + \frac{S_o}{\sigma^2 D(t)} - \frac{S_o}{D^2(t)}. \quad (30)$$

Уравнение (28) реализуется с использованием нестационарного РС — фильтра, закон изменения параметров которого задается функцией $D(t)$, определенной уравнением (30). С целью упрощения практической реализации фильтра целесообразно принять $D(t)$ постоянной и равной асимптотическому значению D_∞ . Параметры фильтра в этом случае должны быть выбраны из соотношения

$$T_{\varphi} = R_{\varphi} C_{\varphi} = \left(\frac{S_0}{2\sigma^2} + \frac{D_{\infty}}{S_0} \right)^{-1}, \quad (31)$$

где

$$D_{\infty} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\frac{1}{4} + \frac{\sigma^2}{S_0 S_e}}} \approx \sqrt{S_0 S_e}. \quad (32)$$

При условии

$$\frac{S_0}{2\sigma^2} \ll \frac{D_{\infty}}{S_e},$$

вместо (31) получим

$$T_{\varphi} = R_{\varphi} C_{\varphi} = \frac{S_e}{D_{\infty}}. \quad (33)$$

С учетом (33) уравнение (28) преобразуется к виду

$$R_{\varphi} C_{\varphi} \frac{d\lambda(t)}{dt} + \lambda(t) = x(t). \quad (34)$$

Реализация (34) тривиальна и может быть осуществлена с помощью \mathcal{RC} -фильтра с параметрами (33).

Так как оценки $\hat{\lambda}_e^*$ и λ_m^* асимптотически эквивалентны, синтезированный фильтр обеспечивает также определение асимптотически оптимальной оценки $\hat{\lambda}_{es}^*$, используемой для управления скоростью вращения инструмента в соответствии с (16).

В качестве косвенных показателей физико-механических свойств бурильных пород, подлежащих указанной выше (или подобной) обработке, целесообразно принять одну или несколько текущих координат процесса (осевое усилие на забое, механическую скорость бурения, потребляемую мощность и др.), коррелированных в достаточной степени с оцениваемыми свойствами. Процедура оценки и ее техническая реализация просты, если в качестве интегрального показателя свойств породы принять устанавливающееся осевое усилие на забое или механическую скорость бурения. При необходимости, в рассмотрение могут быть введены нелинейные уравнения вида:

$$f = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i x_i + \sum_{i,j} c_{ij} x_i x_j + e, \quad (35)$$

где $\bar{x} = \{ f, v_m, \omega, \lambda', \dots \}$ — подлежащие обработке координаты процесса бурения; e — случайная погрешность.

В этом случае синтез строго оптимальных оценок ввиду аналитических трудностей невозможен и необходимо использовать асимптотически оптимальные оценки, вычисляемые, например, в соответствии с алгоритмом (34) и последующим необходимым функциональным преобразованием согласно (35).

Общая функциональная схема статистически оптимальной САУ процессом бурения показана на рис. 2а, где f - случайные вариации свойств бурильных пород; \hat{f} - оценка этих свойств; x_i , $i = \overline{1, n}$ - технические показатели процесса бурения; u_j , $j = \overline{1, p}$ - оптимальные задающие воздействия автономных САР; ψ_j - режимные координаты процесса; Δ_i - датчики технических показателей; Φ_i - оптимальные фильтры; Φ_L - функциональные преобразователи. Оперативная оценка физико-механических свойств бурильных пород осуществляется в результате наблюдения и обработки косвенных показателей, коррелированных с этими свойствами. На основе полученной оценки с помощью функциональных преобразователей устанавливаются оптимальные задающие воздействия автономных САР режимных координат. Тем самым осуществляется оптимальная компенсация основного возмущения - случайных вариаций физико-механических свойств бурильных пород. При этом в среднем достигается минимум целевого функционала. Если оценку свойств бурильных пород осуществлять по скорости бурения или устанавливающемуся осевому усилию на забое, функциональные схемы САУ приобретают вид, как показано на рис. 2б, 2в-г. Как видно, функциональные схемы отличаются лишь способом получения управляемых воздействий автономных САР и с точки зрения достижения функции цели управления эквивалентны. Две из них (рис. 2в и 2г) не содержат автономных САР осевого усилия на забое. В этом случае оптимальные значения осевых усилий достигаются путем реализации "оптимальной" внешней характеристики системы гидроподачи инструмента на забой.

САУ реализуют асимптотически оптимальные управления режимными координатами, определяемые соотношениями:
для станков типа БСШ-2М, 2СБШ-200

$$\omega_o = K_1 + K_2 \frac{f}{\hat{f}}, \quad F_o = K_3 + K_4 \hat{f}; \quad (36)$$

для станков типа БАШ-250

$$\begin{aligned} \omega_o &= K'_1 + K'_2 \hat{f} \quad \text{или} \quad \omega_o = K'_1 K'_2 \hat{f}^2, \\ F_o &= K'_3 + K'_4 \hat{f}, \end{aligned} \quad (37)$$

где \hat{f} - асимптотически оптимальная оценка контактной прочности; K_i , $i = \overline{1, 4}$ - коэффициенты, определяемые моделью (7).

Если принять, что взаимосвязь между контактной прочностью и средней скоростью бурения может быть адекватно аппроксимирована

на гиперболической зависимостью (к чему есть достаточные основания [II])

$$f = \frac{c}{\sqrt{V}}, \quad (38)$$

то асимптотически оптимальные управления для стакнов типа 2СБШ-200, например, приобретают вид

$$\omega_o = K_f + C_f \dot{V}, \quad F_o = X_3 + \frac{C_f}{\sqrt{V}}. \quad (39)$$

Другие возможные функциональные схемы оптимальных САУ, инвариантных к случайным изменениям свойств бурильных пород, получены в работе в результате рассмотрения некоторых функций режимных координат процесса бурения. Показано, что наиболее интересными в этом смысле являются мощность N привода подачи инструмента на забой и величина проходки h , приходящаяся на один оборот бурового инструмента, среднее значение которых при ведении процесса бурения в оптимальном режиме определяется соотношениями

$$N_o = F_o(\dot{V}) \cdot \dot{V}(f) = N_o(f), \quad h_o = \frac{\dot{V}(f)}{\omega_o(f)} = h_o(f). \quad (40)$$

На основании (40) можно заключить, что для реализации асимптотически оптимального режима бурения необходимо и достаточно обеспечить соответствующее управление мощностью привода подачи инструмента на забой и проходкой за один оборот инструмента в функции текущей оценки контактной прочности бурильных пород (рис. 4а). При условии $a_s = a_y = 0$ (модель (7) при $\alpha = -1$) зависимости оптимальных значений режимных координат определяются соотношениями

$$\omega_o = K_{\omega}/f, \quad F_o = K_F f, \quad (41)$$

что с учетом (38) приводит к результату

$$N_o = K_F c = \text{const}, \quad h_o = K_{\omega}/c = \text{const}. \quad (42)$$

Таким образом, при определенных условиях (адекватности модели вида (7) при $\alpha = -1$ и $a_s = a_y = 0$) стабилизация на оптимальных уровнях мощности привода подачи инструмента на забой и величины проходки за один оборот инструмента обеспечивает ведение процесса в оптимальном режиме при случайных вариациях контактной прочности бурильных пород. Функциональные схемы оптимальных САУ бурением, основанные на указанном подходе, показаны на рис. 4б-г, где ДМ - датчик мощности; ДП - датчик проходки за оборот, пред-

ставляющие собой соответственно множительное и делительное устройство. Схемы отличаются порядком преобразования управляющих сигналов и в смысле достижения функции цели управления эквивалентны ранее рассмотренным. Оптимальная настройка САУ сводится к установке заданий $N_o = \text{const}$, $h_o = \text{const}$ (рис.4б); $N_o = \text{const}$, $K_{\omega} K_p = \text{const}$ (рис.4в); $h_o = \text{const}$, $K_{\omega} K_p = \text{const}$ (рис.4г). С точки зрения технической реализации схемы рис.4б-г представляют несомненный практический интерес.

Г л а в а VI. В предыдущих главах задача управления процессом бурения из условия достижения минимума целевого функционала (себестоимости бурения) интерпретировалась как статическая. Пока в качестве выходной величины САУ рассматривался усредненный технико-экономический показатель, каковым и является себестоимость, такой подход был оправдан. В этой главе основное внимание уделено особенностям динамических свойств бурового станка и системы в целом. Отмечается, что подавляющая часть исследований динамики выполнена на основе детерминированного подхода с использованием традиционных методов теории линейных или линеаризованных САР, когда динамическая модель бурового станка интерпретируется как стационарная. Однако, некоторые параметры динамической модели определяются физико-механическими свойствами разбуриваемой породы и, следовательно, являются существенно случайными. Модель, таким образом, должна рассматриваться как нестационарная, со случайными параметрами. Динамические свойства системы с подобной моделью объекта не могут быть исследованы обычными методами. Для анализа динамических свойств рассматриваемой САУ применена специальная методика, при которой динамические показатели системы (устойчивость, запасы устойчивости, ограничение частоты колебаний переходного процесса и т.д.) определяются по их вероятностям [12].

В качестве исходной при построении модели станка как объекта управления была принята функциональная схема рис.3в, согласно которой входными и выходными координатами станка соответственно являются скорость вращения бурового инструмента ω , максимально возможное осевое усилие на забое F_{max} , устанавливающееся осевое усилие F_x и механическая скорость бурения v . Нелинейная структурная схема САУ показана на рис.5а, где x - положение плунжера дросселя гидросистемы подачи; P_q - давление масла в гидроцилиндре

ре; P_n - давление, развиваемое маслонасосом; Q_{dp} - выходной расход гидродросселя; μ , a , ρ , K_{ut} , K_p - коэффициенты, характеризующие гидросистему подачи; $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$; F - сопротивляемость породы разбуриванию; F - движущая сила гидроцилиндра; A - площадь гидроцилиндра; V - общий объем сжимаемой жидкости; B - модуль объемной упругости; m - масса подвижных частей; K_F , K_φ , T_φ - соответственно передаточные коэффициенты и постоянная времени датчика осевых усилий и фильтра; ΦL_a - функциональный преобразователь; $W_e(\theta)$ - передаточная функция САУ скорости вращения инструмента. Функция $F_c(\vartheta, \omega)$, характеризующая сопротивляемость породы разбуриванию, определяется физико-механическими свойствами буриемых пород и является существенно случайной.

Линеаризованная динамическая модель САУ показана на рис.5б, где K_1 , K_2 , K_3 - коэффициенты, характеризующие систему гидроподачи; $K_{\varphi\omega}$ - передаточный коэффициент функционального преобразователя; T_c - постоянная времени.

На рассмотрении коэффициентов K_ϑ и K_ω следует остановить-
ся внимательнее.

$\hat{K}_\vartheta \approx \frac{\Delta F}{\Delta \vartheta}$ - равен отношению приращения сопротивляемости (осевого усилия на забое) к приращению скорости бурения (подачи); является случайной величиной, зависит от осевого усилия на забое, скорости вращения инструмента и в основном от случайно встретившейся породы. По имеющимся опытным данным для случая бурения кварцита, гранита, доломита, карбонатного сланца и долотомитизированного известняка величина этого коэффициента может меняться от 0,166 т/см в мин. для долотомитизированного известняка при $\omega = 300$ об/мин. до 6,66 т/см в мин. для кварцита при 40 об/мин., то есть в 40 раз. С расширением диапазона (по крепости) буриемых пород вариации параметра \hat{K}_ϑ будут еще значительнее.

$\hat{K}_\omega \approx \frac{\Delta K}{\Delta \omega}$ - равен отношению приращения сопротивляемости (осевого усилия на забое) к приращению скорости вращения инструмента; является случайной величиной, зависит от осевого усилия на забое, скорости бурения и в основном от свойств случайно встретившейся породы. Диапазон вариаций коэффициента \hat{K}_ω весьма значителен: от значения $\hat{K}_\omega = 0,0076$ т/об/мин. для гранита до $K_\omega = 1,28$ т/об/мин., то есть в 160 раз.

Для более полного представления о вариациях этих коэффициентов на рис.6 представлены области возможных значений \hat{K}_σ , \hat{K}_ω , полученные в результате обработки опытных характеристик.

Определены передаточные функции станка по соответствующим каналам. В частности, если в качестве выходного параметра принять устанавливающееся осевое усилие на забое, передаточные функции имеют вид:

1 - по положению плунжера регулировочного дросселя в гидросистеме подачи

$$W_x(P) = \frac{\Delta F(P)}{\Delta x(P)} = \frac{\hat{K}_{2x} (1 + p \hat{T}_y)}{1 + p \hat{T}_x + p_a \hat{T}_x \hat{T}_y}, \quad (43)$$

где

$$\hat{K}_{2x} = \frac{K_1 R (\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}{R^2 + (K_3 + K_{yT})(\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}; \quad (44)$$

$$\hat{T}_x = \frac{K_1 R}{R^2 + (K_3 + K_{yT})(\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}; \quad (45)$$

$$\hat{T}_y = \frac{V_m}{(K_3 + K_{yT})m \beta + V(\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}; \quad (46)$$

$$T_y = \frac{m}{\hat{K}_\sigma + K_{Tp}}. \quad (47)$$

2 - по давлению рабочей жидкости в гидросистеме подачи

$$W_{Ph}(P) = \frac{\Delta F(P)}{\Delta P_h(P)} = \frac{\hat{K}_{2Ph} (1 + p \hat{T}_y)}{1 + p \hat{T}_x + p^2 \hat{T}_x \hat{T}_y}, \quad (48)$$

где

$$\hat{K}_{2Ph} = \frac{K_2 R (\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}{R^2 + (K_3 + K_{yT})(\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}, \quad (49)$$

\hat{T}_x , \hat{T}_y - то же, что в (43).

3 - по скорости вращения инструмента

$$W_\omega(P) = \frac{\Delta F(P)}{\Delta \omega(P)} = \frac{\hat{K}_{2\omega}}{(1 + p T_c)(1 + p \hat{T}_x + p^2 \hat{T}_x \hat{T}_y)}, \quad (50)$$

где

$$\hat{K}_{2\omega} = \frac{\hat{K}_\omega R^2}{R^2 + (K_3 + K_{yT})(\hat{K}_\sigma + K_{Tp})}, \quad (51)$$

\hat{T}_x , \hat{T}_y - то же, что в (43).

В работе также получены передаточные функции для случая, когда выходным параметром принята механическая скорость бурения.

Случайные коэффициенты \hat{K}_σ и \hat{K}_ω , характеризующие сопротивляемость породы разбуриванию, входят в выражения, определяющие статические коэффициенты передачи, постоянные времени и передаточные функции станка как объекта управления.

Условие статической устойчивости системы имеет вид

$$\frac{\hat{K}_\omega \Delta^2}{\Delta^2 + (\hat{K}_\sigma + K_{pr})(K_\theta + K_{\theta T})} = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \omega} \right)_{cr} < \frac{1}{K_F K_\sigma K_{pr}} = \left(\frac{\Delta F}{\Delta \omega} \right)_{pr}. \quad (52)$$

Следовательно, для того, чтобы САУ была статически устойчива в замкнутом состоянии необходимо, чтобы в рабочей точке статический коэффициент $(\Delta F/\Delta \omega)_{pr}$, характеризующий программную зависимость скорости вращения инструмента в функции осевого усилия на забое $\omega_0 - \omega_0(K)$, был больше, чем статический коэффициент передачи бурового станка по скорости вращения инструмента $(\Delta F/\Delta \omega)_{cr}$. Условие статической устойчивости сводится к более сильному

$$\hat{K}_\omega < \frac{1}{K_F K_\sigma K_{pr}}, \quad (53)$$

вероятность выполнения которого определяется интегралом

$$P(\hat{K}_\omega < \frac{1}{K_F K_\sigma K_{pr}}) = \int_{-\infty}^{Y_{K_F K_\sigma K_{pr}}} p(\hat{K}_\omega) d\hat{K}_\omega, \quad (54)$$

где $p(\hat{K}_\omega)$ - плотность вероятности \hat{K}_ω .

Динамические свойства САУ также могут быть определены лишь в вероятностном смысле. В качестве примера на рис.7 построены кривые Д-разбиения. Там же нанесен эллипс полного рассеивания параметров \hat{K}_σ , \hat{K}_ω . Вероятность устойчивости САУ определяется интегралом

$$P(\hat{K}_\sigma, \hat{K}_\omega \in \Omega) = \iint_{\Omega} p(\hat{K}_\sigma, \hat{K}_\omega) d\hat{K}_\sigma d\hat{K}_\omega \leq 1, \quad (55)$$

где $p(\hat{K}_\sigma, \hat{K}_\omega)$ - плотность вероятности \hat{K}_σ , \hat{K}_ω .

В работе получены также выражения, определяющие вероятность обеспечения качественных показателей динамических свойств САУ (колебательности, ограничения частоты колебаний и др.).

Г л а в а III. Наличие неконтролируемых возмущений и неучтенных факторов (вариации качества бурового инструмента, сезонные изменения условий работы и т.д.) приводит к дрейфу параметров статической модели процесса, что снижает эффективность функционирования САУ процессом бурения, использующих принцип компенсации. Указанное затруднение может быть преодолено, если принять,

что модель процесса бурения является нестационарной и на этой основе осуществить синтез адаптивной САУ. Использование гипотезы квазистационарности позволяет построить адаптивную САУ бурением как некоторую иерархическую структуру, содержащую быстро действующий контур компенсации, осуществляющий оперативное управление процессом и циклически действующую цепь обратной связи, изменяющую алгоритм функционирования контура компенсации целенаправленным образом так, чтобы управление, им реализуемое, приближалось к оптимальному в смысле избранного критерия.

Задача адаптивного управления процессом бурения включает оперативное изучение процесса (его идентификацию) и собственно управление, стратегию которого желательно выбрать с учетом необходимости изучения процесса. В указанной постановке применение идей и методов дуального управления не только целесообразно, но и необходимо. Возникающие при этом трудности аналитического и вычислительного характера окупаются ясностью и логичностью полученных результатов, основным из которых является построение наиболее эффективной САУ бурением при наличии неопределенности, в том числе априорной. Задача синтеза алгоритмов функционирования адаптивной САУ решена в работе, исходя из следующих условий:

1. Интервал времени функционирования САУ разбит на циклы $T = 1, 2, \dots, j, \dots, N$, а каждый цикл - на такты $t = 1, 2, \dots, S, \dots, n$.

2. Уравнение объекта представлено в виде

$$x_j = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \bar{\varPhi}_{js}^T (\bar{u}_{js}, f_{js}) \bar{u}. \quad (56)$$

Введение в (56) оператора усреднения соответствует тому реальному факту, что в силу особенностей процесса бурения его технико-экономические показатели могут быть определены только по результатам законченного бурения и, таким образом, представляют среднее за цикл (бурения). Выражение под знаком суммы в (56) представляет собой "оперативную" модель процесса

$$Q_{js} = \bar{\varPhi}_{js}^T (\bar{u}_{js}, f_{js}) \bar{u}, \quad (57)$$

где \bar{u} - m -мерный вектор-столбец неизвестных коэффициентов модели процесса; $\bar{\varPhi}_{js}$ - m -мерный вектор-столбец функций входных переменных, зависящих от управлений \bar{u}_{js} и контролируемого возмущения f_{js} . В частном случае (модель (7)) этот вектор имеет вид

$$\bar{\Phi}_{js}^T = \{1, f_{js}, f_{js}^2, \omega_{js}, f_{js}^3, \omega_{js}^2, f_{js}^4, \omega_{js}f_{js}^3, f_{js}^2f_{js}\}, \quad (58)$$

где $\alpha = -1, 1, 2$.

3. На основе гипотезы квазистационарности принято, что коэффициенты модели являются неизвестными случайными константами, нормально распределенными с вектором математических ожиданий $\bar{\mu}$ и ковариационной матрицей P_0 . Контролируемое возмущение интерпретировано как нормальный стационарный марковский процесс, а шумы в канале его наблюдения и канале обратной связи – как независимые нормальные случайные последовательности с нулевыми средними и известными дисперсиями. Шумы в канале обратной связи (рис.8а) отражают реально неизбежные погрешности вычисления технико-экономических показателей процесса (критерия оптимальности) по результатам законченного бурения. Уравнения наблюдения величин f_{js} и x_j приняты аддитивными.

Удельная функция потерь L_{js} , соответствующая j -му циклу, принята в виде

$$L_{js} = X_j(\bar{u}_{js}, f_{js}, \bar{\mu}),$$

что логично, так как задачей САУ является минимизация величины (56).

Первый использованный в работе метод синтеза аддитивных стратегий управления осуществлен из условия минимума удельного риска

$$R_{js} = M\{L_{js}\} = M\{X_j(\bar{u}_{js}, f_{js}, \bar{\mu})\} \quad (59)$$

и позволяет решить задачу синтеза алгоритмов функционирования как контура компенсации, так и цепи обратной связи САУ. Удельный риск определяется формулой

$$R_{js} = \int_{\Omega(\bar{x}_{j+1,n}, \bar{y}_{j+1,n}; \bar{u}_{j+1,n})} \tilde{P}_{j+1,n} P(\bar{x}_{j+1,n}) \left[\int_{\Omega(\bar{u}_{js})} \{\bar{\varphi}_{js}\} \{\bar{\mu}_{j+1}\} \tilde{P}_{js} d\bar{u}_{js} \right] d\Omega, \quad (60)$$

где

$$\{\bar{\varphi}_{js}\} = \int_{\Omega(f_{js})} \bar{\varphi}_{js}(\bar{u}_{js}, f_{js}) P(f_{js}/\bar{x}_{js}) d\Omega; \quad (61)$$

$$\{\bar{\mu}_{j+1}\} = \int_{\Omega(\bar{f}_{j+1,n}; \bar{\mu})} \bar{\mu} P(\bar{\mu}) \prod_{i=1}^{j+1} \{P(\bar{f}_{in}/\bar{x}_{in}) P(y_i/\bar{u}_{in}, \bar{f}_{in}, \bar{\mu})\} d\Omega, \quad (62)$$

$\tilde{P}_{j+1,n} = \prod_{i=1}^{j+1} \tilde{P}_{is}$ – стратегия управляющего устройства.

Вследствие нерандомизированности стратегий, оптимальные в смысле минимума удельного риска управления определяются уравнением

$$\{\bar{\Phi}_{js}\}^T \{\bar{\mu}_{j-1}\} = \min_{\bar{\theta}_{js}} \quad (63)$$

и имеют вид

$$U_{js}^* = -\frac{1}{2\mu_{ej-1}} (\mu_{ej-1} + \mu_{gj-1} \{f_{js}^\alpha\}), \alpha = -1, 1, 2. \quad (64)$$

$$U_{gj-1}^* = -\frac{1}{2\mu_{ej-1}} (\mu_{ej-1} + \mu_{gj-1} \{f_{js}\}). \quad (65)$$

Управление на j -том цикле осуществляется на основании оценок $\bar{\mu}_{j-1}$, неизвестных параметров $\bar{\mu}$ модели, полученных на предыдущем, ($j-1$)-ом цикле и текущей оценкой $\{f_{js}^\alpha\}$ контролируемого возмущения f_{js} . Вектор оценок $\bar{\mu}_{j-1}$, представляет собой апостериорное условное математическое ожидание вектора неизвестных параметров $\bar{\mu}$ и определяется рекуррентным соотношением, совпадающим по форме с алгоритмом стохастической аппроксимации

$$\bar{\mu}_{j-1} = \bar{\mu}_{j-2} + \frac{P_{j-2} \tilde{\varPhi}_{j-1}}{\sigma_h^2} (y_{j-1} - \tilde{\varPhi}_{j-1} \bar{\mu}_{j-2}), \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (66)$$

где $\tilde{\varPhi}_{j-1} = \tilde{\varPhi}_{j-1}(\bar{\mu}_{j-1})$ - среднее по множеству значение вектора

$\tilde{\varPhi}_{js}(\bar{\mu}_{j-1}, \{f_{js}^\alpha\}, f_{js})$, определяемое интегралом

$$\tilde{\varPhi}_{j-1} = \int \tilde{\varPhi}_{js}(\bar{\mu}_{j-1}, \{f_{js}^\alpha\}, f_{js}) P(\{f_{js}\}, f_{js}) d\Omega(\{f_{js}\}, f_{js}); \quad (67)$$

P_{j-1} - апостериорная матрица ковариаций вектора неизвестных параметров модели, определяемая рекуррентным соотношением

$$P_{j-1} = P_{j-2} - \frac{P_{j-2} \tilde{\varPhi}_{j-1} \tilde{\varPhi}_{j-1}^T P_{j-2}}{\sigma_h^2 + \tilde{\varPhi}_{j-1}^T P_{j-2} \tilde{\varPhi}_{j-1}}; \quad (68)$$

σ_h^2 - дисперсия погрешности вычисления критерия оптимальности.

Оценки $\{f_{js}^\alpha\}$ возмущения f представляют собой апостериорные условные математические ожидания $M\{f_{js}^\alpha | \bar{\theta}_{js-1}\}$, зависят от способа комбинации возмущения и управлений в модели процесса и определяются следующими выражениями

$$\{f_{js}\} = 2a_{js-1} + (1-a)m; \quad (69)$$

$$\{f_{js}^2\} = (2a_{js-1} + (1-a)m)^2 + \sigma_h^2 + a^2 D_{js-1}; \quad (70)$$

$$\{f_{js}^{-1}\} \approx \frac{\{(f_{js})\}^2 + \sigma_h^2 + a^2 D_{js-1}}{\{(f_{js})\}^3}, \quad (71)$$

ГДЕ

$$a_{js-1} = \left(2a_{js-2} + (1-\varepsilon)m \right) \left(1 - \frac{D_{s-1}}{\sigma_e^2} \right) + \frac{D_{s-1}}{\sigma_e^2} z_{js-1}, \quad (72)$$

$$D_{s-1} = \left(\frac{1}{\sigma_e^2} + \frac{1}{\sigma_e^2 + \varepsilon^2 D_{s-2}} \right)^{-1}; \quad (73)$$

ε , m , σ_e^2 – параметры плотности (9) возмущения; σ_e^2 – дисперсия шума в канале его наблюдения.

В работе показана тождественность оценок (69) и (20), полученных разными способами, что подтверждает правильность аналитических результатов. Вследствие использования для нахождения оценок неизвестных параметров модели среднего за цикл значения выходной величины, невозможно определить оценки параметров, входящих в исходное уравнение объекта аддитивно по отношению к управлению. Для модели (7) этими параметрами являются μ , μ_a и μ_s , оцениваемые единой оценкой $\bar{\mu}$. Важным является то обстоятельство, что указанные параметры на выбор оптимальных управлений не влияют.

Так как разомкнутая стратегия управления, основанная на минимизации удельного риска ("недуальная" стратегия) имеет множество точек сходимости и не может быть применена в качестве самостоятельного метода отыскания экстремума функции цели управления, в работе осуществлен также синтез стратегий управления замкнутого типа (дуальных), основанных на минимизации полного риска.

Уравнение объекта при синтезе стратегии управления по критерию полного риска

$$R = M \left\{ \sum_{j=1}^n X_j \right\} = \sum_{j=1}^n R_j \quad (74)$$

принято на основании ergодической гипотезы вместо (56) в виде (75)

$$X_j = \tilde{\Phi}_j^T(\bar{K}_j) \bar{\mu}, \quad (75)$$

где $\tilde{\Phi}_j(\bar{K}_j)$ – среднее по множеству значение вектора $\tilde{\Phi}_{js}(\bar{K}_j, \{f_{js}^*\}, f_{js}^*)$, а

$$\bar{K}_j = \{ K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j} \}, \quad K_{ij} = - \frac{\{ \mu_{s(i-1)} \}}{2 \{ \mu_{s(i-1)} \}}. \quad (76)$$

Здесь $\{ \bar{\mu}_{j-1} \}$ – оценки неизвестных параметров модели. При указанном подходе компоненты вектора \bar{K}_j играют роль новых управлений.

Формула удельного риска (рис.8б) имеет вид

$$R_j = \int_{\mathcal{G}(\bar{E}, \bar{K}_{j-1}, \bar{y}_{j-1})} \tilde{\Phi}_j^T(\bar{K}_j) \bar{\mu} P(\bar{E}/\bar{K}_{j-1}, \bar{y}_{j-1}) \Gamma_j P(\bar{K}_{j-1}, \bar{y}_{j-1}) d\Omega, \quad (77)$$

где Γ_j – стратегия управляющего устройства.

Оптимальные в смысле минимума полного риска (74) управления определяются решением функционального уравнения

$$T_j^*(P_{j-1}, \bar{\mu}_{j-1}) = \min_{\bar{R}_j} [\tilde{\varphi}_j^T(\bar{\kappa}_j) \bar{\mu}_{j-1} + \\ + \int_{\Omega(y_j)} T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_j) P(y_j | \bar{R}_j, \bar{y}_{j-1}) dy_j], \quad (78)$$

где $T_j^*(P_{j-1}, \bar{\mu}_{j-1})$ – оптимальный условный риск, являющийся функцией параметров апостериорной плотности распределения параметров $\bar{\mu}$ модели – ковариационной матрицы P_{j-1} и математического ожидания $\bar{\mu}_{j-1}$, играющих роль достаточных статистик.

Точное решение (78) неосуществимо вследствие большого числа достаточных статистик (для модели (7) строго оптимальные управление есть функция 49 переменных). Использованный в работе метод синтеза субоптимальных стратегий управления основан на квадратичной аппроксимации удельного риска и заключается в следующем.

Предположим, что дисперсии параметров $\bar{\mu}$ достаточно малы, то есть мала $\|P_{j-1}\|$ – норма матрицы их ковариаций. В силу этого, изменение оценок $\bar{\mu}_j - \bar{\mu}_{j-1}$ будет также малым и функция условного риска $T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_j)$ может быть разложена в окрестности точки $\bar{\mu}_j$. Удерживая члены разложения не выше третьей степени, получим

$$T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_j) = T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_{j-1}) + \nabla_{\bar{\mu}}^T T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_{j-1})(\bar{\mu}_j - \bar{\mu}_{j-1}) + \\ + \frac{1}{2} (\bar{\mu}_j - \bar{\mu}_{j-1})^T \nabla_{\bar{\mu}}^2 T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_{j-1})(\bar{\mu}_j - \bar{\mu}_{j-1}). \quad (79)$$

Подставляя разложение (79) в уравнение (78), интегрируя по y_j и полагая в силу принятых относительно нормы $\|P_{j-1}\|$ допущений $P_j \approx P_{j-1}$, будем иметь

$$T_j^*(P_{j-1}, \bar{\mu}_{j-1}) = T_{j+1}^*(P_{j-1}, \bar{\mu}_{j-1}) + \min_{\bar{R}_j} \left(\tilde{\varphi}_j^T \bar{\kappa}_j + \frac{\tilde{\varphi}_j^T \bar{\kappa}_j \nabla_{\bar{\mu}}^2 T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_{j-1}) \bar{\kappa}_j}{2(\sigma_k^2 \tilde{\varphi}_j^T \bar{\kappa}_j)} \right). \quad (80)$$

Вновь в силу принятых предположений при $\|P_{j-1}\| \rightarrow 0$ можно утверждать, что

$$T_{j+1}^*(P_j, \bar{\mu}_{j-1}) \approx T_{j+1}(0, \bar{\mu}_{j-1}),$$

то

$$T_{j+1}^*(0, \bar{\mu}_{j-1}) + (\lambda-j) \min_{\bar{R}_j} \tilde{\varphi}_j^T \bar{\mu}_{j-1} = (\lambda-j) x_j^*(\bar{\mu}_{j-1}). \quad (81)$$

Здесь $\hat{X}_j^*(\bar{\mu}_{j-1})$ представляет собой оптимальный удельный риск и легко может быть определен по уравнению объекта, в котором параметры $\bar{\mu}_{j-1}$ полагаются точно известными ($\|P_{j-1}\| = 0$).

Из (82) и (83) следует, что субоптимальная стратегия при условии малости $\|P_{j-1}\|$ определяется на каждом цикле следующим уравнением

$$\Phi_j^T(\bar{\kappa}_j)\bar{\mu}_{j-1} + \frac{N-j}{2} \cdot \frac{\Phi_j(\bar{\kappa}_j)P_{j-1}\nabla X_j^*(\bar{\mu}_{j-1})P_{j-1}\Phi_j(\bar{\kappa}_j)}{\sigma_k^2 + \Phi_j^T(\bar{\kappa}_j)P_{j-1}\Phi_j(\bar{\kappa}_j)} = \min_{\bar{\kappa}_j}, \quad (82)$$

где вектор оценок $\bar{\mu}_{j-1}$, параметров $\bar{\mu}$ и ковариационная матрица P_{j-1} , вычисляются по рекуррентным соотношениям (66) и (68).

Стратегия замкнутого типа имеет прозрачный физический смысл. Первое слагаемое (82) представляет собой условный удельный риск – математическое ожидание выходной величины на данном цикле. Второе слагаемое является линейной комбинацией элементов матрицы ковариаций оценок параметров модели на следующем цикле, и его уменьшение, как показано в работе, соответствует уменьшению матрицы ковариаций P_j , то есть уменьшение дисперсий оценок параметров – эффективному изучению процесса. Данная стратегия устанавливает компромисс между степенью уменьшения удельного риска – риска действия и полного риска на последующих циклах, зависящего через дисперсии оценок параметров от выбранного управления. В этом и проявляется дуальный характер управлений. Причем, чем больше число циклов, оставшихся до конца процесса управления, тем больший вес придается изучению объекта. Указанное обстоятельство может привести к недопустимым в смысле удельного риска затратам на первых циклах.

В работе показана целесообразность использования на первых циклах разомкнутой стратегии, определяемой из условий минимума удельного риска уравнением (63). "Недуальная" стратегия на первых циклах управления процессом позволяет при минимально возможных затратах на каждом отдельном цикле (бурения) осуществить предварительное изучение управляемого процесса, поскольку при любых управлениях, за исключением удовлетворяющих уравнению $P_{j-1}\tilde{\Phi}_j=0$, норма $\|P_{j-1}\|$ уменьшается, то есть происходит уточнение неизвестных параметров модели. Именно уменьшение $\|P_{j-1}\|$ и позволяет в последующем перейти к дуальной стратегии, синтезированной в предположении малости $\|P_{j-1}\|$. Такая комбинированная стратегия,

заключающаяся в том, что до некоторого цикла j^* , определяемого ходом процесса адаптации параметров модели, используется разомкнутая стратегия, а при $j > j^*$ - замкнутая (дуальная), является более эффективной (в смысле удельных затрат) по сравнению с только дуальной стратегией, использование которой, как говорилось, может привести к значительной "стоимости" изучения процессы на первых циклах.

Оптимальные управление при комбинированной стратегии определяются уравнением

$$\Phi_j^T(K_j) \delta_j + k_j \frac{N-j}{2} \cdot \frac{\Phi_j^T(K_j) P_{j-1} V^2 X_j^T (E_{j-1}) P_{j-1} \Phi_j(K_j)}{\sigma_k^2 + \Phi_j^T(K_j) P_{j-1} \Phi_j(K_j)} = \min_{\delta_j}, \quad (83)$$

где $k_j = 0$ - для "недуальной" стратегии и $k_j = 1$ для дуальной. В качестве критерия смены стратегий принято текущее среднее приращения управлений

$$\delta_j = f \sum_{i=j+1}^{j^*} \|K_i - \bar{K}_{i-1}\|, \quad (84)$$

где $\|K_i - \bar{K}_{i-1}\|$ - расстояние между управлением K_i и \bar{K}_{i-1} в евклидовом пространстве управлений. Как только текущее среднее δ_j становится меньше порога A , что свидетельствует о том, что "надуальная" стратегия исчерпала себя, происходит переключение на дуальную стратегию.

В работе показано, что алгоритмы функционирования адаптивной САУ процессом бурения легко распространяются на случай неизвестного математического ожидания априорной плотности вероятности неизвестных параметров модели процесса. Для этого достаточно лишь в качестве априорного среднего неизвестных параметров модели взять априорное среднее \bar{P}_0 , среднего значения вектора неизвестных параметров и результирующую априорную матрицу ковариаций Q_0 , определяемую соотношением

$$Q_0 = P_\infty + P_b, \quad (85)$$

где P_∞ - матрица ковариаций неизвестного среднего \bar{P}_0 .

Показано также, что оптимальные управление не зависят в явном виде от ограничений на управление. Учет ограничений сводится к использованию в соотношениях (66), (68), (82), (83), определяющих алгоритмы идентификации и оптимальных управлений, вектора Φ , вычисленного с учетом ограничений, по полученным в работе соотношениям.

Сходимость алгоритмов – наиболее существенный вопрос, возникающий при реализации САУ. В работе показано, что для сходимости алгоритмов (66, 68 и 82) аддативного управления процессом бурения необходимо и достаточно, чтобы

$$\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{S_P T_{j-1}} \cdot \frac{\tilde{Q}_j^T R_j \tilde{Q}_j P_{j-1} \tilde{Q}_j}{\sigma_k^2 + \tilde{Q}_j^T P_{j-1} \tilde{Q}_j} = \infty, \quad (86)$$

где $\tilde{Q}_j = -V^2 X_j^*(\bar{A}_{j-1})$, $T_j = A_j P_j A_j^T$, а A_j – симметрическая положительно полуопределенная матрица, такая, что $\tilde{Q}_j = A_j A_j^T$.

Выясняено, что стратегия выбора $\tilde{Q}_j(\bar{K}_j)$ (то есть управлений \bar{F}_j) в соответствии с (82) максимизирует уменьшение следа матрицы

$$S_P T_j = S_P T_{j-1} - \max_{\tilde{Q}_j \in \Phi} \frac{\tilde{Q}_j^T R_j \tilde{Q}_j}{\sigma_k^2 + \tilde{Q}_j^T P_{j-1} \tilde{Q}_j}, \quad (87)$$

причем $\lim_{j \rightarrow \infty} S_P T_j = 0$ и, следовательно, матрица T_j сходится к нулевой.

Уравнение, определяющее предельную матрицу ковариаций оценок параметров модели $P_\infty = \lim_{j \rightarrow \infty} P_j$, имеет вид $P_\infty V = 0$. Анализ этого уравнения показал, что, если матрица $V = V^2 X^*$ неособенная, предельная матрица P_∞ является нулевой, что означает сходимость в среднеквадратическом оценок к истинным значениям параметров. Если матрица $V^2 X^*$ вырождена (именно это условие справедливо для объекта (75)), то $\lim_{j \rightarrow \infty} P_j = P_\infty$, где P_∞ – такая вырожденная матрица, для которой дисперсии оценок в общем случае отличны от нуля, но дисперсии отношений оценок, определяющих управления (76), равны нулю, что означает сходимость управлений. Полученный вывод является естественным, поскольку для предельных оптимальных управлений нет необходимости знать истинные значения параметров объекта, а достаточно знать лишь их истинные отношения, что и реализуют алгоритмы (66, 68, 82). Если в уравнении (82) для стратегий положить $V^2 X^* = E$, где E – единичная матрица, то оценки параметров сходятся к их истинным значениям. Такая стратегия, однако, менее эффективна, так как появляются дополнительные затраты, связанные с определением истинных значений параметров модели, что для оптимального управления процессом в смысле (34) не обязательно.

Эффективность алгоритмов функционирования аддативных САУ процессом бурения была исследована моделированием на ЦВМ. Результаты моделирования согласуются с изложенным теоретическим представлениями. Типичные процессы адаптации показаны на рис. 9. В случае комбинированной стратегии, пока используется разомкнутая

стратегия ($j < j^* = 5$) (рис.9а), происходит уточнение управлений и соответственно уменьшение выходной величины (критерия оптимальности). После включения дуальной стратегии происходит дальнейшее уточнение управлений и снижение выходной величины практически до оптимального уровня. Замкнутая стратегия в смысле изучения процесса более эффективна (рис.9б), однако, на первых циклах затраты на изучение значительны.

ВЫВОДЫ И ОБОБЩЕНИЯ

1. Целью управления процессом бурения является проходка скважин при наименьших затратах общественного труда. Критерий оптимальности является функционалом, зависящим от одного или нескольких технико-экономических показателей процесса. Цель управления адекватно отражает критерий, учитывающий основные технико-экономические показатели – производительность и себестоимость процесса. Достаточно обоснованным является критерий оптимальности, построенный на основе себестоимости, комплексно учитывающей как техническую сторону процесса, так и экономическую.

2. При построении математической модели процесса бурения динамикой процессов по каналам управления возможно и целесообразно пренебречь и, таким образом, осуществить синтез оптимальных и адаптивных САУ на основе статической модели процесса. В качестве такой модели целесообразно использовать полиномиальное соотношение не ниже второго порядка, включающее основные управлении – скорость вращения бурового инструмента, осевое усилие на забое, а при необходимости (целесообразности) также расход промывочного агента, и основное возмущение, приводящее к дрейфу экстремума целевого функционала – интегральный показатель физико-механических свойств пород (контактную прочность, крепость).

3. При построении САУ бурением необходимо учитывать, что:

- I) практически нельзя получить текущие (непрерывно или с приемлемым интервалом дискретности) значения целевого функционала;
- 2) возможна априорная неопределенность и дрейф параметров модели процесса.

При указанных обстоятельствах САУ необходимо строить как иерархическую, содержащую быстродействующий контур компенсации, осуществляющий оперативное управление процессом на основе его априорной модели и циклически действующую цепь обратной связи, из-

меняющую алгоритм функционирования контура компенсации так, чтобы управление им реализуемое, приближалось к оптимальному.

4. Статистически оптимальные в смысле минимума среднего риска (математического ожидания критерия оптимальности, например, себестоимости) управления режимными параметрами являются функциями непрерывно вычисляемой оценки физико-механических свойств бурильных пород. Для рассмотренных случаев скорость вращения инструмента с ростом контактной прочности породы должна уменьшаться (по линейному закону или закону смещенной гиперболы), а осевое усилие – увеличиваться по линейному закону.

5. Вид и алгоритм вычисления текущей оценки свойств пород определяется исходной статистической моделью случайного изменения этих свойств. Наиболее общее и адекватное представление достигается, если в качестве модели принять марковский процесс.

6. Максимальный выигрыш, который может быть достигнут в системе управления процессом бурения, работающей по разомкнутому циклу за счет введения инвариантных связей по основному возмущению, определяется выражением (28) и характеризует предельно достижимую эффективность САУ. Реальный выигрыш (29) меньше максимального, поскольку даже в установившемся режиме достижима лишь частичная инвариантность из-за марковского характера возмущения и конечного времени его наблюдения.

7. Оперативная оценка свойств бурильных пород может быть осуществлена в результате обработки одной или нескольких текущих координат процесса, коррелированных в достаточной степени с оцениваемыми свойствами. Процедура оценки и ее техническая реализация просты, если в качестве интегрального показателя физико-механических свойств породы принять устанавливающуюся осевое усилие на забое или устанавливающуюся скорость бурения. Особенно просто реализуются асимптотически оптимальные оценки (с использованием стационарного РС - фильтра).

8. Рассмотренные девять вариантов функциональных схем САУ, работающих по разомкнутому циклу, отличаются способом получения и преобразования управляющих воздействий автономных САР режимных координат и с точки зрения достижения функции цели управления эквивалентны. Новыми и интересными в смысле практической реализации являются функциональные схемы, основанные на регулировании

в функции оценки свойств буримой породы мощности привода подачи инструмента на забой и величины проходки за один оборот инструмента. При определенном виде модели процесса стабилизация мощности привода подачи инструмента на забой и величины проходки за один оборот инструмента обеспечивает ведение процесса бурения в оптимальном режиме. В этом случае оптимальная настройка САУ сводится к установке заданий оптимальных уровней мощности привода подачи и величины проходки за один оборот, которые для известной модели процесса легко определяются.

9. Некоторые параметры (коэффициенты передачи и постоянные времени) динамической модели бурового станка определяются физико-механическими свойствами буримых пород и являются существенно случайными. Поэтому буровой станок как объект управления может быть адекватно описан только с использованием нестационарной модели. Пример такой модели получен в работе. Динамические и статические свойства САУ бурением, вследствие нестационарности модели бурового станка как объекта управления, могут быть определены лишь в вероятностном смысле. В работе дан пример исследования статики, устойчивости и качества САУ при указанном выше подходе.

10. Задача аддитивного управления процессом бурения включает оперативное изучение процесса (его идентификацию) и собственно управление, стратегию которого желательно выбрать с учетом необходимости изучения процесса. В указанной постановке применение идей и методов дуального управления не только целесообразно, но и необходимо.

II. Стратегия управления, основанная на минимизации удельного риска имеет множество точек сходимости и не может быть применена в качестве самостоятельного метода отыскания экстремума функции цели управления. Однако, использование этой стратегии на первых циклах управления процессом позволяет при минимальных удельных затратах провести предварительное изучение процесса. На последующих циклах, после того как возможности "недуальной" стратегии будут исчерпаны, целесообразно перейти к дуальной стратегии, синтезированной из условия минимума полного риска.

Такая комбинированная стратегия является более эффективной, по сравнению с только дуальной стратегией, использование которой может привести к значительной "стоимости" изучения процесса на первых циклах.

12. Дуальная стратегия выбора управлений в соответствии с (82) удовлетворяет условию сходимости, полученному в виде (86). При этом предельная матрица ковариаций оценок параметров модели сходится к такой вырожденной матрице, для которой дисперсии оценок в общем случае отличны от нуля, по дисперсии отношений оценок, определяющих управления, равны нулю, то есть предельные управление соответствуют оптимальным (истинным).

13. Цифровое моделирование, выполненное с учетом ограничений на управления, подтвердило работоспособность и эффективность алгоритмов функционирования адаптивной САУ бурением.

14. Эффективность САУ процессом бурения, работающих по замкнутому циклу (содержащих лишь контур компенсации) подтверждена результатами их промышленного внедрения.

В р е з у л ь т а т е : обоснована и разработана математическая модель процесса бурения, пригодная для целей синтеза САУ; обоснованы и разработаны принципы построения САУ бурением; осуществлен синтез оптимальных и адаптивных алгоритмов функционирования САУ; выполнено исследование свойств САУ и подтверждена их эффективность в промышленных условиях. Таким образом, основная цель диссертации – построение и исследование оптимальных и адаптивных систем управления процессом бурения на открытых горных разработках, как представляется автору, достигнута.

Отдельные результаты работы были представлены на ряде совещаний и конференций, в частности:

I) на IV Всесоюзном совещании по автоматическому управлению (технической кибернетике), Тбилиси, 1968.

- 2) на 2 Межвузовской научно-технической конференции "Техническая кибернетика", Москва, 1969.
- 3) на IV Международном конгрессе ИФАК, Варшава, 1969.
- 4) на II Всесоюзном совещании по статистическим методам теории управления, Ташкент, 1971.
- 5) на IV Всесоюзном совещании по теории инвариантности и теории чувствительности систем автоматического управления, Киев, 1971.

По теме диссертации имеется более 30 работ, в том числе авторские свидетельства и зарубежные патенты. Основное содержание изложено в следующих работах:

1. Цыганков В.А. Адаптивная система управления процессом бурения с комбинированным управлением. МВ и ССО СССР, Межвузовский НИИТК при НТС МВ и ССО СССР, I Межвузовская научно-техническая конференция, "Техническая кибернетика", 28-30 января 1969. Тезисы докладов, М., 1969.

2. Черноруцкий Г.С., Цыганков В.А. Система автоматического управления, оптимизирующая процесс бурения взрывных скважин. АН СССР, НКАУ СССР, IV Всесоюзное совещание по автоматическому управлению (технической кибернетике), Тбилиси, 1968.

3. Цыганков В.А. Адаптивная система управления процессом бурения с комбинированным управлением. Известия вузов, "Приборостроение", № 4, 1971.

4. Черноруцкий Г.С., Цыганков В.А. Станок шарошечного бурения как объект автоматического управления. Труды ЧПИ, вып.40, Челябинск, 1966.

5. Буткин В.Д., Цыганков В.А., Черноруцкий Г.С. О принципах автоматического управления станками вращательного бурения на карьерах. Труды института "Гипроникель", вып.43, Л., 1969.

6. Цыганков В.А. О принципах построения систем автоматического управления, оптимизирующих процесс бурения взрывных скважин. Труды ЧПИ, вып.64, Челябинск, 1970.

7. Цыганков В.А., Черноруцкий Г.С. О стохастическом характере динамических свойств САУ процессом бурения взрывных скважин. Труды ЧПИ, вып.64, Челябинск, 1970.

8. Цыганков В.А. Синтез статистически оптимального управления процессом бурения. АН СССР, АН Узбекской ССР, П Всеобщее совещание по статистическим методам теории управления, Ташкент, 20-24 апреля 1971, "Наука", М., 1970.

9. Цыганков В.А. Синтез инвариантных связей методами теории статистических решений в экстремальной системе управления процессом бурения. АН СССР, АН УССР, ИК АН УССР, IV Всеобщее совещание по теории инвариантности и теории чувствительности систем автоматического управления, Киев, 26-30 апреля 1971, изд. ИК АН УССР, Киев, 1971.

10. Цыганков В.А., Ткачев А.М. К синтезу оптимальных управлений объектами со случайными параметрами. Труды ЧПИ, вып.88, Челябинск, 1972.

II. Цыганков В.А. Статистически оптимальное управление процессом вращательного бурения. Труды ЧПИ, вып.88, Челябинск, 1972.

12. Цыганков В.А., Черноруцкий Г.С., Сибрин А.П., Буткин В.Д. "Устройство для автоматического управления буровыми станками". Авторское свидетельство № 148367, Приоритет от 10 мая 1961 г.

13. Цыганков В.А. Аналоговое делительное устройство. Авторское свидетельство № 163807. Приоритет от 10 января 1963.

14. Цыганков В.А., Беседин А.А. Адаптивное управление процессом вращательного бурения. Республиканский научно-технический семинар по адаптивным системам управления в промышленности, Киев, 1973 (принято к докладу).

15. Беседин А.А., Цыганков В.А. Субоптимальная стратегия дуального управления экстремальным объектом. Республиканский научно-технический семинар по адаптивным системам управления в промышленности, Киев, 1973 (принято к докладу).

16. Tsigancov V.A., Tchernorutski G.S., Butkin V.D., Sibrim A.P. "Dispositif pour la commande automatique des sondes-retatives". Brevet Belge, N679618, Bruxelles, le 15 avril, 1966.

17. Tsygankov V.A., Chernorutsky G.S., Butkin V.D., Sibrim A.P. "Anordning för automatisk reglering av borrutrustningar för rotationsboring". Patent № 215968. Stockholm, den 7 mars, 1966.

18. Tchernorucki G.S., Tsygankov V.A. Automatic Control System, optimalizing Process of Blast Openings Drilling. Fourth Congress of the International Federation of Automatic Control. Warsaw, 16-21 June, 1969, Session 25, Paper 25.7.

Л и т е р а т у р а

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. "Наука", М., 1966.
2. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. "Наука", М., 1968.
3. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. "Наука", М., 1971.
4. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. "Наука", М., 1971.
5. Теория и практика бурения скважин шарошечными долотами на карьерах. Под ред. Н.В. Мельникова, изд. "Наука", Казахской ССР, Алма-Ата, 1970.
6. Кутузов Б.Н. Теория, техника и технология буровых работ. "Недра", М., 1972.
7. Борисов В.И. Некоторые проблемы векторной (многокритериальной) оптимизации. Ученое совещание по проблемам управления, М., 1971. Рефераты докладов, часть I, АН СССР, "Наука", 1971.
8. Пугачев В.С. Теория случайных функций. Физматгиз, М., 1970.
9. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией. "Наука", М., 1964.
10. Медведев Г.А., Тарасенко В.П. Вероятностные методы исследования экстремальных систем. М., "Наука", 1967.
11. Барон Л.И., Глатман А.Б. Контактная прочность горных пород. "Недра", М., 1966.
12. Черноруцкий Г.С. Стохастический подход к анализу динамики автоматических систем. Известия вузов, "Приборостроение", № 6, 1965.

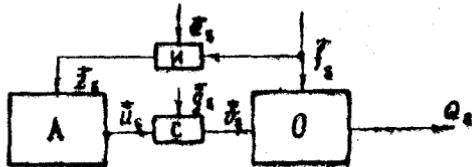
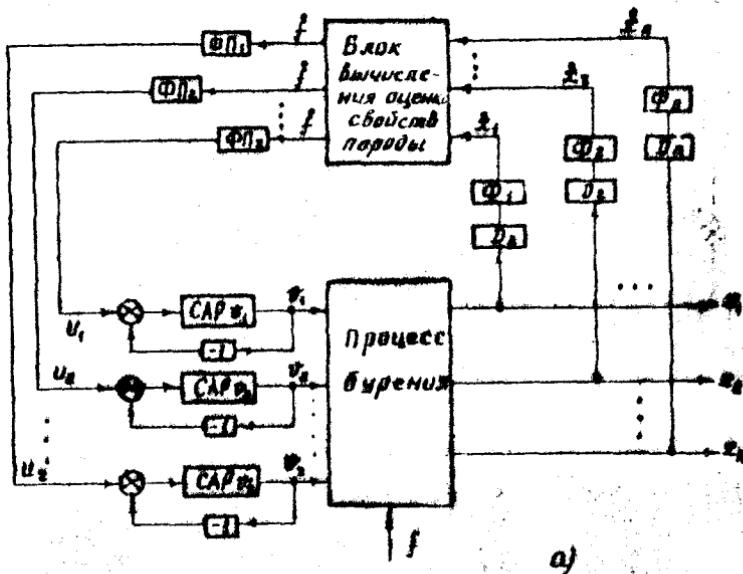


Рис. 1



а)

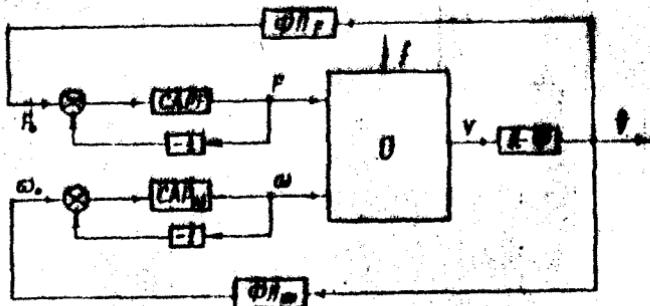
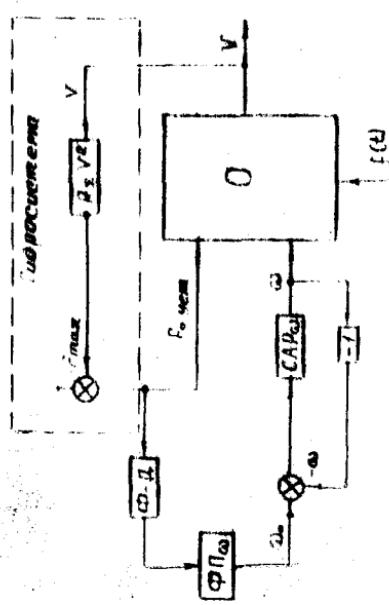
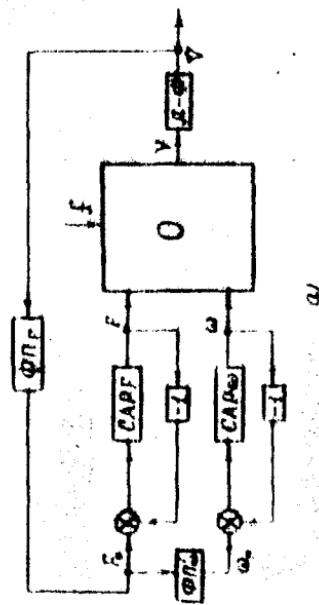
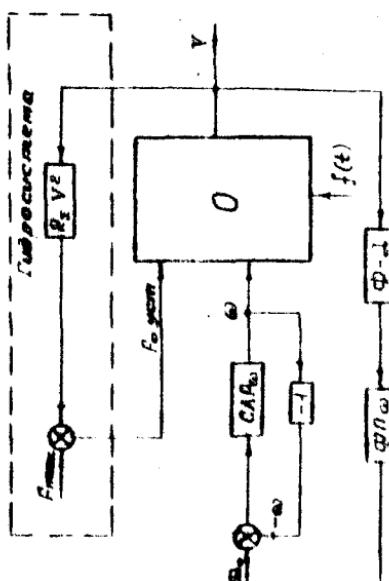
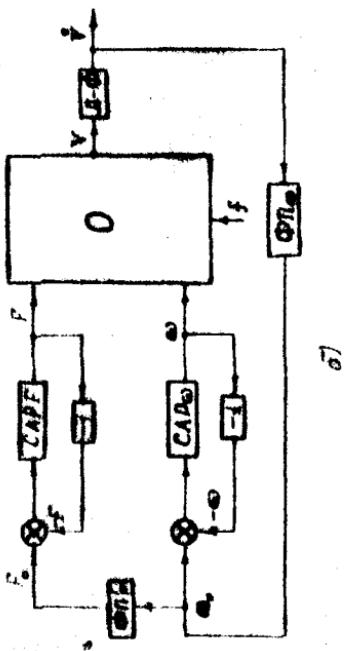


Рис. 2

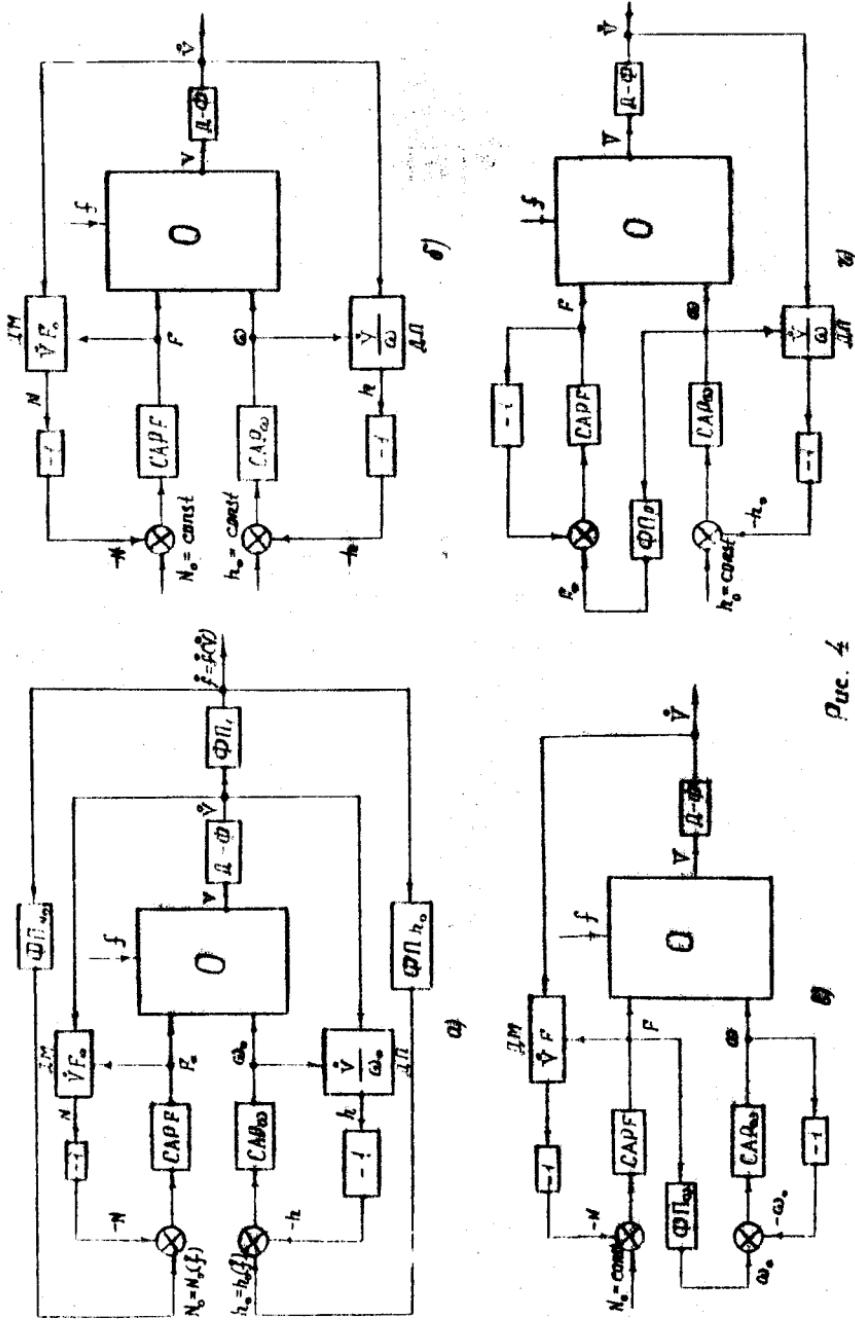


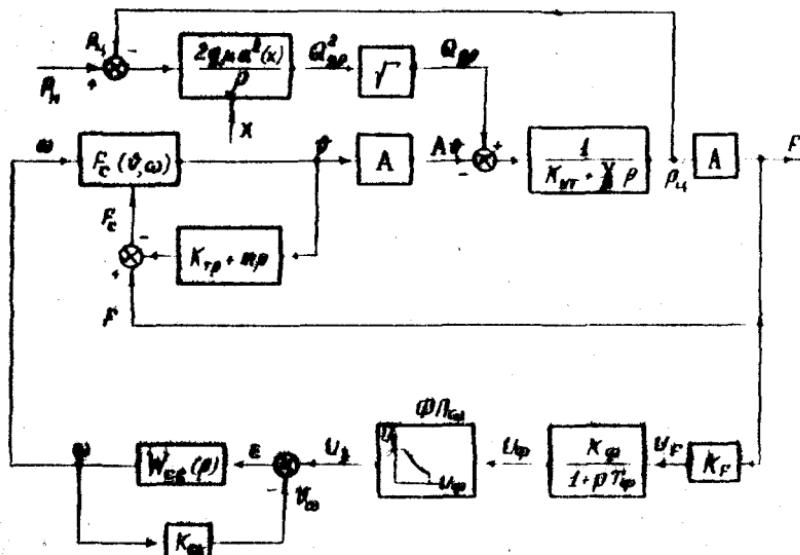
9 UC. 3

2)

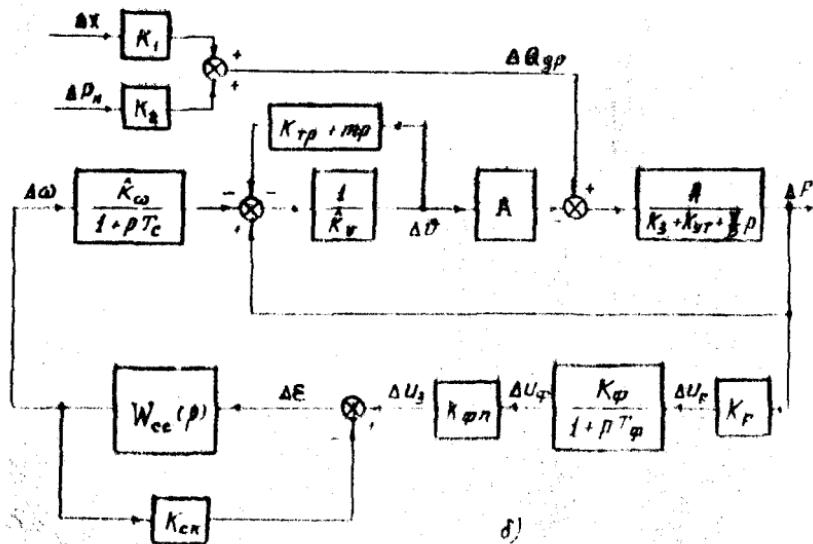
6)

Рис. 4





a)



b)

FIG. 5

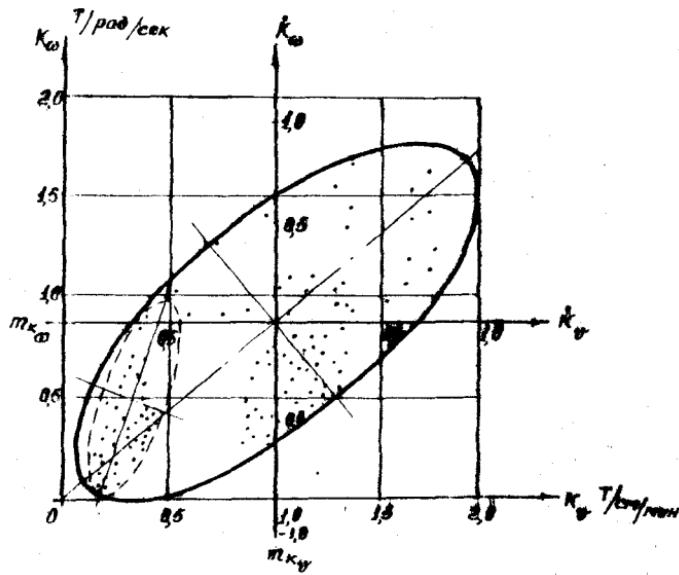


Рис. 6.

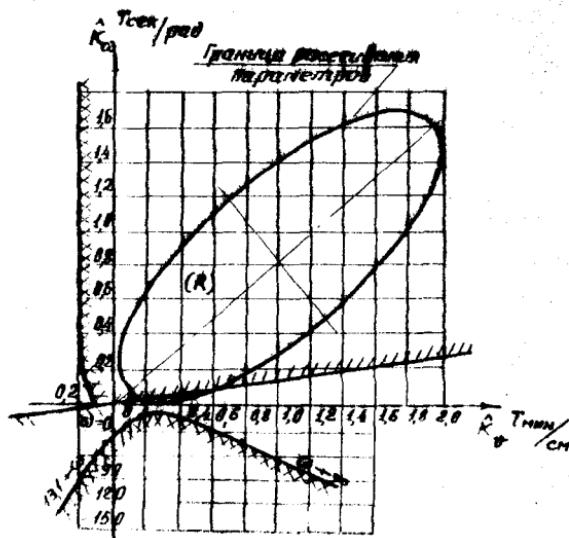
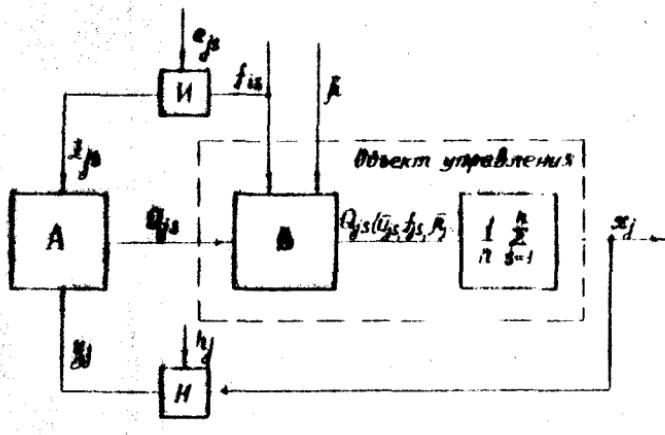
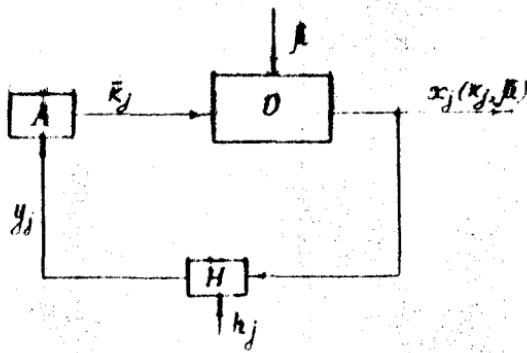


Рис. 7

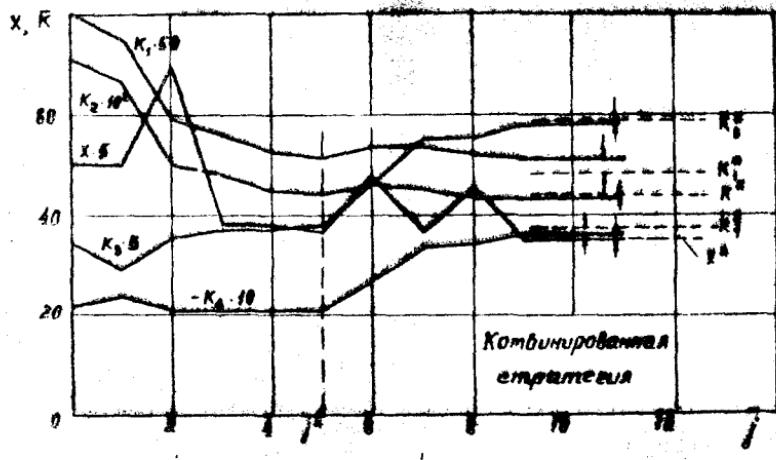


a)

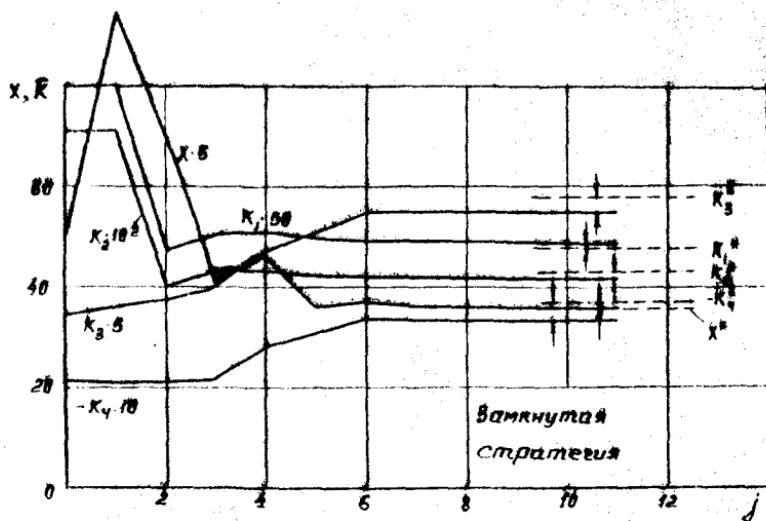


b)

Рис. 8



(a)



(b)

Рис. 9

$$\bar{\mu}_c = (14.6; -2.42; -17.3; 0.75; 1.25; -1.07; 5.85)^T; \frac{A\bar{\mu}}{\bar{\mu}^2} = 25\%.$$