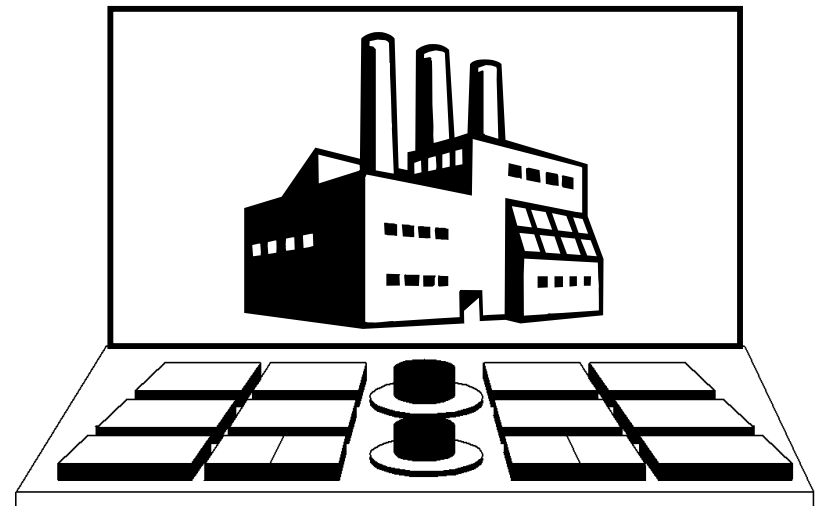


Ульшин В.А., Зубов Д.А.

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ**



Луганск 2002

Наукове видання

УЛЬШИН Віталій Олександрович
ЗУБОВ Дмитро Анатолійович

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Редактор	І.О.Морозова
Техн. редактор	Т.М.Дрогозов
Оригінал-макет	Д.А.Зубов

Підписано до друку . . .
Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. др. 12,2. Обл. вид. арк. 13,5.
Тираж 300 прим. Вид № . Замов. № . Ціна договірна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
91034, м.Луганськ, кв.Молодіжний, 20а

Адреса редакції: 91034, м.Луганськ, кв.Молодіжний, 20а
Телефон: 8(0642) 46-13-04. **Факс:** 8(0642) 46-13-64
E-mail: uni@snu.edu.ua
<http://snu.edu.ua>

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

Ульшин В.А., Зубов Д.А.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ

Луганск 2002

УДК 62-503.57
ББК 32.965.5
У 515

Затверджено Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Відповідальний редактор:

Зубов Д.А., кандидат технічних наук, доцент кафедри
“Комп’ютеризовані системи” Східноукраїнського
національного університету імені Володимира Даля

Рецензенти:

Спори́хін В.Я., доктор технічних наук, професор
кафедри “Автоматизовані системи керування”
Донецького національного технічного університету

Силаєв В.І., доктор технічних наук, професор
кафедри “Менеджмент у виробничій сфері”
Донецької державної академії управління

Коробецький Ю.П., доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри “Автоматика та системи керування”
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Ульшин В.О., Зубов Д.А.

У 515 **Адаптивне керування технологічними процесами:** Моно-
графія. – Луганськ: вид-во СНУ, 2002. -210 с.

ISBN

У монографії розглядається питання синтезу адаптивних систем керування складними об’єктами на прикладі гірничої промисловості. Розроблена автоматизована система керування, яка забезпечує автоматичне функціонування виробництва в оптимальних режимах. Використання розроблених адаптивних методів дуального керування з мінімальною апіорною інформацією дозволяє значно зменшити час розробки за рахунок зниження витрат на дослідження об’єктів керування.

Для працівників наукових та виробничих установ, викладачів, аспірантів та студентів.

УДК 62-503.57

ББК 32.965.5

ISBN

©Ульшин В.О., Зубов Д.А.

©Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля, 2002

4.3.Синтез нелинейных адаптивных регуляторов.....97

**Раздел 5.Методы построения промышленных адаптивных
систем управления процессами..... 110**

5.1.Рекомендации по выбору алгоритмов управления.....110

5.2.Управление системой горных машин при
добыче угля..... 110

5.3.Управление процессами обогащения..... 117

5.4.Адаптивное управление с переменной стратегией..... 134

Раздел 6. Промышленные системы адаптивного управления....143

6.1.Адаптивное управление процессом сушки
концентрата..... 143

6.2.Цифровое управление процессом сушки..... 158

6.3.Адаптивное управление паровой трубчатой
сушилкой..... 165

6.4.Адаптивное управление процессом флотации угля..... 167

6.5.Система автоматического управления процессами
сгущения шламов и осветления отходов флотации..... 177

6.6.Автоматическое управление режимами работы
горных машин..... 187

6.7.Автоматическое управление гравитационными
процессами обогащения.....195

Заклучение.....203

Литература..... 204

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Раздел 1. Технологические процессы как объекты автоматического управления (на примере угольной промышленности).....	6
1.1. Анализ функционирования процессов добычи угля.....	6
1.2. Процессы обогащения угля.....	10
1.3. Требования к быстрдействию в точности управления.....	15
1.4. Анализ динамических свойств объектов управления....	18
1.5. Анализ возмущающих воздействий.....	21
1.6. Восстановление плотности вероятностей процессов.....	28
1.7. Область применения адаптивных систем управления....	33
Раздел 2. Адаптивная идентификация параметров возмущающих воздействий.....	38
2.1. Алгоритмы идентификации.....	38
2.2. Исследования алгоритмов идентификации параметров смесей.....	45
2.3. Адаптивные идентификаторы возмущающих воздействий.....	49
2.4. Оценка среднего значения параметров.....	55
Раздел 3. Адаптивное управление процессами при контролируемых возмущающих воздействиях.....	58
3.1. Анализ возможных методов управления технологическими процессами добычи и обогащения угля.....	58
3.2. Постановка задачи управления.....	61
3.3. Адаптивные алгоритмы дуального управления.....	64
3.4. Адаптивные системы дуального управления.....	71
3.5. Генерирование импульсов с заданной вероятностью.....	76
3.6. Исследования адаптивных систем дуального управления.....	78
3.7. Оценка качества вероятностных алгоритмов управления.....	81
Раздел 4. Адаптивное управление процессами при неконтролируемых возмущающих воздействиях.....	84
4.1. Идентификация коэффициента усиления объекта.....	84
4.2. Нелинейные адаптивные регуляторы.....	85

ВВЕДЕНИЕ

Уголь как энергоноситель играет важную роль в энергетике Украины, однако его подземная добыча и переработка непрерывно усложняются. Рассматриваемые процессы характеризуются значительной мощностью потоков материалов и энергии, высокой стоимостью товарных продуктов, поэтому неполное использование возможностей машин и оборудования приводит к значительному экономическому ущербу.

Одним из основных направлений развития угольной промышленности является создание автоматизированных процессов и производств, обеспечивающих оптимизацию их функционирования в непрерывно изменяющихся условиях.

В настоящее время подавляющее большинство комплексов и установок шахт и обогатительных фабрик в той или иной степени автоматизированы. Значение автоматизации технологических процессов добычи и обогащения угля непрерывно возрастает, что объясняется весьма высокой ее эффективностью, обусловленной специфическими особенностями горного производства:

- ростом экономического ущерба от неоптимального использования горной техники, ее простоев и потерь полезных продуктов с отходами;
- невозможностью оперативной обработки информации о ходе производственных процессов при их ручном управлении, приводящей к потере ее ценности, полноты и достоверности;
- значительным экономическим потерям из-за аварий оборудования, задействованного в производственном процессе взаимосвязанных машин;
- высокой стоимостью поступающего на обогащение угля;
- зависимостью эффективности работы оборудования от субъективных качеств обслуживающего персонала.

В связи с этим автоматизация технологических процессов добычи и переработки угля приобретает все возрастающее значение, так как она призвана обеспечить повышение производительности, улучшение качества продукции, снижение потерь угля с отходами, решить проблемы эргономические и повышения безопасности, снижения трудоемкости в улучшения условий труда, а также повышение его престижа и интеллектуального содержания. Без автоматизации невозможно решить проблему выемки и переработки угля без постоянного присутствия людей.

Процессы горного производства отличаются по своей природе и характеру протекания, поэтому разработка систем автоматического управления для конкретных процессов требует значительный объем исследований, направленных на выявление динамических характеристик и параметров возмущающих воздействий. Это затрудняет общий подход с единых позиций к управлению указанными объектами и требует многократного проведения исследований по определению их характеристик как объектов автоматического управления, что обуславливает необходимость создания соответствующих технических решений. Указанные обстоятельства увеличивают сроки и затраты на разработку промышленных систем и технических средств автоматизации. Следовательно, научная проблема, связанная с исследованиями и обобщением динамических свойств процессов и их возмущающих воздействий, разработкой унифицированных алгоритмов и методов построения систем автоматического управления ими и созданием на этой основе промышленной аппаратуры является весьма актуальной.

Книга посвящена исследованиям и обобщению вероятностных характеристик возмущающих воздействий и динамических параметров процессов горного производства, разработке унифицированных алгоритмов и методов построения систем автоматического управления ими и созданию промышленных систем и технических средств автоматизации, реализующих эти алгоритмы на примере очистных комбайнов и процессов обогащения угля.

В основу исследований положена идея использования адаптивных систем автоматического управления процессами горного производства на основе теории дуального управления и алгоритмов стохастической аппроксимации по критерию минимума среднего риска с автоматической идентификацией параметров объектов и возмущающих воздействий по наблюдениям при наличии шумов измерения с неизвестными вероятностными характеристиками.

В книге обобщены результаты исследований по созданию адаптивных систем управления и технических средств автоматизации, выполненных в Восточноукраинском национальном университете и институте НИПИУглеавтоматизация. Приведены новые результаты в части:

- установления закономерностей формирования возмущающих воздействий процессов горного производства как смесей распределений, имеющих стохастический нестационарный характер с переменным временем корреляции;
- выявления общих свойств динамических характеристик некоторых процессов, заключающихся в аппроксимации их апериодическими или колебательными звеньями с чистым запаздыванием и в изменении

48. Ульшин В.А., Бардамид В.И., Павлюченко С.Г. Промышленные испытания аппаратуры автоматизации сушильных установок// Кокс и химия. – 1980. – № 4. – С.37-39.

49. Бардамид В.И., Полетаев А.В., Симонов Г.В., Ульшин В.А., Черкасов В.М. Аппаратура автоматизации процесса сушки угля в паровой трубчатой сушилке// Автоматизация и связь на угольных предприятиях. Сб. науч. тр. ин-та Гипроуглеавтоматизация. – М., 1991. – С.144-159.

50. Ульшин В.А. и др. Промышленные испытания комплекса автоматизированного управления процессом флотации угля// Кокс и химия. – 1990. – № 8. – С.33-35.

51. Ульшин В.А., Новиков Е.П., Безверхий Е.А. Промышленные испытания устройства контроля зольности углей в потоке УЗПИ// Уголь Украины. – 1988. – № 8. – С.42-43.

52. Ульшин В.А., Панин А.В., Сытников М.Е. Устройство контроля зольности отходов флотации// Уголь Украины. – 1987. – № 1. – С.42-43.

ных фабриках. – Свердловск: СГИ им.Вахрушева, 1970. – Вып. 68. – С.71-80.

31.Гурецкий Х. Анализ и синтез систем с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

32.Уланов М.Г. Регулирование по возмущению. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 109 с.

33.Ивахненко А.Г. Кибернетические системы с комбинированным управлением. К.: Техніка, 1965. – 214 с.

34.Потапова Т.П. Об одной задаче управления линейной динамической системой при наличии неизмеряемого возмущения// Кибернетика и вычислительная техника. – 1983. – Вып. 60. – С.22-27.

35.Оуэн Т. Теория игр. – М.: Мир, 1971. 230 с.

36.Бахан Г.М. Фильтрация в условиях нестатически заданной неопределённости// Автоматика. – 1980. – № 2. – С.13-21.

37.Фельдбаум А.А. Теория дуального управления// Автоматика и телемеханика. – 1960. – № 9. – С.1240-1249.

38.Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 624 с.

39.Расстригин Л.А., Рика К.К. Автоматная теория случайного поиска. – Рига: Зинатне, 1973. – 344 с.

40.Ивахненко А.Г. Условия абсолютной инвариантности и устойчивости обучающихся систем с вероятностными связями// Автоматика. – 1968. – № 1. – С.3-9.

41.Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. – К.: Техніка, 1969. – 382 с.

42.Бобнев М.П. Генерирование случайных сигналов. – М.: Энергия, 1971. – 240 с.

43.Иванова В.М. Случайные числа и их применение. – М.: Финансы и статистика, 1971. – 240 с.

44.Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384с.

45.Солодовников В.В., Филимонов А.Б. Конструирование регуляторов для объектов с запаздыванием// Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С.168-177.

46.Зенцев В.Н., Ковалева А.И., Ульшин В.А. Автоматическая оптимизация комплекса процессов обогащения угля// Системы автоматизации, средства автоматики и связи для угольных предприятий: Сб. науч. тр. ин-та Гипроуглеавтоматизация. – М., 1990. – С.124-137.

47.Ульшин В.А., Меняйленко А.С., Бардамид В.И. Математическая модель горения топлива в слоевой топке. Её использование на ЭЦВМ// Кокс и химия. – 1985. – № 8. – С.12-14.

коэффициента усиления, постоянной времени и чистого запаздывания в процессе их функционирования;

- обоснования общих требований к системам автоматического управления процессами горного производства и критерия управления по минимуму среднего риска;

- разработки адаптивных алгоритмов и новых методов идентификации возмущающих воздействий как смесей распределений различных классов случайных процессов по наблюдениям и принципов построения различных идентификаторов;

- разработки алгоритмов и новых методов построения адаптивных систем субоптимального управления с использованием случайной, смешанной, регулярной и переменной стратегий, позволяющих управлять различными процессами при неизвестных характеристиках шумов измерения и параметров объектов;

- разработки новых принципов построения промышленных систем автоматического управления процессами выемки и обогащения угля, реализованных на практике.

Разработанные методы и алгоритмы могут быть использованы при создании промышленных систем для других объектов, обладающих аналогичными свойствами.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК
ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ)**

Процессы добычи и переработки угля относятся к классу дискретно-непрерывных производств, поэтому на шахтах и обогатительных фабриках применяются как дискретное логическое управление, так и непрерывное автоматическое регулирование технологических процессов. Первые, как правило, обеспечивают включение и выключение технологического оборудования в работу в заданной последовательности, осуществляют автоматическую блокировку, сигнализацию и другие функции в соответствии с алгоритмами управления, описанными обычно булевыми функциями.

Непрерывное управление используется для автоматического регулирования режимов работы технологического оборудования шахт и обогатительных фабрик, уровней сыпучих и жидких продуктов в бункерах и других емкостях, положение очистных механизированных комплексов и проходческих комбайнов в пространстве и др. В дальнейшем рассматривается только класс объектов, для которых требуется непрерывное регулирование, с целью выявления объектов, для управления которыми целесообразно использовать адаптивные методы. Для этого необходим анализ функционирования основных процессов добычи и обогащения угля и исследования их динамических свойств и возмущающих воздействий. Как известно, адаптивные методы автоматического управления эффективны в случаях, когда параметры объектов изменяются в достаточно широком диапазоне, к точности и быстродействию систем управления предъявляются достаточно жесткие требования и др. Поэтому не для всех объектов целесообразно создавать системы адаптивного управления, имеющие более сложные алгоритмы и структуры. Ниже рассматриваются наиболее важные объекты шахт и обогатительных фабрик.

1.1. Анализ функционирования процессов добычи угля

Наиболее важными и сложными объектами управления на шахтах являются процессы выемки угля из очистных забоев шахт и проходки подготовительных выработок. Поэтому рассмотрим только указанные процессы. Причем целесообразно рассматривать лишь механизирован-

14. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. 320 с.
15. Ченцов Н.Н. Оценка неизвестной плотности распределения по наблюдениям. – М.: ДАН СССР, 1962. – т.147. – № 1. – С.45.
16. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
17. Васильев В.И. Распознающие системы. Справочник. – К.: Наукова думка, 1983. – 424 с.
18. Дорофеюк А.А. Алгоритмы автоматической классификации// Автоматика и телемеханика. – 1971. - № 12. – С.78-113.
19. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
20. Меняйленко А.С., Ульшин В.А. Исследование устройства идентификации параметров смеси угольного концентрата, поступающего на процесс сушки// Аппаратура шахтной автоматики и связи: Сб.науч. тр. ин-та Гипроуглеавтоматизация. -М., 1988. - С.77-90.
21. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 576 с.
22. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
23. А.с. 1327067 СССР, МКИ 4GB23/02. Устройство для идентификации параметров возмущающих воздействий/ А.С.Меняйленко, В.А.Ульшин (СССР). - № 3930458/24-24; заявл. 12.07.85; опубл. 30.07.87; бюлл. 28.
24. Шаталов А.С. Структурные методы в теории управления и элетроавтоматике. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – С.347-349.
25. Солодовников В.В. Теория автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1967. – Кн.2. – С.317-318.
26. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974. – 270 с.
27. Казаков Е.И. Статистическая динамика систем с переменной структурой. – М.: Недра, 1974. – 416 с.
28. Солодов А.В., Солодова Е.А. Системы с переменным запаздыванием. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
29. Ицкович Э.Л. О построении схемы регулирования для объекта с чистым запаздыванием// Автоматика и телемеханика, 1969. № 8. – С.1047-1055.
30. Лукас В.А., Барановский В.П. О предельных возможностях систем автоматической оптимизации при стационарных случайных возмущениях// Автоматизация технологических процессов на обогатитель-

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульшин В.А. Автоматизация угледобывающих машин. – К.: Техніка, 1974. – 188 с.
2. Ульшин В.А. Основные принципы разработки автоматизированной системы управления углеобогачительной фабрики// Уголь. – 1974. - № 2. С.39-44.
3. Ульшин В.А. Концепция развития автоматизации обогащательных фабрик// Уголь Украины. - 1993. - № 11. - С.40-43.
4. Ульшин В.А. и др. Опыт разработки и внедрения АСУТП ЦОФ “Свердловская” ПО “Ворошиловградуглеобогащение”. - М.: ЦНИЭИ Уголь. - 1986. - С.44.
5. Ульшин В.А., Рамазанов С.К. Критерий эколого-экономического управления технологическими процессами углеобогащения// Уголь Украины. - 1995. - №7. – С.27-29.
6. Ульшин В.А. и др. Контроль и управление экологической ситуацией на углеобогащательных фабриках// Уголь Украины. - 1994. - № 2. - С.8-10.
7. Автоматизация производства на углеобогащательных фабриках/ Л.Г.Мелькумов, В.А.Ульшин и др. - М.: Недра, 1983. - С.296.
8. Синепольский В.С. Разработка и исследование системы экстремального регулирования для автоматической оптимизации процессов углеобогащения. – Канд.дис. – Дн-ск: ДГИ, 1978.
9. Власов К.П. Основы автоматического управления технологическими процессами обогащения угля. – М.: Недра, 1985. – 188 с.
10. Ульшин В.А. и др. Промышленные испытания аппаратуры автоматизации сушильных установок// Кокс и химия. - 1990. - № 4. - С.39-42.
11. Дурницкая Н.И., Меняйленко А.С., Ульшин В.А. Разработка и исследование системы прямого цифрового регулирования процессами сушки и горения угля// Управление произв. процессами на шахтах, разрезах и углеобогащательных фабриках: Сб. науч. тр. ин-та Гипроуглеавтоматизация. - М., 1989. - С.107-114.
12. Шупов Л.П. Математические модели усреднения. – М.: Недра, 1978. – 288 с.
13. Ульшин В.А., Зубов Д.А. Автоматизированное проектирование адаптивных регуляторов для нестационарных промышленных объектов с большим запаздыванием// Вестник ВУГУ. Серия Транспорт. - 1996. - С.205-217.

ную выемку угля с использованием комплексов и проходку подготовительных выработок проходческими комбайнами.

Добыча угля из очистных забоев шахт за планируемое время (смену, сутки и т.п.) зависит от вида применяемой техники, степени ее использования, организации работ, горно-геологических условий и других факторов. Одним из основных показателей эффективности работы очистного забоя является эксплуатационная производительность выемочной машины, в наибольшей мере зависящая от времени ее производительной работы (машинного времени) и текущей производительности. Поэтому в качестве критерия управления процессом выемки угля из очистных забоев может быть принята эксплуатационная производительность выемочной машины за планируемый период времени (смена, сутки и т.п.). Целью управления является максимизация этого критерия.

Время производительной работы выемочной машины определяется ее надежностью, принятой организацией работы в забое, степенью совершенства используемой горной техники. Определяющим фактором при этом является надежность.

Текущая скорость подачи выемочной машины определяется горнотехническими условиями и характеристиками привода и может ограничиваться в общем случае при достижении опасной концентрации метана в лаве, недостаточными опрокидными моментами или мощностями приводов конвейера и выемочной машины, производительностью конвейера и др. Известно, что основные режимные параметры выемочных машин имеют случайный характер, а их измерения содержат шумы с неизвестными вероятностными характеристиками [1]. В этих условиях целесообразно максимизировать функционал $J(v_n, T_m)$, определяемый как оценка математического ожидания (эмпирическое среднее) производительности выемочной машины:

$$J(v_n, T_m) = \sup M \left\{ m_y b_y p_y \int_0^{T_m} v_n(t) dt \right\}; \quad (1.1)$$

$$T_m = \sum_{i=1}^n \Delta t_i; \Delta t_i \in T_m,$$

где v_n - скорость подачи выемочной машины;
 T_m - машинное время;
 m_y, b_y, p_y - соответственно мощность угольного пласта, ширина захвата и плотность угля в массиве;
 Δt_i - длительность производительной работы выемочной машины на i -м интервале;
 n - количество интервалов;
 M - оператор математического ожидания.

Функционал (1.1) увеличивается пропорционально машинному времени и нелинейно зависит от текущей скорости подачи с тенденцией замедления роста, т.е. производительность выемочной машины в большей степени зависит от машинного времени (надежности выемочной машины), чем от ее текущей скорости подачи. На рис.1.1 приведен график зависимости суточной производительности очистного забоя шахты от скорости подачи автоматизированного очистного комбайна 2К-52 по данным его эксплуатации на шахтах № 1 «Великомостовская», № 2 «Великомостовская», № 3 «Дарьевская», «Лутугинская-Северная» и «Чайкино-Глубокая», подтверждающий высказанное положение. Машинное время выемочной машины зависит от ее надежности, а последняя от величин динамических и статических нагрузок на ее узлы. Это приводит к требованию снижения динамической нагруженности машины и ограничения статических перегрузок, т.е. необходимости минимизации дисперсии нагрузок и стабилизации их средних значений.

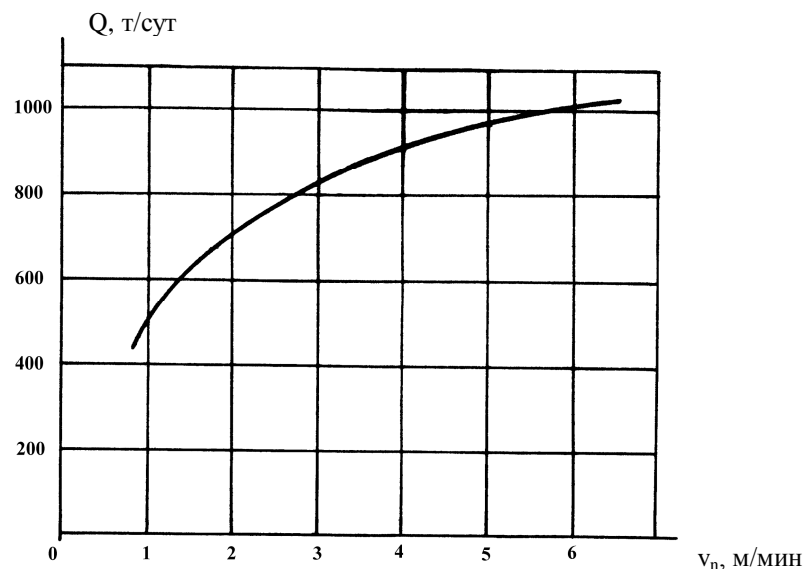


Рис. 1.1. Зависимость производительности автоматизированного комбайна 2К-52 от скорости подачи по данным шахт: №1 и №2 «Великомостовская», №3 «Дарьевская», «Лутугинская-Северная», «Чайкино-Глубокая»

Эти требования могут быть удовлетворены при использовании регулируемого привода как механизма резания, так и механизма подачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема создания эффективных промышленных систем автоматического управления режимами работы горных машин решается на основе следующих основных результатов:

1. Разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами, обеспечивающих автоматическое функционирование производства в оптимальных режимах.

2. Использование разработанных адаптивных методов дуального управления с минимальной априорной информацией об объекте управления, позволяющих значительно сократить сроки разработки за счёт снижения затрат на исследование объектов управления.

3. Разработка унифицированных алгоритмов адаптивного управления объектами с различными свойствами, наиболее эффективно реализуемыми на ЭВМ.

4. Разработка унифицированных технических модулей, позволяющих создавать автоматические системы для рассмотренных объектов шахт и обогащительных фабрик.

Перспективными направлениями исследований для дальнейшего развития адаптивных систем управления режимами работы горных машин являются:

1. Разработка методов синтеза адаптивных систем управления при наличии произвольного количества ограничений с чистым запаздыванием в каналах измерения.

2. Решение задачи синтеза нелинейных звеньев адаптивных регуляторов в зависимости от характера нелинейностей объектов управления.

3. Разработка адаптивных методов выбора и коррекции параметров адаптивных систем управления в процессе их функционирования при изменении характеристик объектов управления и возмущающих воздействий.

P, сигнал датчика сравнивается в РМК с заданием P^* и в случае $P > P^*$ посредством исполнительного механизма ИМ₄ открывается клапан Кл₄, и выпускается лишний воздух в атмосферу.

В случае работы аппаратуры в режиме стабилизации или оптимизации используется сигнал датчика зольности A_{κ}^d . При отклонении зольности концентрата от задания A_{κ}^{d*} РМК вырабатывает сигнал, приводящий к ступенчатому изменению задания высоты отсадочной постели, после чего контур стабилизации высоты постели отрабатывает возникшее рассогласование. Частота следования корректирующих импульсов определяется временем чистого запаздывания сигнала о зольности и временем переходных процессов в отсадочной машине. Датчик ДР обеспечивает контроль условий работоспособности датчика зольности. Регулирование расхода воды осуществляется при помощи заслонки З, управляемой исполнительным механизмом ИМ₅.

При монтаже аппаратуры в различных условиях установить датчик зольности концентрата в непосредственной близости от отсадочной машины проблематично, поэтому потребуется индивидуальная настройка системы в соответствии с временем чистого запаздывания сигнала от золомера. В этой аппаратуре для управления зольностью концентрата более предпочтительно использование адаптивного регулятора с исчезающей во времени обратной связью.

При этом представляется возможность обеспечить постоянство толщины угольной стружки, причем в различных условиях соотношение скоростей подачи и резания может изменяться. Например, путем изменения передаточного отношения редуктора режущей части или частоты источника питания.

Такое решение в значительной мере снижает актуальность задачи предотвращения перегрузок привода, однако не исключает необходимости управления текущей производительностью выемочных машин. При этом главной задачей становится не защита от перегрузок привода выемочной машины, а управление скоростью подачи как главной управляемой координатой при возникновении ограничений или необходимости ее варьирования по технологическим или организационным причинам.

Алгоритм оперативного управления выемочной машиной может быть представлен как стабилизация заданной скорости подачи при отсутствии ограничений или максимизации текущей скорости подачи при их наличии:

$$v_n(t) = \begin{cases} v_n^*; Q_1(t) < Q_1^*; Q_2(t) < Q_2^*; Q_3(t) < Q_3^*; c_r(t) < c_r^*; q_k(t) < q_k^*; h_y(t) < h_y^*; \\ \inf V_n; [Q_1(t) = Q_1^*] \wedge [Q_2(t) = Q_2^*] \wedge [Q_3(t) = Q_3^*] \wedge [c_r(t) = c_r^*] \wedge \\ \wedge [q_k(t) = q_k^*] \wedge [h_y(t) = h_y^*]; \\ 0; [Q_1(t) > Q_1^*] \wedge [Q_2(t) > Q_2^*] \wedge [Q_3(t) > Q_3^*] \wedge [c_r(t) = c_r^*] \wedge \\ \wedge [q_k(t) > q_k^*] \wedge [h_y(t) > h_y^*]; \end{cases}$$

$$v_{n\max} \geq v_n^* \geq 0, \quad (1.2)$$

где $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$ - соответственно нагрузки привода комбайна, первого и второго приводов конвейера;
 $c_r(t)$ - текущая концентрация метана в призабойном пространстве;
 $q_k(t)$ - производительность забойного конвейера;
 $h_y(t)$ - высота слоя угля на конвейере;
 c_r^* , v_n^* , Q_1^* , Q_2^* , Q_3^* , q_k^* , h_y^* - заданные (допустимые) значения соответствующих параметров;
 $v_{n\max}$ - максимальная скорость подачи.

Следовательно, при отсутствии ограничений система автоматического управления режимом работы выемочной машины должна стабилизировать заданную скорость подачи или поддерживать максимально допустимую скорость подачи при действии любого из ограничений. При этом система автоматического управления должна адаптивно переходить в режим стабилизации параметра наиболее жесткого ограничения и как частный случай, характерный для машин с ограниченными опрокидным моментом или мощностью привода, к стабилизации нагрузки привода.

Приведенные алгоритм и система управления обеспечивают также максимизацию текущей производительности выемочной машины. Для этого необходимо установить заданную скорость подачи, равную максимально возможной ($v_n^* = v_{n \max}$).

Могут быть использованы и другие критерии управления режимами работы выемочных машин, но любой из них приводит к необходимости стабилизации одного или нескольких режимных параметров. В связи с наличием шумов измерения, проникающих в систему управления через первичные преобразователи параметров, критерием управления в таких случаях следует выбирать средний риск:

$$R(t) = M\{W(t)\}, \quad (1.3)$$

где $W(t)$ – удельная функция потерь.

Целью управления в этом случае является минимизация среднего риска.

В случае проходки подготовительных выработок скорость подачи комбайна является непосредственной характеристикой его производительности, поэтому критерий управления фактически совпадает с рассмотренным для случая выемки угля из очистных забоев. Отличительными особенностями в этом случае могут быть только действия других ограничений, например, отсутствие ограничений по перегрузке приводов забойного конвейера и др. Однако аналогичную роль могут играть приводы вспомогательных приводов проходческого комбайна, например, бермовых фрез, перегружателя и т.п.

В качестве критерия управления отдельным режимным параметрам также целесообразно использовать средний риск.

1.2. Процессы обогащения угля

Наиболее важными и сложными процессами обогатительных фабрик являются обогащение угля различных машинных классов в отсадочных и флотационных машинах, в тяжелосредних сепараторах и гидроциклонах.

В общем случае процесс обогащения угля может быть представлен как преобразование входного потока рядового угля в выходной поток товарных продуктов и отходов:

$$Y = L\{X, V, Z\};$$

$$A_{\kappa \min}^{d*} \leq A_{\kappa}^d(t) \leq A_{\kappa \max}^{d*}; A_0^d(t) \geq A_0^{d*}, \quad (1.4)$$

где X – вектор входных характеристик рядового угля;

V – вектор управляющих воздействий;

Z – вектор возмущающих воздействий;

тельных механизмов, регулирующих скорость нисходящего потока жидкости и расхода подрешетной воды, фрагментов колебательного цикла; 9) двухстороннюю связь с АСУ ОФ (ввод-вывод информации).

Аппаратура может работать в режимах стабилизации зольности концентрата и в режиме оптимизации по критерию максимального выхода концентрата экономически целесообразного качества.

Аппаратура содержит пульт оператора, панель преобразователей, регулирующий микроконтроллер Ремиконт-Р120, три датчика высоты отсадочной постели H_1 – H_3 , три тиристорных электропривода $П_{р1}$ – $П_{р3}$ с электродвигателями постоянного тока, три датчика скорости восходящего потока разделительной жидкости R_1 – R_3 , 5 блоков исполнительных механизмов $ИМ_1$ – $ИМ_5$, 4 регулирующих клапана сжатого воздуха $Кл_1$ – $Кл_4$, регулирующую заслонку 3 и датчик наличия нагрузки по исходному углю ДН.

Аппаратура выполнена по модульному принципу. В качестве автономных подсистем регулирования могут применяться регуляторы разгрузки и регуляторы разгрузки совместно с регуляторами разрыхленности.

Регулирование высоты отсадочной постели производится следующим образом. Высота постели измеряется датчиками H_1 , H_2 и H_3 соответственно в каждом отделении машины. Сигналы с этих датчиков поступают в регулирующий микроконтроллер РМК, где сравниваются с сигналами задатчиков H_1^* , H_2^* и H_3^* . В случае отклонения текущего и заданного значений высоты постели регулятора РМК вырабатывают управляющие сигналы, воздействующие через приводы $ПР_1$, $ПР_2$ и $ПР_3$ на электродвигатели разгрузчиков P_1 , P_2 и P_3 . В аппаратуре предусмотрен датчик наличия нагрузки ДН по исходному углю, подающий сигнал прекращения работы разгрузчиков во избежание скачивания постели.

Разрыхленность постели измеряется как максимальная скорость восходящего потока разделительной жидкости посредством датчиков R_1 , R_2 и R_3 . В РМК сигналы датчиков сравниваются с сигналами задатчиков разрыхленности R_1^* , R_2^* и R_3^* в случае их неравенства регуляторы РМК посредством исполнительных механизмов $ИМ_1$, $ИМ_2$ и $ИМ_3$ изменяют положение клапанов $Кл_1$, $Кл_2$, $Кл_3$, подающих воздух из ресивера P , что приводит к изменению скорости восходящего потока. В составе аппаратуры применен автономный блок БУК управления параметрами колебательного цикла (длительность впуска-выпуска и пауз), обеспечивающий необходимую диаграмму работы машины путем включения и отключения электромагнитных клапанов $ЭМ_1$, $ЭМ_2$ и $ЭМ_3$.

При необходимости обеспечивается автоматическая стабилизация давления сжатого воздуха в ресивере P . Давление измеряется датчиком

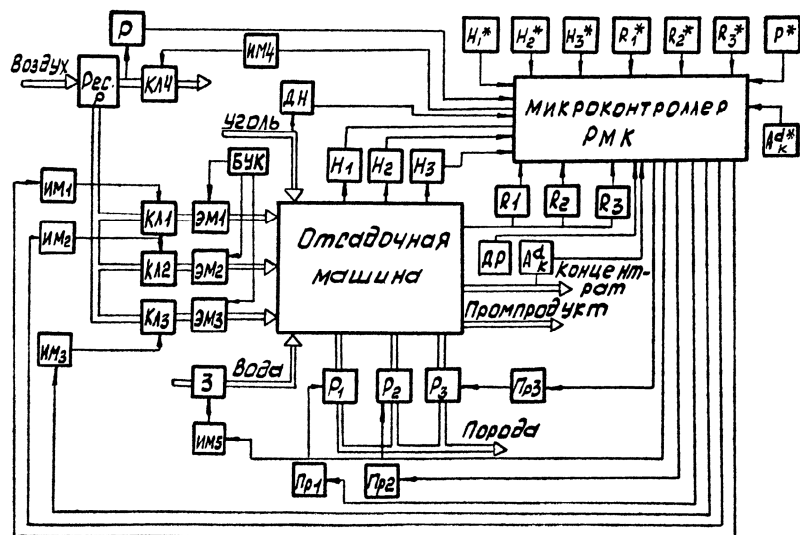


Рис. 6.16. Функциональная схема аппаратуры ОКА.2

Аппаратура выполняет следующие основные функции: 1) автоматическое управление процессом отсадки по зольности концентрата в режимах стабилизации или оптимизации по критерию прибыли; 2) автоматическую стабилизацию высоты и разрыхленности отсадочной постели, давления сжатого воздуха в ресивере и дистанционное регулирование высоты и разрыхленности отсадочной постели, скорости нисходящего потока разделительной жидкости и расхода подрешетной воды; 3) автоматический контроль достоверности информации о зольности и блокировка системы управления качеством при нарушении этих условий (контроль заклинивания роторного разгрузчика, работы блока управления колебаниями, наличия нагрузки по исходному углю и технологические блокировки при ее исчезновении); 4) местное управление механизмами комплекса (пуск-останов); 5) управление параметрами колебательного цикла (длительность впуска, выпуска воздуха, паузы); 6) автодиагностику канала отбора информации; 7) автоматический ввод резервного блока управления колебаниями; 8) индикацию текущих и заданных значений высоты постели, максимальной скорости восходящего потока зольности концентрата, текущих значений скорости разгрузчика тяжелых фракций (по вызову), положения заслонки подачи сжатого воздуха, оптимального значения зольности концентрата, положения исполни-

Y - вектор выходных характеристик продуктов обогащения;
 $A_k^d(t)$, $A_{k \min}^{d*}$, $A_{k \max}^{d*}$ - зольность концентрата текущая и заданные минимальная и максимальная;
 $A_0^d(t)$, A_0^{d*} - зольность отходов текущая и заданная;
 L - оператор преобразования.

Причем могут иметь место два наиболее часто встречающихся случая: раздельное обогащение каждого машинного класса с последующим смешиванием и раздельное обогащение и выпуск товарных продуктов каждого класса для реализации (например, антрациты) без их смешивания.

В соответствии с технологической схемой переработки угля целесообразно выполнить и декомпозицию фабрики как объекта управления технологическими процессами. При сложившейся тенденции управления выделяют три таких уровня [2]: нижний уровень предусматривает управление режимными параметрами, наиболее тесно коррелированными с качеством продуктов обогащения (плотность разделения, высота породной постели, удельный расход реагентов и др.); средний уровень предусматривает управление процессом (отдельной обогатительной машиной или группой однотипных машин, например, несколькими отсадочными машинами); верхний уровень обеспечивает управление комплексом процессов обогащения (всеми отсадочными, флотационными машинами, сепараторами и гидроциклонами, работающими на общий продукт).

При этом управление режимными параметрами машин для обогащения угля с учетом специфики того или иного процесса осуществляется, как правило, соответствующей подсистемой. Управление же одной машиной или группой однотипных машин может осуществляться единообразно для всех процессов углеобогащения.

Верхний уровень управления предусматривает управление всеми технологическими процессами фабрики, поэтому могут быть реализованы различные методы в зависимости от особенностей технологической схемы обогащения. В качестве главных отличительных признаков, влияющих на стратегию управления комплексом процессов обогащения, могут служить марки обогащаемых углей, в связи с чем можно выделить следующие варианты: обогащаемые классы коксующихся или энергетических углей после обогащения смешиваются; обогащаемые классы углей не смешиваются, а отгружаются потребителям по сортам (антрациты), причем отдельные классы при этом могут смешиваться. На систему управления верхним уровнем могут оказывать определенное влияние требования к качеству на концентрат, например, в части более жесткого ограничения на зольность и др.

Как известно, управление каждым уровнем иерархии должно осуществляться по определенному критерию при экстремизации общего критерия. При этом должна быть соблюдена иерархия критериев: нижестоящие уровни управления должны подчиняться вышестоящим.

В качестве критерия управления целесообразно выбрать такой критерий, который мог бы оперативно вычисляться на основе информации, получаемой от автоматических устройств, иметь физический смысл, однозначно определять эффективность работы фабрики и не противоречить общепринятому критерию.

В качестве такого критерия управления технологическими процессами углеобогащения обычно принимают стоимость готовой продукции при допущении постоянства затрат на обогащение [3].

Для практического применения приведенный критерий можно упростить, положив объем произведенной продукции в единицу времени, поскольку время производительной работы фабрики не поддается оперативному управлению.

Тогда, учитывая постоянство преysкурантной цены и аппроксимации кривой обогатимости полиномом второго порядка [4], получим математическое выражение цели управления в следующем виде:

$$J(A_{\kappa\Sigma}^d) = \sup M \left\{ \sum_{i=1}^n G_i [a_{0i} + a_{1i} A_{\kappa i}^d + a_{2i} (A_{\kappa i}^d)^2] \times [1 - \lambda (A_{\kappa i}^d - A_{\kappa i}^{d*})] \right\}, \quad (1.5)$$

где G_i - исходная производительность по i -му машинному классу;
 a_{0i}, a_{1i}, a_{2i} - коэффициенты аппроксимирующего полинома i -го машинного класса;
 $A_{\kappa i}^d, A_{\kappa i}^{d*}$ - текущая и заданная (по преysкуранту) зольности концентрата при обогащении i -го машинного класса;
 $A_{\kappa\Sigma}^d$ - зольность суммарного концентрата;
 λ - коэффициент скидок или надбавок на цену концентрата при отклонении зольности концентрата от преysкурантной.

При этом должны быть выполнены следующие ограничения по зольности и потерям:

$$A_{\kappa\Sigma \min}^{d*} \leq M\{A_{\kappa\Sigma}^d(t)\} \leq A_{\kappa\Sigma \max}^{d*}, \quad (1.6)$$

$$M\{A_o^d(t)\} \geq A_o^{d*}; \gamma_n(t) \leq \gamma_n^*, \quad (1.7)$$

где $A_{\kappa\Sigma \min}^{d*}, A_{\kappa\Sigma \max}^{d*}$ - допустимые минимальная и максимальная зольности суммарного концентрата;
 $\gamma_n(t), \gamma_n^*$ - текущие и допустимые потери концентрата с отходами обогащения;
 $A_o^{d*}(t), A_o^{d*}$ - текущая и заданная зольности отходов;

Автоматическое регулирование уровней в сборниках суспензии осуществляется при помощи датчиков давления ДД1 и ДД2, опущенных в сборники. Сигналы этих датчиков p_1, p_2 преобразуются в электрические при помощи дифманометров ДМ1, ДМ2 и поступают в управляющее устройство УУ, где сравниваются с заданиями p_1^*, p_2^* .

С контактных устройств вторичных приборов через промежуточные реле сигналы подаются на входы бесконтактных пускателей, управляющих исполнительными механизмами ИМ3 и ИМ4. Последние включают устройства регулирования уровней РУ3 и РУ4. В сборнике некондиционной суспензии СНС уровень регулируется подачей воды из бака оборотной воды БОВ, в сборнике рабочей суспензии СРС - подачей суспензии заданной плотности из системы приготовления суспензии СПС.

Верхние уровни суспензии в баке в СРС и СНС измеряются датчиками ДУ1-ДУ2.

При запуске суспензионных насосов осуществляется звуковая и световая сигнализация о режиме и номере работающего насоса, заливка насоса рабочей и некондиционной суспензии, подача воды в нагнетающие трубопроводы насосов рабочей и некондиционной суспензии. В случае, если насосы не развивают заданной производительности, включается аварийная световая и звуковая сигнализация, насосы отключаются. Для контроля производительности суспензионных насосов установлены датчики уровней в ваннах электромагнитного и обогатительного сепаратора.

Наибольшее влияние на эффективность разделения угля в отсадочных машинах оказывают высота породной постели и степень ее разрыхленности. В.С.Синепольский установил, что величина разрыхленности отсадочной постели тесно коррелирована с максимальной скоростью восходящего потока. Поэтому при создании аппаратуры этот параметр, наряду с высотой постели, принят в качестве регулируемого. В соответствии с этим создана и серийно выпускается аппаратура автоматизации типа ОКА. Она предназначена для комплексной автоматизации процессов обогащения в гидравлических отсадочных машинах углеобогажительных фабрик. Она применима для автоматизации как уже работающих на фабриках отсадочных машин, так и вновь выпускаемых машин унифицированных рядов ОМ и МО. Аппаратура обеспечивает автоматизацию как одной, так и группы отсадочных машин, работающих на общий продукт.

В связи с небольшим временем чистого запаздывания в аппаратуре ОКА использованы традиционные методы управления. Однако использование адаптивных алгоритмов позволит улучшить качество управления. Функциональная схема представлена на рис.6.16.

В связи с необходимостью поддерживать плотность суспензии в дополнительном баке с достаточно высокой точностью ($0,010 \text{ кг/м}^3$) и в то же время оперативно изменять эту плотность при изменении зольности концентрата и других возмущающих воздействиях, целесообразно для этих целей использовать нелинейный адаптивный регулятор с переменной структурой.

Однако такое регулирование не гарантирует поддержание соответствующей плотности в ванне сепаратора, так как вместе с углем поступает переменное количество воды. Для компенсации этого возмущения на выходе сепаратора установлен второй плотномер ρ_2 , сигнал которого сравнивается с сигналом первого плотмера ρ_1 . В случае их отличия УУ формирует корректирующий сигнал на изменение плотности рабочей суспензии. Изменение плотности рабочей суспензии может осуществляться также путем регулирования положения делителя потока ДП суспензии, регулирующего часть ее потока на регенерацию (исполнительный механизм ИМ5).

Чем больше плотность суспензии, тем меньше ее направляется на регенерацию, и наоборот. В аппаратуре предусмотрено дистанционное управление делителем потока.

В режиме стабилизации зольности концентрата сравниваются сигналы с золомера A_{κ}^d , установленного после обезвоживания на ленточном конвейере с сигналом задатчика A_{κ}^{d*} . При $A_{\kappa}^d \neq A_{\kappa}^{d*}$ в УУ формируется сигнал коррекции задания плотности суспензии с таким расчетом, чтобы фактическая зольность концентрата была равной заданной (при снижении зольности плотность увеличивается и наоборот).

Поскольку возмущающее воздействие на входе в обогатительный аппарат не поддается непосредственному измерению, для управления целесообразно использовать адаптивный регулятор с исчезающей во времени обратной связью.

Для предотвращения выдачи ложного сигнала о текущем значении зольности концентрата установлен датчик наличия минимальной толщины измеряемого слоя концентрата ДН, отключающий систему управления зольностью при нарушениях условий измерения зольности. Для создания необходимых условий измерения используется формирователь потока.

При автоматической оптимизации сигналы от золомера A_{κ}^{d*} и весов G_{κ} поступают в управляющее устройство, в котором определяется знак отклонения режима от оптимального. Сигнал коррекции изменяет задание плотности разделения аналогично тому, как это осуществляется в режиме стабилизации зольности.

$$A_{\kappa\Sigma}^d = \frac{M\left\{\sum_{i=1}^n \Gamma_{\kappa i} A_{\kappa i}^d\right\}}{M\left\{\sum_{i=1}^n \Gamma_{\kappa i}\right\}}, \quad (1.8)$$

где $\Gamma_{\kappa i}$ - выход концентрата i -го машинного класса.

Не трудно убедиться, что (1.5) для каждого класса имеется экстремум-максимум, дрейфующий в вертикальном и горизонтальном направлениях при изменениях производительности и обогатимости угля. При отсутствии ограничений (1.6), (1.7) максимум функционала (1.5) имеет место при максимумах по каждому машинному классу, т.е. частные критерии аддитивны по отношению к общему.

В случае же ограничения на зольность концентрата, которое обычно имеет более жесткое требование вида $A_{\kappa\Sigma}^d \leq A_{\kappa\Sigma}^{d*}$ ($A_{\kappa\Sigma}^{d*}$ - заданная зольность суммарного концентрата); максимум функционала (1.5) имеет место при оптимальных значениях зольности каждого машинного класса, отличающихся от их экстремальных значений [5]. В этом случае задача определения оптимальных значений зольности каждого машинного класса может быть сведена к задаче линейного программирования.

В зависимости от расположения экстремума функции цели по оси зольности концентрата может использоваться и соответствующая стратегия управления процессом разделения.

Исследования выполнены при обогащении углей различной категории обогатимости и марок в тяжелосредних установках (класс +13 мм), в отсадочных (класс 1-13 мм) и флотационных (класс 0-1 мм) машинах. Анализ их результатов позволяет сделать следующие основные выводы:

1) зависимость $J(A_{\kappa i}^d)$ имеет экстремум-максимум, дрейфующий в вертикальном и горизонтальном направлениях;

2) с повышением категории обогатимости экстремум смещается вправо в область высоких зольностей;

3) функционирование процесса при экстремуме функции цели в пределах допустимой зольности возможно только в случае обогащения угля легкой категории обогатимости.

Следовательно, при ограничениях на зольность концентрата любого из процессов обогащения оптимальным режимом в подавляющем большинстве является режим стабилизации максимально допустимой зольности концентрата.

Рассмотрим критерий (1.5) для фабрики в целом. Для этого представим (1.5) в функции зольности смеси концентратов:

фракционного состава исходного питания приводят к изменению зольности концентрата при постоянной плотности суспензии. Поэтому необходима стабилизация заданной зольности концентратов, для чего требуется переменная плотность суспензии. Величина заданной плотности суспензии устанавливается автоматически по разности фактической и заданной зольностей концентрата.

Технологическая схема автоматизированного процесса обогащения в минеральной суспензии приведена на рис.6.15. Аппаратура должна выполнять следующие функции: 1) автоматическую стабилизацию заданного значения зольности концентрата; 2) автоматическое регулирование плотности суспензии, уровней в сборниках рабочей и некондиционной суспензии; 3) автоматический контроль давления в сборниках суспензии, положения исполнительных механизмов (5 шт.), производительности тяжелосреднего комплекса по концентрату и сигнала коррекции режима разделения; 4) регистрацию зольности концентрата и производительности по концентрату; 5) дистанционное управление суспензионными насосами по заданной программе (2 канала), механизмамиточно-транспортной системы (ПТС) (17 каналов), механизмами регулирующих органов (5 каналов); 6) световую сигнализацию режима работы (стабилизация зольности концентрата, аварийного уровня в электромагнитном сепараторе и в регулировочном баке плотности суспензии, оптимизации по критерию максимума стоимости концентрата), отклонения плотности суспензии от задания, уровней суспензии в сборниках (2 канала), механизмов ПТС (17 каналов), аварийных значений уровней суспензии в сборниках (2 канала), режима работы и номера суспензионного насоса; 7) предупредительную сигнализацию о дистанционном запуске суспензионных насосов, звуковую и световую сигнализацию о срыве программы запуска суспензионных насосов; 8) автоматическую оптимизацию процесса разделения угля по выбранному критерию; 9) выбор режима работы (автоматический, дистанционный).

В аппаратуре желательно предусмотреть три режима работы: автоматическую стабилизацию заданной плотности суспензии, автоматическую стабилизацию заданной зольности концентрата и автоматическую оптимизацию режима разделения.

В соответствии с этим в зависимости от конкретных условий или желания фабрики можно использовать соответствующие составные части аппаратуры в качестве автономных изделий, а именно аппаратура регулирования плотности суспензии, управления суспензионными насосами и управления ПТС. Аппаратура оптимизации может использоваться только в комплекте с аппаратурой регулирования плотности суспензии.

Достоинством выражения для цели управления (1.10) является возможность оперативного определения параметров, входящих в аналитическое выражение производительности при помощи конвейерных весов, а зольности - при помощи золомеров в потоке.

В силу рассмотренных выше свойств критерия управления фабрике невыгодно работать при $M\{A_{\kappa\Sigma}^d(t)\} < A_{\kappa\Sigma}^{d*}$, поэтому целесообразно в приведенном ограничении использовать знак равенства. Это означает, что ограничения на зольность концентрата почти всегда вынуждают работать в режимах стабилизации зольности. Тогда максимум стоимости реализованной продукции равноценен максимуму выхода концентрата заданной зольности, т.е. критерий «выход концентрата» является частным случаем критерия производительности.

Если концентраты разных машинных классов не смешиваются, цель управления (1.10) следует применять для каждой машины отдельно.

Таким образом, система автоматического управления отдельным процессом обогащения угля в большинстве случаев должна обеспечивать стабилизацию зольности концентрата и иногда ее оптимизацию.

Система управления комплексом процессов обогащения угля должна также стабилизировать зольность смеси концентратов всех машинных классов или обеспечивать оптимизацию указанного комплекса. В основе систем оптимизации могут быть использованы стабилизирующие системы, которым задания устанавливаются, исходя из экстремизации функции цели.

Следовательно, задача управления процессами обогащения угля сводится к стабилизации режимных параметров в условиях помех, что приводит к целесообразности использования критерия среднего риска.

1.3. Требования к быстродействию и точности управления

Эффективность использования привода горных машин во многом зависит от точности стабилизации нагрузки. Чем она выше, тем больше используется перегрузочная способность привода, поэтому с указанных позиций целью управления нагрузкой привода может служить минимум ее дисперсии:

$$\sigma_M^2 = \inf M\{[Q_1(t) - Q_1^*]^2\}, \quad (1.11)$$

где σ_M - среднеквадратическое отклонение нагрузки на валу исполнительного органа (момента сопротивления).

Условие (1.11) обеспечивает повышение усталостной прочности деталей горных машин, поскольку долговечность их тем больше, чем меньше размах колебаний и их частота.

Представим общую дисперсию нагрузок, действующих на исполнительный орган и привод горных машин в виде суммы:

$$\sigma_M^2 = \sigma_n^2 + \sigma_b^2, \quad (1.12)$$

где σ_n, σ_b - среднеквадратические отклонения низкочастотной и высокочастотной составляющих нагрузки соответственно.

Автоматическое регулирование нагрузки привода горных машин путем изменения скорости подачи может обеспечить сглаживание лишь низкочастотной составляющей нагрузки. Так как $\sigma_b^2 = (0,2 \div 0,5) \sigma_m^2$, то ($\sigma_n \rightarrow 0$) и при автоматическом управлении среднеквадратическое отклонение нагрузки $\sigma_m = (0,5 \div 0,7) \sigma_{mr}$ (σ_{mr} - среднеквадратическое отклонение нагрузки при ручном управлении).

Основными причинами перегрузок привода машин являются увеличение крепости разрушаемого массива и заштыбовка исполнительного органа. Заштыбовке обычно подвержены машины с низкой транспортной способностью исполнительных органов и, как правило, этот процесс развивается сравнительно медленно.

Наиболее опасным режимом следует считать ступенчатое изменение крепости забоя, например, при внезапной встрече с уступом пород, обработке пород кровли или почвы. В соответствии с этим целесообразно рассмотреть два режима возникновения перегрузки привода исполнительного органа: ступенчатое изменение сопротивляемости забоя разрушению и возрастание нагрузки при врезании в массив на большой скорости. В общих случаях система автоматического управления должна сработать за время, не превышающее время роста нагрузки до опрокидывающей.

Для предотвращения опрокидывания привода быстродействие системы регулирования должно быть максимальным. Например, для комбайна 2К-52 это время составляет 1-2 с, для проходческих машин бурового типа несколько больше [1].

Во втором режиме возникновения перегрузок привода в первом приближении можно считать, что комбайн при номинальной нагрузке, движущийся с максимальной скоростью, встречаются с массивом, сопротивляемость которого в 4 раза выше предыдущего участка. Для комбайнов с гидравлическими механизмами подачи время снижения нагрузки системой регулирования должно быть не более 1 с [1].

Таким образом, система управления горной машиной должна иметь максимальную точность стабилизации нагрузки в нормальных режимах эксплуатации и максимальное быстродействие в аварийных или экономически невыгодных режимах.

Рассмотрим процессы в обогатительных машинах.

приводить к ложному срабатыванию реверсора. В лебедке ЛПА принято $F_{кл} = (0,8 \div 1,2) F_{кл}^*$, следовательно, $F_{1л}^* > 1,2 F_{кл}^*$, а $F_{2л}^* > 0,8 F_{кл}^*$.

В случае порыва цепи натяжение каната начинает увеличиваться, поэтому система управления приводит к снижению скорости движения каната, и при $v_k = 0$ лебедка автоматически отключается, а комбайн зависает на предохранительном канате.

В качестве датчика усилия использован механический датчик с пружиной и роликом и концевыми выключателями. Промышленные испытания лебедки ЛПА проведены на шахте "Черноморка" ПО "Первомайскуголь" в шестой западной лаве (мощность пласта 1,4 м, угол падения 23-25°, длина лавы 190 м) совместно с комбайном 2К-52 (суточная нагрузка на лаву составляла 1560 т).

В результате испытаний установлено:

- 1) автоматическая лебедка обеспечивает выполнение всех функций;
- 2) амплитуда колебаний усилия в предохранительном канате при изменении длины каната и его скорости не превышает допустимую (20%) и составляет до 14%;
- 3) при реверсе комбайна усилие в предохранительном канате не достигает предельных (25%);
- 4) при искусственных обрывах тяговой цепи комбайна лебедка надежно удерживала комбайн.

Среднее значение усилия в канате при движении комбайна вниз 38 кН, средняя скорость навивки каната на барабан 3 м/мин, диапазон ее изменения - от 0 до 5 м/мин.

6.7. Автоматическое управление гравитационными процессами обогащения

Разработанные адаптивные алгоритмы управления могут использоваться для автоматизации других технологических процессов обогатительных фабрик, в частности, процессов обогащения угля в минеральных суспензиях и в отсадочных машинах. Общим признаком этих процессов является использование для разделения поля гравитации. Определяющим параметром, в наибольшей степени влияющим на результаты разделения угля в тяжелосредних сепараторах и гидроциклонах, является плотность суспензии. Поэтому автоматическое регулирование этого параметра принято за основу при создании любой аппаратуры. Однако стабилизация плотности суспензии не может гарантировать получение необходимой зольности концентрата, так как изменения

4) автоматическое изменение направления вращения барабана лебедки при изменении направления движения комбайна.

Усилие в предохранительном канате $F_{кл}(t)$ лебедки 1 измеряется датчиком усилия 2 и анализируется распознающей системой 3, определяющей необходимое направление движения комбайна. Сигнал с датчика усилия подается в регулятор 4, в качестве которого использован регулятор режима работы комбайна (только канал управления нагрузкой). Выходной сигнал регулятора подается на исполнительный механизм 5, в качестве которого служит гидроцилиндр с поршнем (цапфы регулируемого гидронасоса 6, приводимого во вращение электродвигателем 7).

При эксцентриситете гидронасоса $\varepsilon_n \neq 0$ жидкость через реверсор 8 подается в гидродвигатель 9, вращающий барабан лебедки 1. При $\varepsilon_n = 0$ с выдержкой времени 7-12 с (реле времени 10) отключает электродвигатель 7 пускателем 2. Сигналы на включение реле 10 (без задержки) и отключение его подается от датчика 12 положения цапфы гидронасоса. При $\varepsilon_n = 0$ сигнал $u_{ц} = 0$ и при $\varepsilon_n \neq 0$, $u_{ц} \neq 0$.

Заданное усилие в канате $F_{кл}^*$ поддерживается за счет изменения эксцентриситета гидронасоса. В случае остановки комбайна усилие в канате остается прежним, а при его уменьшении (из-за утечек жидкости из гидросистемы) автоматически восстанавливается регулятором и исполнительным механизмом.

Автоматическое определение направления вращения барабана лебедки и реверс осуществляются при помощи распознающей системы 2. Это происходит следующим образом. Допустим, комбайн движется вверх, а затем останавливается и ему необходимо двигаться вниз. В начале движения комбайна вниз лебедка еще не включилась, поэтому натяжение в канате начинает возрастать. Как только оно увеличится до $F_{кл}(t) \geq F_{1л}^*$ ($F_{1л}^*$ - заданный порог срабатывания при увеличении тягового усилия), заданного датчиком 14, на выходе звена сравнения 15 сигнал $F_{1л}^* - F_{кл}(t) < 0$, поэтому на выходе порогового элемента 16 появится сигнал, который через устройство управления реверсом 13 включит реверсор 8 на разматывание каната. После включения реверсора усилие в канате упадет до заданного ($M\{F_{кл}(t)\} = F_{1л}^*$).

Если же комбайн начнет двигаться вверх, то натяжение в канате снизится, и при достижении $F_{кл}(t) \leq F_{2л}^*$ ($F_{2л}^*$ - заданный порог срабатывания при снижении тягового усилия в канате) на выходе звена сравнения 17 сигнал $F_{кл}(t) - F_{2л}^* < 0$, а на выходе порогового элемента 18 появится сигнал, который через устройство управления 13 реверсором 8 установит его в положение, при котором канат начнет наматываться на барабан, в результате чего усилие в канате снова станет заданным. Очевидно, что $F_{2л}^* < F_{кл}(t) < F_{1л}^*$, а амплитуда колебаний усилия в канате не должна

Специфическими особенностями процессов углеобогащения является наличие тесной связи между выходными координатами: зольностью A_k^d концентрата и его выходом Γ_k , определяемое кривой обогатимости

$$\Gamma_k = f(A_k^d). \quad (1.13)$$

Поскольку зависимость (1.13) нелинейная, при отклонениях текущей зольности концентрата от заданного значения имеют место потери концентрата [2]:

$$\Delta \Gamma_k = a_2 \sigma_A^2, \quad (1.14)$$

где a_2 - коэффициент, определяемый при аппроксимации β -кривой полином второй степени;

σ_A - среднеквадратическое отклонение текущей зольности концентрата от заданного значения.

Колебания зольности концентрата одновременно ухудшают и его качество. Повышение зольности общего концентрата составит при этом:

$$\Delta A_k^d = \frac{(a_1 + 2a_2 A_k^d) \sigma_A^2}{\Gamma_{k0} + a_2 \sigma_A^2} \quad (1.15)$$

где Γ_{k0} - теоретически возможный выход концентрата.

Анализ (1.14) и (1.15) приводит к требованию

$$\sigma_A^2 = \inf M \left\{ \left[A_k^d(t) - A_k^{d*} \right]^2 \right\}. \quad (1.16)$$

Это выражение может рассматриваться как цель управления процессом обогащения, что соответствует максимизации точности управления.

В настоящее время при расчёте с потребителями зольность концентрата округляют до 0,1%, поэтому эту величину можно в первом приближении принять за абсолютную погрешность контроля на выходе фабрики. С другой стороны, существующие инструментальные методы автоматического контроля (при помощи золотеромов) обеспечивают погрешность 0,5÷1,1% абс и более [6]. По-видимому, такая точность является предельной для системы управления. Для определения средневзвешенной зольности отгружаемого концентрата следует учитывать также и погрешность взвешивающих весов.

Рассмотрим теперь вопрос о быстродействии системы управления. В нормальных режимах функционирования процессов обогащения требования к быстродействию невысокие, так как указанные процессы инерционны. Однако при выходе процесса на границы ограничений возможно нарушение технологического режима обогащения, что ведёт к значительным потерям полезных продуктов или к аварии. Например, при обогащении флотацией избыточная подача реагента-

пенообразователя приводит к запениванию машин, т.е. к аварии и большим потерям. Это может произойти при значительных колебаниях объемного расхода пульпы, подаваемой на флотацию.

В отсадочной машине возможно скачивание породной постели и т.п. Особенно большая опасность при нарушениях технологического режима сушки концентрата: повышение температуры приводит к взрывам, а чрезмерное снижение - к конденсации испаренной влаги. В последнем случае резко падает КПД сушилки и происходит потеря основной функции этого процесса.

Для предотвращения аварийных ситуаций и экономически невыгодных режимов система управления должна с максимальной скоростью вводить процесс в заданный режим и выводить его из опасной зоны при нарушениях, т.е. должна обладать максимально возможным быстродействием.

Таким образом, управление процессами выемки и обогащения угля сводится к стабилизации определенного режимного параметра при минимизации его дисперсии. В случае использования систем оптимального управления при экстремизации функции цели задачу можно свести к использованию стабилизирующей системы, задание которой устанавливается, исходя из экстремума функции цели.

Общими требованиями к системам автоматического управления процессами выемки и обогащения угля являются максимально возможная точность в нормальных режимах эксплуатации и максимально возможное быстродействие при аварийных или экономически невыгодных режимах.

1.4. Анализ динамических свойств объектов управления

Динамические свойства горных машин для выемки угля и проходки подготовительных выработок и процессы обогащения как объекты автоматического управления их режимами работы достаточно полно исследованы и обобщены, например, в [7]. Причем установлено, что динамические свойства угольных комбайнов описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами и в случае использования вынесенных механизмов подачи с чистым запаздыванием. Однако как объекты автоматического управления они могут быть аппроксимированы аperiодическими или колебательными звеньями с переменными коэффициентом усиления и постоянной времени. При этом коэффициент усиления зависит от крепости разрушаемого массива и может изменяться в пределах одного забоя до 4 раз [1]. Постоянная

трической линии между лебедкой (на штреке) и комбайном (в очистном забое).

На рис.6.14 приведена функциональная схема автоматизированной лебедки ЛПА, созданной Горловским машзаводом им.С.М.Кирова совместно с институтом НИПИУглеавтоматизация.

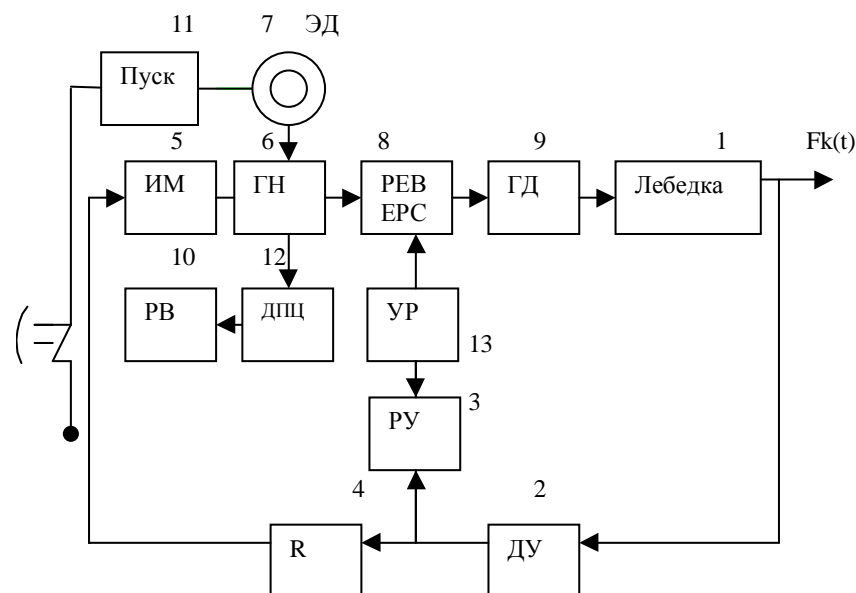


Рис. 6.14. Функциональная схема САУ системой комбайно-предохранительной лебедки

Аппаратура автоматического управления лебедкой изготовлена Конотопским заводом "Красный металлист". Автоматизированная лебедка ЛПА выполняет следующие функции:

- 1) автоматическую синхронизацию движения предохранительного каната при работе очистного комбайна;
- 2) автоматическое включение электродвигателя лебедки при сообщении комбайну перемещения;
- 3) автоматическое отключение с выдержкой времени (7-12 с) электродвигателя лебедки при остановке комбайна или обрыве его тягового органа;

Пауза между импульсами $u'_2(t)$ выбрана больше времени переходных процессов в системе (с учетом чистого запаздывания в объекте), поэтому следующий импульс поступит в том случае, если нагрузка привода конвейера не снизилась до заданного значения. Снижение уставки J^* регулятора R происходит ступенями u_4 до тех пор, пока $Q_k \leq Q^*_1$ (Q_k - нагрузка привода конвейера).

Если же перегрузка привода конвейера продолжает нарастать, то при $Q_k = 1,1Q_n$ (Q_n - номинальная нагрузка привода конвейера) на выходе звена сравнения 2 появится сигнал отрицательной полярности $u_5(t)$, увеличивающий длительность импульсов $u'_2(t)$ в два раза. Благодаря этому интенсивность снижения нагрузки конвейера соответственно возрастает.

При снижении нагрузки конвейера до заданной на выходе порогового элемента 3 $u'_1(t) = 0$, ключ 5 размыкается, а на выходе интегратора 6 сигнал запоминается, так как при включенном комбайне (датчик состояния комбайна ДСК выдает сигнал $u_6(t)$ на выходе элемента 9 НЕ сигнал отсутствует. Запрет на увеличение скорости подачи комбайна снимается. Обнуление интегратора 6 происходит в момент выключения комбайна, поэтому перед каждым его включением интегратор готов к работе при $u_4 = 0$.

При исследовании этой системы установлена возможность появления незатухающих автоколебаний в системе, частота которых возрастает с увеличением загруженной части конвейера. При длине конвейера 25 м (по условиям эксплуатации) оптимальными значениями являются: величина ступени снижения скорости подачи $\Delta v_n = 30\%$, время между ступенями 10 с. При этом амплитуда колебаний тока не превышает 5 А, а скорости - $1,2 \cdot 10^{-2}$ м/с. При ступенчатом возмущении система приходит к установившемуся значению через один период колебаний.

В процессе эксплуатации этой аппаратуры в шахтных условиях (комбайн КШ-1 КГ, конвейер СП-63) скорость подачи ограничивалась нагрузкой привода конвейера (СП-63) и не превышала 1,5-2 м/мин. При ручном управлении скорость подачи составляла 0,8-1,2 м/мин.

Нагрузка привода конвейера при холостом ходе составила 48-52 кВт (номинальная мощность 90 кВт). Прирост нагрузки конвейера на каждые 10 м загруженного става составил 12 кВт; в конце става конвейера перегрузка составила 30÷40%, поэтому автоматическое управление системой комбайн-конвейер, обеспечивало стабилизацию нагрузки привода конвейера.

При выемке угля на пластах наклонного и крутого падения (до 36°С) требуется использовать предохранительные лебедки. Для этих целей разработана оригинальная система автоматического управления предохранительной лебедкой, функционирующей без прокладки элек-

времени зависит от приведённой жесткости системы подачи машины на забой и изменяется при цепной системе подачи до 2 раз, а при цепочной - значительно меньше.

Закономерности протекания процессов в проходческих машинах в основном совпадают с процессами в очистных комбайнах, однако их динамические свойства можно аппроксимировать аperiodическим звеном первого порядка. Из-за значительной массы проходческого комбайна и жесткости системы подачи постоянная времени его практически стабильна во времени, а коэффициент усиления может изменяться в более широких пределах, чем у выемочного комбайна, что зависит от крепости разрушаемых пород по траектории его движения.

Динамические свойства подавляющего большинства процессов обогатительных фабрик аппроксимируются аperiodическими звеньями первого (иногда второго) порядка с чистым запаздыванием [7]. Причем в процессе их функционирования изменяются коэффициент усиления, постоянная времени и время чистого запаздывания, диапазон изменения коэффициента усиления составляет для различных объектов 1,5-2 раза, постоянной времени в 1,2-1,5 раза и времена чистого запаздывания до 1,5 раз. Причем время чистого запаздывания существенно зависит от места установки средств отбора информации и от производительности обогатительного аппарата.

В частности, в тяжелосредней установке коэффициент усиления зависит от возмущающих воздействий, а постоянная времени - от производительности по рядовому углю и магнетиту. Например, для сепаратора СК-20 $T = 102-240$ с; $k = 0,78-1,0$; $\tau_3 = 100$ с (T , k , τ_3 - постоянная времени, коэффициент усиления и время чистого запаздывания соответственно). Для отсадочной машины ОМ12 по каналу высота породной постели - нагрузка по входу $T = 135$ с; $k = 0,117$; $\tau_3 = 100-150$ с; по каналу зольность концентрата - плотность разделения $\tau_3 = 450-600$ с [7], а по данным [8] $T = 100$ с, $\tau_3 = 200$ с.

Процесс разделения в отсадочной машине протекает в условиях непрерывно изменяющихся возмущений на входе (производительность, гранулометрический, фракционный состав угля в т.п.), а также внутренних параметров объекта, т.е. указанный объект управления имеет нестационарные характеристики и чистое запаздывание сигналов в каналах измерения. Процесс флотации также подвержен влиянию большого количества воздействий стохастического характера. На результаты флотации влияет зольность исходного питания, плотность и расход пульпы, вещественный состав твердой фазы, удельные расходы реагентов собирателя и пенообразователя, уровень пульпы в ванне флотомашин, содержание твердого в исходной пульпе, флотиремость, гранулометриче-

ский и фракционный составы угля, толщина пенного слоя, степень аэрации и др. [3,8]. При стохастическом характере изменение плотности, расхода и зольности исходного питания, зольности, плотности и расхода на выходе процесса флотации коэффициенты усиления и постоянные времени также подвержены случайным изменениям.

Нестационарность процесса флотации подтверждается также существенным отличием экспериментальных данных при идентификации и статических характеристик в различных условиях и при изменении характеристик исходного сырья, полученных разными исследователями [7,9].

В случае определения динамических свойств процесса флотации по одному из каналов “входное воздействие - зольность концентрата” следует учитывать транспортное запаздывание, величина которого достигает несколько десятков минут в зависимости от конкретных условий, поскольку измерение зольности доступно лишь после обезвоживания флотоконцентрата и выдачи его на ленточный конвейер. По данным К.П.Власова параметры флотомашин по каналам удельный расход реагента - зольность отходов составили $T=275$ с, $\tau_3=420$ с, удельный расход реагента - зольность флотоконцентрата $T=190$ с, $\tau_3=240$ с [9].

Установлено, что процессы во флотомашинах имеют нестационарный случайный характер, только приближенно можно допускать их стационарность при длительности реализации до 50 мин.

Аналогичные свойства имеют установки для сушки угля. Сушка обычно осуществляется в трубах-сушилках, барабанных сушилках и в кипящем слое. Сушильные установки состоят из двух частей - топочного устройства и собственно сушилки. Динамические свойства сушилки по каналу влажность исходного угля - температура сушильного агента аппроксимируются аperiodическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием, параметры сушилки изменяются в зависимости от скоростей движения сушильного агента и угля в сушилке [7].

Возмущающими воздействиями на процесс сушки являются изменения расхода и влажности исходного угля, расхода и температуры сушильного агента, приводящие к изменениям скорости движения сушильного агента и угля в сушилке и соответственно k и τ . Исследованиями [10,11] установлено, что по каналу входное возмущение - влажность высушенного продукта транспортное запаздывание составляет 720-2600 с, постоянная времени в среднем 160 с.

Следовательно, очистные и проходческие комбайны и процессы обогащения угля как объекты автоматического управления имеют общие свойства - переменные коэффициент усиления, постоянную времени и время чистого запаздывания. Наиболее неблагоприятное влияние на

регулируемом приводе конвейера можно использовать упрощенный вариант системы, поскольку защита привода конвейера желательна из-за абразивного износа и значительной нагрузки даже при холостом ходе конвейера.

Для этих условий разработана система автоматического управления системой комбайн-конвейер с нерегулируемым приводом (рис. 6.13). Работает она следующим образом.

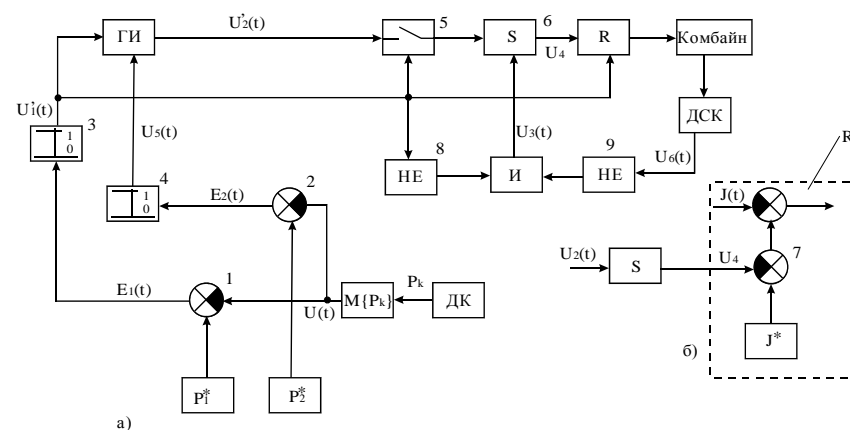


Рис. 6.13. Функциональная схема САУ системы автоматического управления очистным комбайном (а) и конвейером с нерегулируемым приводом (б)

Сигнал от датчика нагрузки ДН привода конвейера подается через блок оценки среднего значения на звенья сравнения 1 и 2, где сравнивается с заданными сигналами Q^*_1 , Q^*_2 ($Q^*_1 < Q^*_2$). При достижении нагрузки привода свыше 1,05 номинального значения на выходе звена сравнения I появляется сигнал отрицательной полярности $\varepsilon_1(t)$, поэтому на выходе порогового элемента 3 также появляется сигнал $u'_1(t)$, включающий генератор импульсов ГИ и запрещающий увеличение скорости подачи в регуляторе R. Одновременно замыкается ключ 5. Импульс $u'_2(t)$ от генератора ГИ через ключ 5 подается на вход интегратора 6. На выходе инте-

гратора 6 появится напряжение $u_4(t) = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_N} u'_2(t) dt$ (t_n - длительность импульса), которое подается на сумматор 7, снижая задание регулятору нагрузки R (см.рис.6.12б).

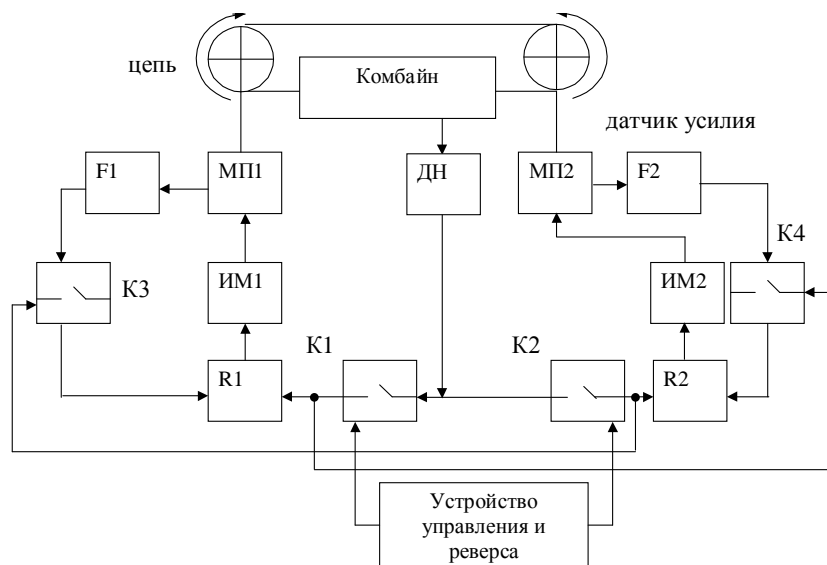


Рис. 6.12. Функциональная схема системы автоматического управления очистным комбайном с двумя вынесенными механизмами подачи

В процессе исследований комбайна БК-4 система управления работала в режиме стабилизации нагрузки электродвигателя, поскольку ограничение по производительности отсутствовало. Средняя скорость подачи составляла 1,3 м/мин, а при ручном управлении - 1 м/мин.

Регулятор в качестве самостоятельного модуля может быть использован при разработке более сложных систем управления, например, системой комбайн-конвейер.

Нагрузка конвейера зависит от длины загруженной части, скорости движения выемочной машины, характера транспортируемого материала, состояния рештчатого става (количества изгибов и др.). Тяжелый режим работы конвейеров приводит к снижению их надежности и долговечности, особенно при выемке песчано-глинистых руд.

Низкая надежность конвейерных цепей в значительной степени обусловлена их истиранием. При этом износ почти не зависит от нагрузки, поэтому желательно обеспечить максимально допустимое заполнение рештчатого става транспортируемым материалом. Для обеспечения соответствия нагрузки конвейера с производительностью комбайна необходимо регулировать скорость цепи конвейера, однако из-за отсутствия регулируемого привода в настоящее время это невозможно. При не-

функционировании систем автоматического управления оказывают изменения коэффициента усиления и времени запаздывания, приводящие к потере устойчивости. Поэтому для них могут оказаться эффективными адаптивные методы управления.

1.5. Анализ возмущающих воздействий

Исследованиями установлено, что нормированные автокорреляционные функции основных режимных параметров очистных и проходческих комбайнов, процессов обогащения угля с погрешностью не более 5% аппроксимируются экспоненциальными или экспоненциально-гармоническими функциями. В общем случае выражение для автокорреляционной функции имеет следующий вид [1]:

$$r(\tau) = \sum_{i=1}^n r_{oi} e^{-\alpha_i |\tau|} \cos \omega_i \tau \quad (1.17)$$

где r_{oi} , α_i , ω_i - дисперсия, коэффициент затухания и частота затухания i -ой составляющей.

Причем гармоническая составляющая автокорреляционных функций горных машин для выемки угля и проходки подготовительных выработок обусловлены неоднородностями конструкций исполнительных органов, поэтому спектральные плотности соответствующих параметров имеют максимумы на кратных частотах. Иногда при небольших нагрузках удается выделить частоту собственных колебаний [1]. При этом для статистического анализа выбирались реализации, на которых процесс допустимо рассматривать как квазистационарный (постоянство математического ожидания). Несмотря на операцию центрирования реализаций режимных параметров, статистические характеристики различных реализаций случайных процессов отличаются друг от друга по дисперсиям, коэффициентам затухания и удельным весам случайной составляющей на той или иной частоте. В связи с этим время спада автокорреляционных функций существенно отличается от реализации к реализации одного и того же параметра в одном и том же забое. При изменении условий работы комбайна кратность изменения времени корреляции возрастает в 10 и более раз.

Автокорреляционные функции параметров процессов обогащения (зольность, высота постели отсадочной машины, плотность суспензии сепаратора в т.п.), как правило, имеют одну частоту, на которой сосредоточена мощность случайного процесса. В разных условиях эта частота существенно отличается в зависимости от свойств обогащаемого угля, типа машины и т.д. Так, по данным К.П.Власова [9] изменения произво-

дительности на входе отсадочного отделения фабрики происходят с частотой $0,000025 \text{ с}^{-1}$, а по исследованиям В.С.Синепольского установлено, что эта частота значительно выше и составляет $0,0036 \text{ с}^{-1}$ [8].

Существенно отличаются друг от друга в разных условиях и другие вероятностные характеристики (математическое ожидание, дисперсия, время спада автокорреляционной функции), что свидетельствует о нестационарности процессов обогащения. Например, автокорреляционные функции зольности твердой фазы пульпы, ее расхода и плотности в зависимости от характеристик обогащаемого шлама отличаются величиной коэффициента затухания более чем в 10 раз. Время спада автокорреляционных функций изменяется от 3 до 60 мин.

Аналогичные особенности имеют и другие процессы обогатительных фабрик (сушка концентрата, сгущение шламов, осветление отходов флотации и др.). В частности, время спада автокорреляционной функции влажности подаваемого на сушку концентрата изменяется в пределах 840-2000 с.

Вероятностный нестационарный характер реализаций режимных параметров свидетельствует о стохастическом характере возмущающих воздействий. Последние имеют аддитивный мультипликативный или смешанный характер. Как правило, изменение коэффициента усиления объекта свидетельствует о наличии мультипликативного характера возмущающего воздействия. Это имеет место, например, при регулировании процесса сушки путем изменения подачи сырого материала, при разрушении забоя исполнительными органами горных машин и др., т.е. характерно для объектов горного производства.

В процессе функционирования горных машин и технологического оборудования могут возникать ненормальные режимы, носящие спорадический характер. Например, при сушке угольного концентрата может неожиданно повышаться влажность высушенного продукта вследствие образования конденсата при достижении температуры точки росы. В этом случае резко падает к.п.д. сушильной установки. Другим примером может служить внезапное уменьшение расхода пульпы на входе флотации, подачи исходного угля в отсадочную машину и т.п., приводящие к нарушениям технологических режимов и даже к авариям.

Таким образом, динамические характеристики горных машин для добычи и процессов обогащения угля как объектов автоматического управления режимами их работы имеют общие свойства: переменные коэффициент усиления, постоянную времени и чистое запаздывание в каналах измерения выходной координаты. Возмущающие воздействия имеет стохастический нестационарный характер с переменным временем корреляции. Указанные особенности необходимо учитывать при синтезе

снижению аварийности машин, двигателя и пусковой аппаратуры. В случае заштыбовки шнеков двигатель опрокидывается, а скорость подачи при ручном управлении не снижается, поэтому затруднен последующий запуск двигателя: для запуска требуется до 20 включений магнитного пускателя.

Для определения возможностей регулятора защитить двигатель от опрокидывающих нагрузок комбайн отводили от забоя и на максимальной скорости подачи направляли на забой. Двигатель при этом не опрокидывался.

Коэффициент вариации мощности привода минимум на 40% при ручном управлении выше, чем при автоматическом.

Применение регулятора повышает безопасность работы машиниста и снижает напряженность его работы, освобождает от необходимости находиться в постоянном контакте с машиной. Это приводит к снижению напряженности его работы и меньшей утомляемости.

При работе комбайна с двумя вынесенными механизмами подачи один из них (МП1 или МП2) работает в режиме автоматической стабилизации нагрузки (или скорости подачи) комбайна, а второй - в режиме стабилизации усилия в холостой ветви тяговой цепи. В связи с этим каждый механизм подачи оснащен автоматическим регулятором (R1 и R2) (рис.6.12). При реверсах комбайна режимы работы механизмов подачи соответственно меняются. В холостой ветви тяговой цепи поддерживается усилие 20-30 кН. Для этого автоматический регулятор воздействует на давление в силовой цепи гидропривода подачи. Переключение режима работы механизмов подачи осуществляется устройством управления и реверса путем замыкания ключа K1 или K2. Установлено, что время отработки управляющих воздействий не превышает 2 с, погрешность стабилизации усилия при изменении параметров системы - около 20%, что удовлетворяет требованиям эксплуатации [1].

Промышленные испытания автоматизированного комбайна БК-4 с вынесенным гидравлическим механизмом подачи ВМП проведены на шахте "Красная звезда" в 6-й южной лаве пласта K₁ Поддроновский. Длина лавы 150 м, угол падения пласта 4-6°, мощность пласта 0,58-0,62 м, вязкий антрацит с сопротивляемостью разрушению около 1,2 кН/см. При испытаниях установлено, что коэффициент вариации тока двигателя при автоматическом управлении не превышает 0,15, тогда как при ручном управлении он значительно больше и составляет 0,377, среднеквадратическое отклонение составляет соответственно 15 А и 49 А. Максимальное отклонение средней величины тока двигателя от заданной величины уставки составляет 4,6%. При этом сопротивляемость угля разрушению по длине лавы изменялась в 3,5 раза.

установления заданного значения регулируемой величины. Изменение постоянной времени корректирующего звена в два раза в ту или другую сторону качественно картину не меняет.

В реальных условиях работы на объект управления действуют случайные возмущения. В этом случае релейный элемент работает с различной частотой, поскольку суммарный эффект гармонической и случайной составляющих не являются строго периодическим.

Упрощение объекта управления до колебательного звена второго порядка качественных изменений не вносит. Отклонение показателей качества при этом от полученных при реальных характеристиках системы не выходит за пределы 10-20%, что для практики вполне допустимо.

Исследования выполнены для комбайнов разных типов (2К-52, 1К-101, БКТ). При этом установлено, что разработанный регулятор может быть применен для автоматизации любого из существующих очистных комбайнов. Наблюдаемое различие в погрешности до 10-15% объясняется различием динамических характеристик исполнительных органов и масс машин.

Промышленное исследование и длительный опыт эксплуатации подтвердил работоспособность автоматизированных комбайнов. Автоматический регулятор работал в основном в режиме стабилизации скорости подачи из-за ограничений по производительности забойного конвейера. Снятие ограничения скорости подачи обеспечивает режим стабилизации нагрузки. В режиме стабилизации скорости подачи канал по нагрузке срабатывает лишь при перегрузках электродвигателя.

Стабилизация нагрузки обуславливает также стабилизацию тягового усилия механизма подачи. Размах автоколебаний тока двигателя составляет $\pm (10 \div 13 \text{ А})$ при изменении длины тяговой цепи от 5 до 240 м и движении комбайна в любом направлении. При удлинении цепи амплитуда тока имеет тенденцию к увеличению, а частота - к снижению. Диапазон изменения частот составляет $0,17 \div 0,40 \text{ Гц}$.

Установлено, что при автоматическом управлении средняя скорость подачи комбайна возрастает на 20÷40% и более. При автоматическом управлении повысилась максимально устойчивая нагрузка на двигатель, благодаря чему максимальная скорость подачи, которую обеспечивает комбайн при устойчивой работе двигателя, возросла в среднем на 34%. При движении комбайна сверху вниз ограничивающим фактором являлась производительность конвейера, поэтому при автоматическом управлении уставка скорости подачи составляла 2-4 м/мин. В этом случае также имело место повышение средней скорости подачи машины.

Улучшение пускового режима двигателя, и, как следствие, значительное уменьшение (примерно в 10 раз) количества пусков приводит к

систем автоматического управления процессами добычи и обогащения угля, поскольку вышеуказанные особенности ухудшают качество процесса управления и приводят к потере устойчивости. Следовательно, для рассмотренного класса объектов могут оказаться эффективными адаптивные методы управления.

Анализ реализаций режимных параметров и распределения их вероятностей показывает на сложный характер их формирования. На рис.1.2 приведены гистограмма распределения нагрузки привода очистного комбайна и плотности вероятностей других характеристик работы добычных участков и нагрузки электродвигателя электровоза.

Во всех рассматриваемых случаях выполнена аппроксимация биномиальным распределением или композицией различных законов вполне корректно. Однако при этом не учтены имеющие место отклонения экспериментальных кривых от теоретических. Более того, иногда экспериментальную кривую не удастся аппроксимировать более или менее точно даже композицией различных законов распределения.

Зачастую при обработке экспериментальных данных “лишние” точки, не укладывающиеся в гипотезу данного распределения, отбрасывают. Причем при обработке данных выбирают обычно наиболее “благоприятные” участки диаграмм.

Рассматриваемые особенности того или иного процесса можно объяснить тем, что полученное распределение отличается от гауссовского за счет смешивания различных процессов с различными математическими ожиданиями и дисперсиями, имевшими нормальное распределение. Например, при выемке угля комбайном могут изменяться условия разрушения за счет подсечки боковых пород, наличия прослоек породы и т.д. Распределение составляющей нагрузки на привод при аддитивном их действии будет характеризоваться распределением крепости соответствующего массива вдоль забоя и скоростью подачи машины. Исследованиями Е.З.Позина и др. ученых установлено, что распределение коэффициента сопротивления угольного массива разрушению исполнительными органами выемочных машин подчиняется нормальному закону, поэтому и распределение нагрузки следует ожидать нормальным. В случае же разрушения разнородных по своим характеристикам элементов массива с нормальными законами распределения плотность распределения будет отличаться от гауссовской.

Аналогично можно рассмотреть, например, распределение зольности поступающего на обогащение рядового угля. В технологических процессах обогащения угля обычно имеют дело с физическими смесями углей различных шахтогрупп, образованных путем случайного или специального (приготовление шихты) смешивания рядовых углей с

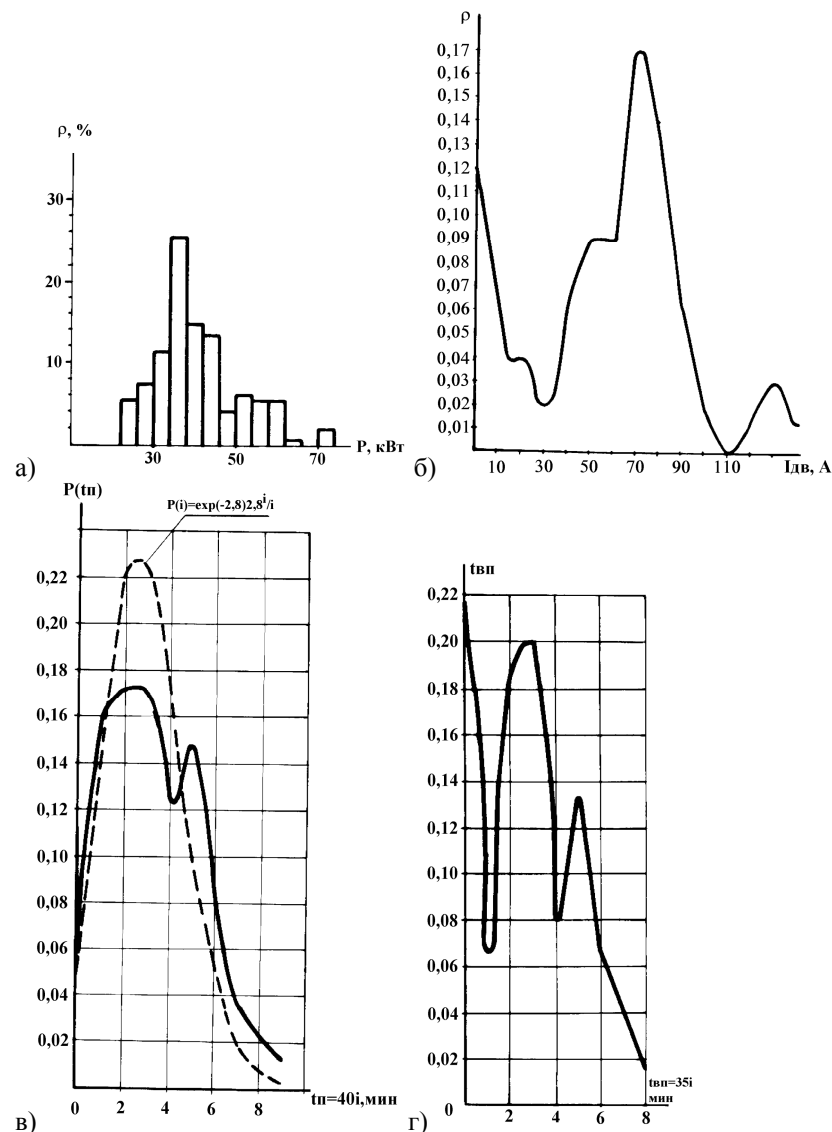


Рис. 1.2. Распределение плотности вероятностей нагрузки привода очистного комбайна 2К-52 (а), электродвигателей рудничного электровоза АРП14 (б), суммарных потерь времени на участке (в), потерь времени из-за отсутствия порожняка, выключения электроэнергии и других причин (г)

Дисперсия плотности сгущенного продукта радиального сгустителя шламовых вод снизилась по сравнению с ручным управлением в 11,3 раза и составила $40,09 \text{ (кг/м}^3\text{)}^2$, содержание твердого в оборотной воде снизилось на 12%, а дисперсия соответственно в 1,4 раза.

6.6. Автоматическое управление режимами работы горных машин

Разработанные алгоритмы использованы для автоматического управления режимами работы очистных комбайнов со встроенными и вынесенными механизмами подачи, систем горных машин комбайн-конвейер. В частности, разработан и освоен в серийном производстве автоматический регулятор нагрузки типа САДУ-2, встраиваемый в гидравлические механизмы подачи Горловского машзавода им.С.М.Кирова. В регуляторе использованы технические решения, изложенные в 5 разделе книги. Аппаратура выполняет следующие функции:

- 1) стабилизацию заданной нагрузки (тока) электродвигателя путем изменения скорости подачи (при $v_n(t) \leq v_n^*$);
- 2) стабилизацию заданной скорости подачи (при $J(t) \leq J^*$);
- 3) автоматическое обнуление скорости подачи при перегрузках привода;
- 4) реверс подачи на холостом ходу двигателя;
- 5) пуск и останов комбайна с пульта управления;
- 6) изменение уставок заданных значений нагрузки J^* и скорости подачи v_n^* комбайна.

Наиболее сложным с точки зрения синтеза система автоматического регулирования является контур управления нагрузкой привода, поэтому наибольшее внимание уделялось синтезу этого контура. Синтез системы управления в основном сводится к выбору параметров аperiodического звена, охватывающего релейный элемент регулятора, и постоянной времени сервопривода, которая меняется с изменением степени дросселирования масла при подаче его в цилиндр сервопривода.

Так, при включении в качестве обратной связи аperiodического звена с постоянной времени $T=1$ с и коэффициентом усиления $k_k=0,06$ система автоматического регулирования работает в режиме вибрационной линеаризации. Процесс установления выходной координаты имеет небольшое перерегулирование (один выброс), частота автоколебаний релейного элемента составляет около 5Гц.

При наличии вынужденной составляющей автоколебания моделируются указанной частотой. При значительных возмущающих воздействиях система регулирования ведет себя как релейная до момента уста-

- дистанционное управление расходом флокулянта, выгрузкой сгущенного продукта, скоростью вращения (при наличии регулируемого привода) и подъёмом гребков, гребковой фермой и приготовлением флокулянта;

- автоматическое управление приготовлением флокулянта, гребковой фермой, подъемом гребков;

- автоматический непрерывный контроль за объёмной нагрузкой на сгуститель, плотностью сгущенного продукта, расходом флокулянта, концентрацией твердой фазы оборотной воды, зольностью твердой фазы отходов флотации (при необходимости), содержанием твердого в питании сгустителя, положением исполнительного механизма сгущенного продукта, пробуксовкой гребковой фермы;

- цифровую индикацию текущих значений объемной нагрузки на сгуститель в плотности сгущенного продукта;

- регистрацию текущих значений расхода флокулянта и концентрации твердой фазы оборотной воды;

- аварийную и технологическую сигнализацию.

В аппаратуре предусмотрены гибкое изменение программы управления процессом в зависимости от конкретных технологических требований, прием и выдачу информации от систем управления более высокого ранга (АСУ фабрики).

Применение микропроцессорной техники позволяет использовать аппаратуру для автоматизации любого типа сгустителя (радиальные со взвешенным слоем и др.).

Испытания экспериментального образца аппаратуры КАУС.1 проведены на ЦОФ “Дзержинская” объединения “Донецкуглеобогащение” при автоматизации радиальных сгустителей шламовых вод и отходов флотации.

Испытания аппаратуры показали ее работоспособность и эффективность алгоритмов функционирования.

Содержание твердого в сливе сгустителя отходов флотации без коррекции колебалось в пределах 1,2-15 г/л, а при включении корректирующих контуров заданий расхода флокулянта к плотности сгущенного продукта содержание твердого в сливе составило около 2,5-3 г/л и практически не изменялось с течением времени. При отключении коррекции содержание твердого в сливе повышается за 0,5 ч до 6 г/л и за 1 ч - до 12 г/л.

Дисперсия плотности сгущенного продукта снизилась по сравнению с ручным управлением в 7,5 раза и составила $20,4 \text{ (кг/м}^3\text{)}^2$, расход флокулянта снизился на 15%.

различными свойствами. Поэтому естественно предположить, что возмущающие воздействия представляют собой результат последовательного действия составляющих смеси, т.е. возмущения представляют собой смеси не только в физическом, но и в математическом смысле. В [12] замечено, что при смешивании углей различных шахтогрупп дисперсия смеси возрастает, однако этому не дано надлежащее объяснение. Ввиду неидеального усреднения в случае различия в зольности каждой из шахтогрупп при совместном рассмотрении закон распределения зольности должен отличаться от нормального.

Причем характер графика совместной плотности вероятностей существенно зависит от параметров (математическое ожидание, дисперсия, вероятность) каждого из классов, участвующих в смеси. В качестве характеристики взаимного расположения составляющих смеси удобно использовать степень пересечения классов. В качестве меры пересечения классов целесообразно принять величины дисперсий этих классов смеси [13]. При этом типичным являются три случая взаимного расположения классов: непересекающиеся, слабо пересекающиеся и сильно пересекающиеся.

Классы будут непересекающимися, если

$$|u_k - u_m| \geq 3\sigma_k + 3\sigma_m, \quad (1.18)$$

где u_k, u_m – математические ожидания классов k и m в смеси;

σ_k, σ_m – среднеквадратические отклонения классов k и m .

Если

$$3\sigma_k + 3\sigma_m > |u_k - u_m| \geq 2\sigma_k + 2\sigma_m, \quad (1.19)$$

то классы можно назвать слабо пересекающимися и, наконец, при

$$|u_k - u_m| < 2\sigma_k + 2\sigma_m \quad (1.20)$$

классы сильно пересекающиеся. Причем при $u_k = u_m, \sigma_k \neq \sigma_m$.

Тогда функция распределения вероятностей смеси, состоящей из “ k ” компонентов (классов), может быть представлена следующим образом:

$$P[x(t)] = \sum_{i=1}^k p_i p_i(x(t)/u_i); \quad (1.21)$$

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1;$$

где $x(t)$ - текущее значение возмущающего воздействия в пространстве X ;

$P[x(t)]$ – функция распределения вероятности смеси;

p_i – вероятность появления $x(t)$ соответственно из i -го класса;

$p_i(x(t)/u_i)$ – функция распределения вероятности i -го класса с математическим ожиданием u_i .

Тогда на основе (1.21) может быть предложена модель возмущающих воздействий, приведенная на рис.1.3. Работает она следующим образом. Генераторы $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_k$ (по числу классов в смеси) выдают случайные сигналы с математическими ожиданиями, равными нулю, и единичными среднеквадратическими отклонениями $\sigma_1=\sigma_2=\dots=\sigma_k$. В множительных устройствах M_1, M_2, \dots, M_k указанные сигналы умножаются на заданные значения среднеквадратических отклонений $\sigma_1^*, \sigma_2^*, \dots$

σ_k^* и подаются на входы сумматоров $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$, где они суммируются с сигналами задачиков математических ожиданий m_1^*, m_2^*, \dots

m_k^* . Следовательно, на выходах сумматоров $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ сигналы имеют заданные математические ожидания и дисперсии компонентов смеси возмущающего воздействия.

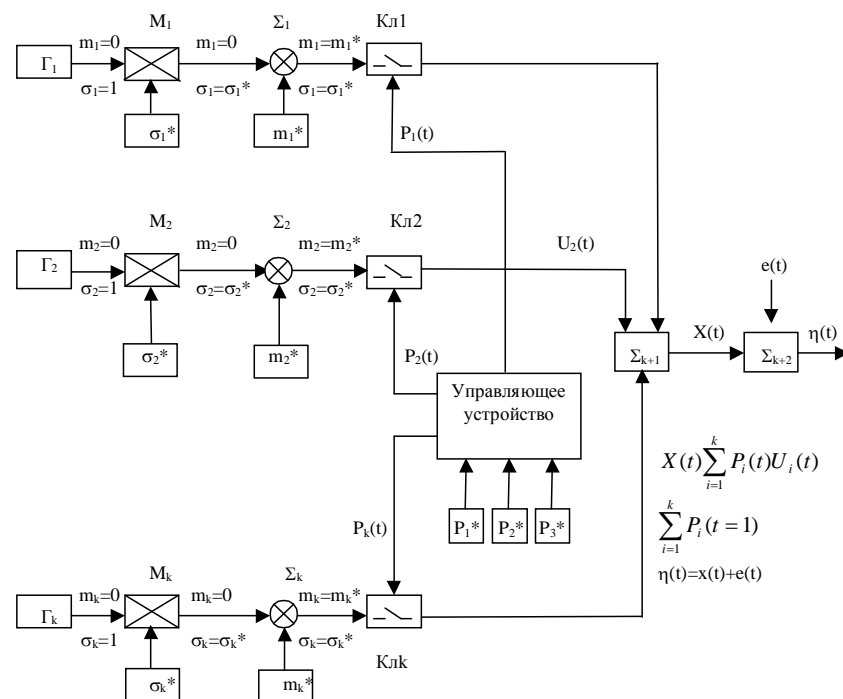


Рис. 1.3. Схема модели возмущающих воздействий

$$\text{sgn}(M\{\beta_1 - \beta_1^*\} - \delta_1^*) = \begin{cases} 1; M\{\beta_1 - \beta_1^*\} - \delta_1^* > 0 \\ 0; M\{\beta_1 - \beta_1^*\} - \delta_1^* \leq 0, \end{cases} \quad (6.47)$$

где M – символ математического ожидания;
 $k'_1 - k'_3$ – константы, определяемые экспериментально при наладке системы управления на объекте;
 δ_1^*, δ_2^* – зоны нечувствительности системы и корректирующему воздействию соответственно по концентрации твердого в сливе сгустителя и плотности оборотной воды.

Для сгустителя шламовых вод алгоритм имеет более простой вид:

$$\rho_2 = \begin{cases} \rho_2^*[1 + k'_4(M\{\beta_2 - \beta_2^*\} - \delta_3^*)\text{sgn}(M\{\beta_2 - \beta_2^*\} - \delta_3^*)]; \rho_{2\min} < \rho_2 < \rho_{2\max} \\ \rho_{2\min}; \rho_2^* \leq \rho_{2\min}; \\ \rho_{2\max}; \rho_2^* \geq \rho_{2\max}; \end{cases} \quad (6.48)$$

$$\text{sgn}(M\{\beta_2 - \beta_2^*\} - \delta_3^*) = \begin{cases} 1; M\{\beta_2 - \beta_2^*\} - \delta_3^* > 0 \\ 0; M\{\beta_2 - \beta_2^*\} - \delta_3^* \leq 0, \end{cases}$$

где δ_3^* – зона нечувствительности к корректирующему воздействию по содержанию твердого продукта в сливе сгустителя;
 k'_4 – коэффициент.

На основе полученных результатов исследований разработана аппаратура автоматизации типа КАУС.1. Она выполняет следующие функции:

- автоматическую стабилизацию заданного значения содержания твердой фазы в сливе сгустителя флотоотходов;
- автоматическое поддержание плотности сгущенного продукта в заданном интервале плотностей;
- автоматическое регулирование расхода флокулянта в питании сгустителя пропорционально нагрузке по твердому;
- автоматическую коррекцию расхода флокулянта по плотности оборотной воды или по высоте осветленного слоя (для сгустителей со взвешенным слоем);
- автоматическую коррекцию заданного значения плотности сгущенных отходов флотации по концентрации твердой фазы слива сгустителя или высоты осветленного слоя;
- автоматическое и дистанционное управление гребковой фермой или подъемом гребков (для сгустителей со взвешенным слоем);
- диагностирование состояния основных технических средств с локализацией и сигнализацией отказов;

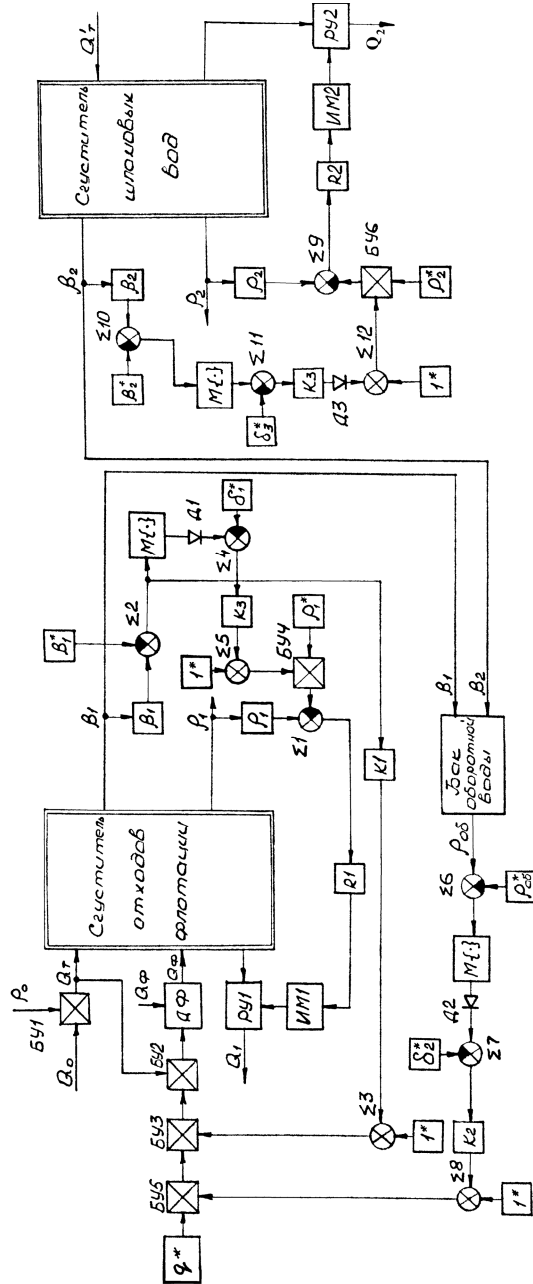


Рис. 6.11. Функциональная схема системы автоматического управления процессами сточения шламовых вод и осветления отходов флотации: БУ1-БУ6 – блоки умножения, ДФ – датозатор флюкулянта с устройством управления, РУ1-РУ2 – регуляторы, I* – задатчики единичных сигналов, ИМ1, ИМ2 – исполнительные механизмы, Σ1-Σ12 – сумматоры, I* – задатчики единичных сигналов, σ₁^{*}-σ₃^{*} – задатчики смещений сигналов, R1, R2 – регуляторы, K1-K3 – усилители, Д1-Д3 – диоды

Эти сигналы необходимо смешать с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_k так, чтобы $\sum_{i=1}^k p_i = 1$. Это осуществляется следующим образом. Сигналы с сумматоров $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ подаются на входы ключей $K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1k}$, выходы которых подключены к сумматору Σ_{k+1} . Замыкание ключей осуществляет управляющее устройство с заданными вероятностями $p_1^*, p_2^*, \dots, p_k^*$, причём одновременно может быть включен только один ключ. С сумматора Σ_{k+1} сигнал подается в сумматор Σ_{k+2} , на один из входов которого подается шум $e(t)$. На выходе сумматора Σ_{k+2} сигнал $\eta(t)=x(t)+e(t)$, т.е. соответствует возмущающему воздействию, состоящему из “k” классов с математическими ожиданиями $m_1^*, m_2^*, \dots, m_k^*$, среднеквадратическими отклонениями $\sigma_1^*, \sigma_2^*, \dots, \sigma_k^*$ и вероятностями $p_1^*, p_2^*, \dots, p_k^*$.

Реализация приведенной модели может быть выполнена программно в дискретном виде на ЭВМ. Тогда алгоритм имеет следующий вид:

$$x[n] = \text{sgn}\{p_1^* - \alpha[n]\}F_1(x[n]/u_1, \sigma_1) + [1 - \text{sgn}\{p_1^* - \alpha[n]\}]F_2(x[n]/u_2, \sigma_2);$$

$$\text{sgn}\{p_1^* - \alpha[n]\} = \begin{cases} 1, & \text{если } (p_1^* - \alpha[n]) \geq 0; \\ 0, & \text{если } (p_1^* - \alpha[n]) < 0, \end{cases} \quad (1.22)$$

где p_1^* – заданная вероятность появления первого класса в смеси; $\alpha[n]$ – последовательность случайных, равномерно распределённых чисел на интервале $[0,1]$ в дискретные моменты времени $n=0,1,2,\dots$; $F_1(\cdot), F_2(\cdot)$ – функции, генерирующие последовательности нормально распределённых случайных чисел соответственно для первого и второго классов с математическими ожиданиями u_1 и u_2 , среднеквадратическими отклонениями σ_1 и σ_2 .

Величина шага $\gamma[n]$ при вычислении принималась равной $\gamma[n]=n^{-1}$.

С целью доказательства правомерности представления возмущающих воздействий как математической смеси различных классов, при помощи предложенной модели сгенерированы эталонные смеси с центрами классов $u_1=18$ и $u_2=32$ при равных и различных значениях дисперсий для непересекающихся, слабо пересекающихся и сильно пересекающихся двух классов и разных вероятностях компонентов смеси. Количество классов в смеси может быть определено по числу существенных максимумов плотности распределения вероятности, которые можно восстановить методом гистограмм или методом Я.З.Цыпкина [14].

Недостатками гистограммного метода являются неопределенность при выборе способа разбиения пространства признаков и неудовлетворительность оценки вблизи границ областей разбиения, где оценка

претерпевает разрыв, необходимость иметь весьма большие выборки. Эти недостатки являются общими для непараметрических методов оценивания.

1.6. Восстановление плотности вероятностей процессов

Наиболее перспективным направлением решения задачи автоматической классификации является адаптивный подход, разработанный Я.З.Ципкиным в работе [14], когда не требуется априорной информации о вероятностных характеристиках и принадлежности их к тем или иным классам. Для каждой неизвестной области X_k вводится функция потерь $F_k(x, U)$, где $U=(u_1, \dots, u_m)$ – заранее неизвестный составной вектор.

Тогда качество классификации может быть оценено средним риском:

$$R = \sum_{k=1}^m F_k(x, U)p(x), \quad (1.23)$$

где $p(x)$ – плотность распределения вероятности.

Решающее правило получается из условия минимума среднего риска

$$f_{km}(x, U) = F_k(x, U) - F_m(x, U) = 0. \quad (1.24)$$

Принадлежность ситуации x области (классу) X_k определяется знаком решающего правила

$$x \in X_k, \text{ если для всех } m \neq k \text{ } f_{km}(x, U) = 0. \quad (1.24)$$

Задание функции штрафов $F_k(x, U)$ однозначно определяет уравнение решающего правила.

Оценка неизвестной плотности распределения вероятностей рассмотрена в работах [15]. Допустим, что наблюдаемое множество X исследуемого параметра состоит из нескольких непересекающихся подмножеств X_k , соответствующих различным классам наблюдаемого множества X . Решение задачи восстановления плотности распределения вероятностей состоит в нахождении числа составляющих подмножеств X_k (числа классов) и их оценок.

Согласно [15] совместная плотность распределения вероятности исследуемого параметра x

$$P(x) = \sum_{k=1}^m p_k p_k(x), \quad (1.25)$$

где p_k – вероятность появления образа x из подмножества X_k ;
 $p_k(x)$ – условная плотность распределения вероятности наблюдаемого параметра x внутри соответствующего подмножества X_k .

где $\rho_{1\text{сл}}, \rho_{2\text{сл}}$ – плотности сливов сгустителя отходов флотации и шламовых вод соответственно;

$$\rho_{1\text{сл}} = \beta_1 \left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ТВ}}}\right) + \rho_{\text{ж}}, \quad (6.44)$$

где $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{ТВ}}$ – плотности жидкой и твердой фазы соответственно;
 $Q_{1\text{сл}}, Q_{2\text{сл}}$ – расходы осветленной воды сгустителей отходов флотации и шламовых вод соответственно.

Аналогично (6.42) определяется $\rho_{2\text{сл}}$.

На основе полученных результатов исследований процессов сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации разработан принцип построения системы автоматического управления. Суть его заключается в следующем. Основное возмущающее воздействие по нагрузке на входе процесса сгущения отходов флотации компенсируется соответствующим изменением расхода флокулянта, определяемого по формуле

$$Q_{\text{ф}} = q^* \cdot Q_0 \rho_0, \quad (6.45)$$

где q^* – удельный расход флокулянта.

Оставшийся разбаланс компенсируется за счет изменения удельного расхода флокулянта пропорционально разности заданного и текущего значений содержания твердого продукта в сливе. Одновременно стабилизируется плотность сгущенного продукта в заданном диапазоне, путем изменения его расхода, а зависимость содержания твердого в сливе от плотности сгущенного продукта учитывается путем коррекции задания плотности сгущенного продукта пропорционально разности заданного и текущего значений содержания твердого в сливе.

Регулирование процесса сгущения шламов ведется только путем стабилизации заданной плотности сгущенного продукта и ее коррекции по содержанию твердого в сливе сгустителя.

На рис.6.11 приведена структурная схема системы автоматического управления, реализующей следующей алгоритм управления для сгустителя отходов флотации:

$$Q_{\text{ф}} = Q_0 \rho_0 q^* \{ [1 + k_1' M\{\beta_1 - \beta_1^*\}] [1 + k_2' (M\{\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{об}}^*\} - \delta_2^*) \text{sgn}(M\{\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{об}}^*\} - \delta_2^*)] \}; \quad (6.46)$$

$$\rho_1 = \begin{cases} \rho_1^* [1 + k_3' (M\{\beta_1 - \beta_1^*\} - \delta_1^*) \text{sgn}(M\{\beta_1 - \beta_1^*\} - \delta_1^*)]; & \rho_{1\text{min}} < \rho_1 < \rho_{1\text{max}} \\ \rho_{1\text{min}}; & \rho_1^* \leq \rho_{1\text{min}}; \\ \rho_{1\text{max}}; & \rho_1^* \geq \rho_{1\text{max}}; \end{cases}$$

$$\text{sgn}(M\{\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{об}}^*\} - \delta_2^*) = \begin{cases} 1; & M\{\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{об}}^*\} - \delta_2^* > 0 \\ 0; & M\{\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{об}}^*\} - \delta_2^* \leq 0 \end{cases}$$

С целью синтеза системы автоматического управления процессами сгущения выполнен статистический анализ основных режимных параметров.

Результаты статистической обработки информации приведены в табл.6.5.

Таблица 6.5

Оценки статистических характеристик			
Наименование параметров	Значение параметров		
	Математическое ожидание	Дисперсия	Время корреляции, мин
Плотность отходов флотации, кг/м ³	1018	4.2	300
Расход отходов флотации, м ³ /ч	444	337,2	116,7
Расход флокулянта, м ³ /ч	1,4	0,36	-
Плотность сгущенных отходов флотации, кг/м ³	1040	256	66,7
Содержание твердого в сливе сгустителя отходов флотации, г/л	1,86	2,6	-
Плотность сгущенного продукта шламовых вод, кг/м ³	1092	47,4	466,6
Содержание твердого в сливе сгустителя шламовых вод, г/л	61,8	3,5	-
Плотность оборотной воды, кг/м ³	1025	1,8	150
Зольность отходов флотации, %	73,5	6,08	-

Плотность оборотной воды определяется как средневзвешенное значение плотности сливов сгустителей шламовых вод и отходов флотации

$$\rho_{\text{Об}} = \frac{\rho_{\text{Исл}} Q_{\text{Исл}} + \rho_{\text{Сл}} Q_{\text{Сл}}}{Q_{\text{Исл}} + Q_{\text{Сл}}}, \quad (6.43)$$

Аппроксимируем (1.25) набором функций согласно [14]

$$P(x) = \sum_{v=1}^N c_v \varphi_v(x), \quad (1.26)$$

где c_v - неизвестный коэффициент;
 $\varphi_v(x)$ - система ортонормированных функций:

$$\int_x \varphi_v(x) \varphi_\mu(x) dx = \begin{cases} 0, & v \neq \mu; \\ 1, & v = \mu. \end{cases} \quad (1.27)$$

Коэффициент c_v определим так, чтобы функционал

$$J(c) = \int_x [p(x) - \sum_{v=1}^N c_v \varphi_v(x)]^2 dx \quad (1.28)$$

достигнул минимума.

Это имеет место при

$$c_v = M\{\varphi_v(x)\}, \quad (1.29)$$

где M - оператор математического ожидания.

Алгоритм восстановления плотности распределения вероятности по наблюдениям получен Я.З.Ципкиным [16] в следующем виде:

$$\hat{p}[n-1](x[n]) = \sum_{v=1}^N c_v[n-1] \varphi_v(x[n]); \quad (1.30)$$

$$c_v[n] = c_v[n-1] - \gamma[n](c_v[n-1] - \varphi_v(x[n])),$$

где $\hat{p}[n-1]$ - оценка вероятности класса на (n-1) шаге;

n - номер шага ($n=1, 2, \dots, n$);

$\gamma[n]$ - коэффициент, определяющий величину шага;

$$\gamma[n] > 0; \sum_{n=1}^{\infty} \gamma[n] = \infty; \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^2[n] < \infty. \quad (1.31)$$

Выбор функции $\varphi_v(x)$ представляет достаточно сложную задачу, так как при неудачном выборе могут появиться ложные центры классов, которые исказят вид плотности распределения вероятностей исследуемого процесса. На точность аппроксимации значительное влияние оказывает также величина шага $\gamma[n]$.

При выборе вида функции $\varphi_v(x)$ А.С.Меняйленко рассмотрел возможность использования ортонормированных функций Лягерра, Хаара, Уолша, Эрмита, Лежандра первого рода, Чебышева, Якоби-Каутца, Радомахера, Фурье и прямоугольных гармонических функций для равномерного и нормально распределенных вероятностей случайных чисел. Плотность распределения вероятностей равномерно распределенных чисел:

$$p(x) = f(x) = \begin{cases} 0; a > x; \\ c = \frac{1}{b-a}; a \leq x \leq b; \\ 0; x > b, \end{cases} \quad (1.32)$$

при $a=0, b=1$.

Плотность распределения вероятностей нормально распределенных случайных чисел

$$P(x) = f(x) = \frac{e^{-\frac{(x[n]-a)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (1.33)$$

при $a=0, \sigma^2(x)=1$.

Показателем качества аппроксимации выбрано значение функционала

$$J[\varphi_v(x)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [p(x_i) - \sum_{v=1}^N c_v \varphi_v(x_i)]^2, \quad (1.34)$$

где $n=200$.

Причем для равномерно распределенных чисел выражение (1.34) представляет собой дисперсию:

$$\begin{aligned} D[\varphi_v(x)] &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [p_i - M\{p_i\}]^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [M\{p_i\} - p_i]^2 = \\ &= \frac{1}{n} [M\{\sum_{v=1}^N c_v \varphi_v(x[n])\} - \sum_{v=1}^N c_v \varphi_v(x[n])]^2. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Ввиду того, что $\int p(x)dx = 1$, необходимо ввести нормируемый множитель ξ_φ . Тогда

$$J(\varphi[x[n]]) = \xi_\varphi^2 D(\varphi_v(x[n])). \quad (1.36)$$

Для равномерного распределения случайных чисел $f(x[n]) = c$, поэтому

$$\xi_\varphi = \frac{c}{M\{\sum_{v=1}^N C_v \varphi_v(x[n])\}}, \quad (1.37)$$

где c – константа.

Аналогично для нормально распределённых случайных чисел нормирующий множитель

$$\xi_\varphi = \frac{c}{\sigma\{x[n]\}\sqrt{2\pi} \sum_{v=1}^N C_v \varphi_v(M\{x[n]\})}. \quad (1.38)$$

Возмущающими воздействиями являются изменения расходов и плотностей исходного питания (нагрузка по твердому).

Соответственно определены передаточные функции по соответствующим каналам (табл.6.4).

Таблица 6.4

Параметры передаточных функций					
Канал управления (возмущения)		Параметры			
Вход	Выход	Коэфф. усиления		Постоянная времени, с	Время запаздывания, с
		размерность	величина		
Сгуститель флотоотходов					
Q ₁	ρ ₁	$\frac{\text{кг} \cdot \text{ч}}{\text{м}^6}$	2,29	680-820	0
Q ₁	β ₁	$\frac{\text{г} \cdot \text{ч}}{\text{лм}^3}$	0,006	920-1068	0
Сгуститель шламовых вод					
Q' _T	ρ ₂	$\frac{\text{кг} \cdot \text{ч}}{\text{м}^6}$	0,63	180-360	0
Q ₂	β ₂	$\frac{\text{г} \cdot \text{ч}}{\text{лм}^3}$	0,46	300-600	0

Данные табл.6.4 получены при исследовании радиального сгустителя на ЦОФ “Дзержинская” объединения “Донецкуглеобогатение”.

Передаточные функции в общем виде аппроксимируются апериодическими звеньями с чистым запаздыванием:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau_3 p}}{T_p + 1}, \quad (6.41)$$

где k – коэффициент усиления;

T – постоянная времени, зависящая от производительности по питанию и расхода сгущенного продукта;

τ_3 – время чистого запаздывания.

Чистое запаздывание имеет место при управлении по шкалам с участием расхода флокулянта.

рис.6.10а приведена структурная схема сгустителя отходов флотации, а на рис.6.10б - сгустителя шламовых вод.

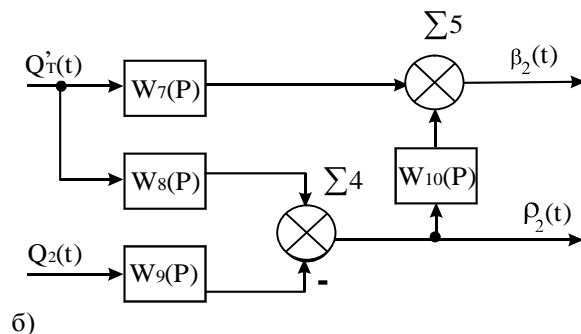
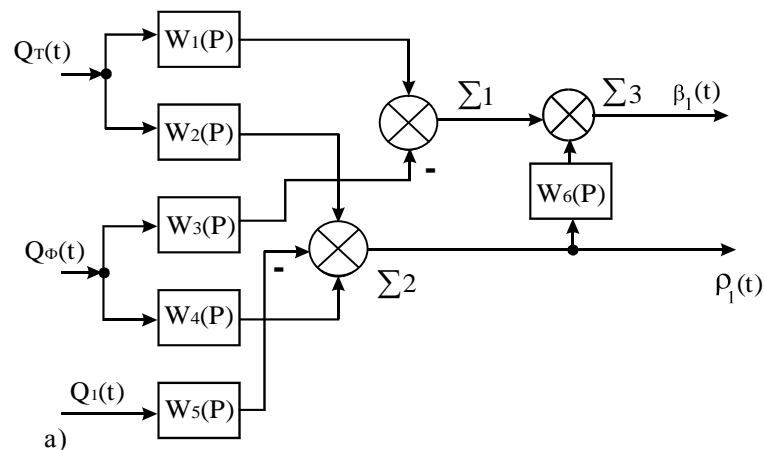


Рис. 6.10. Структурные схемы объектов управления: сгустителя отходов флотации (а), сгустителя шламовых вод (б)

В связи с тем, что необходимо переработать все отходы флотации и шламовые воды, нагрузку Q_T по твердому нельзя использовать в качестве управляющего воздействия. Управляющими воздействиями процесса сгущения отходов флотации могут быть расход флокулянта и расход сгущенного продукта, а для сгустителя шламовых вод только расход сгущенного продукта.

В результате исследований установлено, что в качестве функций $\varphi_v(x)$, удовлетворяющих условию (1.26), наиболее целесообразно использовать функции Эрмита, так как они ортонормированны на интервале $(-\infty, \infty)$, включающие все возможные значения исследуемого параметра [22]:

$$\varphi_v(x) = \frac{(-1)^v}{\sqrt{2^v v!}} \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{\pi}} \frac{d^v (e^{-x^2})}{dx^v} \quad (1.39)$$

Причем установлено, что необходимо выбирать $v=1,2,\dots,7$.

При этом исходные данные пронормированы следующим выражением:

$$X[n] = \frac{x[n] - M\{x[n]\}}{\sigma(x[n])} \quad (1.40)$$

где $x[n]$ - наблюдаемая реализация параметра в дискретный момент времени n ;

$\sigma(x[n])$ - среднеквадратическое отклонение наблюдаемого параметра.

Выбор шага обусловлен конкретными условиями. При отсутствии помех целесообразно использовать постоянный шаг $\gamma(t)=\gamma_0=\text{const}$, так как постоянная обратная связь обеспечивает более быстродействующий процесс сходимости. При наличии помех величина шага должна быть переменной и удовлетворять условиям (1.31), например

$$\gamma[n] = \frac{d_0}{n}, \quad (1.41)$$

где d_0 - константа.

Оценка параметров центров классов может быть выполнена по выражениям (1.26) и (1.30), хотя это достаточно сложно. Поэтому алгоритм (1.26) может использоваться при определении числа составляющих подмножеств X_k (классов), а для разделения на классы и определения их средних значений целесообразно использовать самообучающиеся идентификаторы.

На рис. 1.4 приведены примеры восстановления плотности вероятностей эталонных смесей по алгоритмам (1.26) и (1.30) при различной степени пересечения классов, восстановленные методами стохастической аппроксимации по наблюдениям, откуда следует, что указанные алгоритмы позволяют идентифицировать параметры случайных процессов в случаях непересекающихся и слабо пересекающихся классов. В случае сильно пересекающихся классов с равными математическими ожиданиями и различными дисперсиями выделяется только один класс (см.рис.1.4г). Минимальная длина обучающейся последовательности

составляет при этом 45-60 точек.

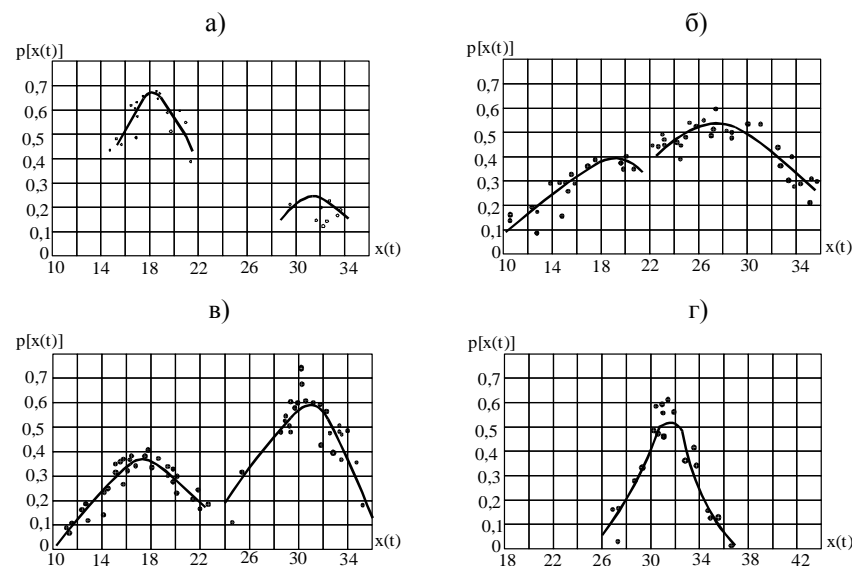


Рис. 1.4. Распределение плотности вероятностей эталонной смеси двух классов: непересекающихся (а), слабо пересекающихся (б), сильно пересекающихся (в) и с равными центрами классов $u_1=u_2=32$ (г)

Изложенная выше методика была использована при восстановлении плотности вероятностей реализаций режимных параметров объектов шахт и обогатительных фабрик. В качестве примера на рис.1.5 приведены графики распределения вероятностей зольности рядового угля, влажности угля, поступающего на сушку, и высушенного угля, влажности топлива, определенные по приведенным алгоритмам восстановления. Анализ графиков дает основание утверждать, что параметры процессов выемки и обогащения угля представляют собой в большинстве случаев смесь двух классов со средними значениями u_1 и u_2 , а в некоторых случаях - смесь трех классов.

Автоматическое управление такими объектами никем не рассматривалось. По-видимому, в этом случае могут оказаться эффективными адаптивные методы управления при условии идентификации параметров классов возмущающих воздействий по наблюдениям и компенсации этих возмущений.

верхнего предела, температура и pH среды сгущения в процессе работы ее изменялись. Исследования проведены в условиях центральных обогатительных фабрик “Дзержинская” и “Донецкая”.

В процессе исследований автоматически при помощи соответствующих датчиков измерялись объемные расходы флокулянта, отходов флотации, сгущенного продукта, плотности сгущенного продукта сгустителя шламовых вод и отходов флотации, концентрации твердых частиц слива сгустителя отходов флотации и их зольность. Контроль концентрации твердой фазы в сливе сгустителя шламовых вод и плотность оборотной воды, а также дополнительно и зольность отходов флотации осуществляется методом отбора и химического анализа проб. При этом погрешность измерения составили: расхода флокулянта - меньше 1,0%, плотности сгущенного продукта - около 4,0%, концентрации твердого в сливе - до 2,0%, зольности отходов флотации - до 1,5%, относительных расходов пульпы - до 4,0%.

Полученные данные были использованы для определения уравнений регрессии между соответствующими выходными и режимными параметрами и коэффициентов парной корреляции, характеризующих статистику объекта управления. Установлено, что наиболее тесная корреляционная связь существует между концентрацией β_1 твердых частиц в сливе сгустителя и нагрузкой Q_T по твердому продукту в питании, а также расходом Q_F флокулянта; между плотностью ρ_1 сгущенного продукта и Q_T и Q_F (коэффициент корреляции составил 0,36-0,7). Кроме того, обнаружена зависимость β_1 от плотности ρ_1 с коэффициентом корреляции 0,29-0,48, а плотность сгущенного продукта зависит от его расхода Q_1 .

В связи с нестационарностью процессов коэффициенты корреляции имеют различные значения не только при изменении условий работы, но и при изменении характеристик сырьевой базы и по другим причинам. Поэтому можно только установить вероятный диапазон их изменения.

Уравнения регрессий в общем виде для сгустителя отходов флотации имеют следующий вид:

$$\beta_1 = k_1 Q_T - k_2 Q_F + k_3 \rho_1 \quad (6.39)$$

$$\rho_1 = k_4 Q_T + k_5 Q_F - k_6 Q_1, \quad (6.40)$$

где k_1-k_6 - коэффициенты, зависящие от конкретных условий эксплуатации, типа сгустителя, характеристик шламовых вод и обогащаемого сырья и т.п. Причем знак коэффициента k_3 может быть как положительным, так и отрицательным.

Для сгустителя шламовых вод имеют место аналогичные зависимости (без второго члена, отражающего влияние флокулянта). На

методы идентификации по наблюдениям (активные и пассивные). На рис.6.9 приведена общая схема технологического процесса сгущения и осветления с использованием радиальных сгустителей, получившая наибольшее распространение на фабриках.

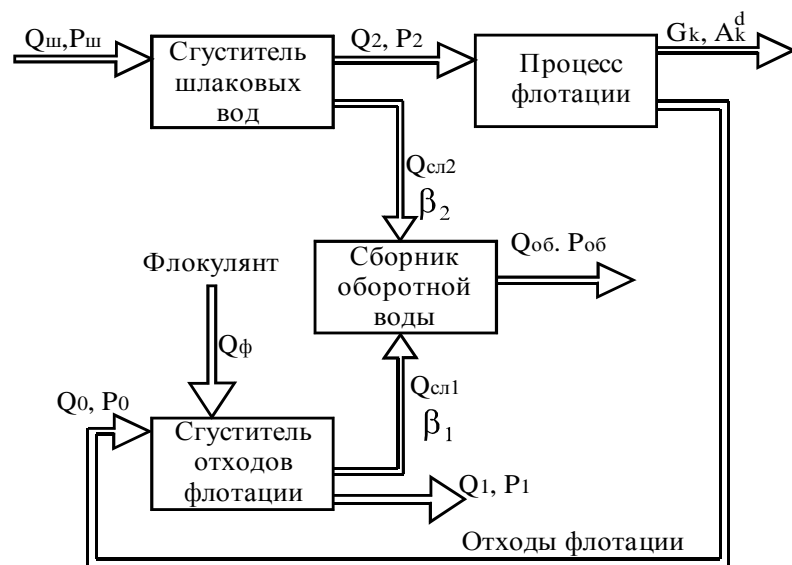


Рис. 6.9. Технологическая схема процесса сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации ($Q_{ш}$, Q_0 , Q_1 , Q_2 , $Q_{сл}$, $Q_{об}$, $Q_{ф}$ – расходы шламовых вод, отходов флотации, сгущенных продуктов сгустителей отходов флотации и шламовых вод, слива этих же сгустителей, оборотной воды и флокулянта, соответственно; $\rho_{ш}$, ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 , $\rho_{об}$ – плотности шламовых вод, отходов флотации, сгущенных продуктов и оборотной воды, соответственно; β_1 , β_2 – содержание твердого в сливе сгустителей отходов флотации и шламовых вод; G_k – количество концентрата в единицу времени)

Целью экспериментальных исследований было получение уравнений статики и динамики, а также статических характеристик возмущающих воздействий, необходимых для разработки концепции управления (выбор управляющих воздействий) и синтеза системы автоматического управления. При этом были приняты следующие допущения: гранулометрический состав твердых частиц в питании ограничен размерами

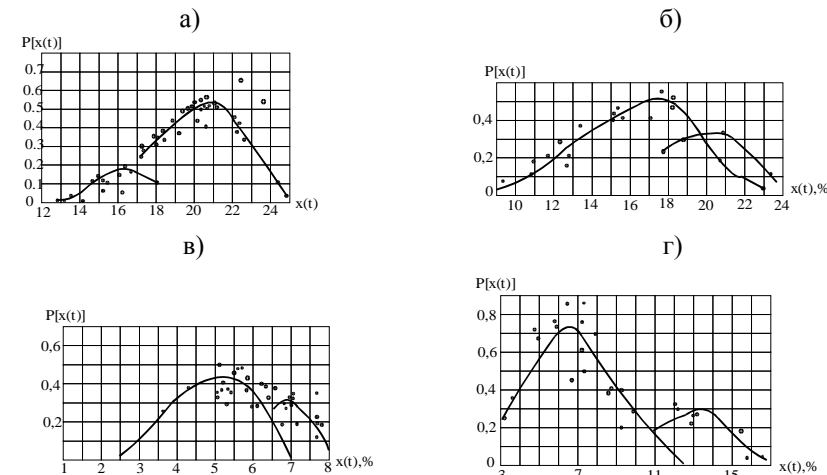


Рис. 1.5. Распределение плотности вероятностей зольности рядового угля (а), влажности высушенного угля (б), влажности поступающего на сушку угля (в), влажности поступающего на сушку топлива (г)

1.7. Область применения адаптивных систем управления

Нестационарность динамических характеристик процессов горно-го производства, сложный характер возмущающих воздействий, жесткие требования по быстродействию и точности управления обуславливают необходимость использования адаптивных методов. Зависимость указанных характеристик от условий работы при функционировании даже однотипного оборудования не позволяет унифицировать технические средства автоматизации, построенные традиционными методами. Причем наибольшее влияние на качество процессов управления оказывают изменение коэффициента усиления объекта, наличие чистого запаздывания и широкий диапазон изменений параметров возмущающих воздействий. Изменение постоянной времени объекта управления в меньшей степени сказывается на ухудшении показателей качества процесса регулирования, однако при наличии значительной величины чистого запаздывания такие изменения могут приводить даже к потере устойчивости.

Поэтому при определении возможной области применения адаптивных методов управления следует учитывать изменения любого динамического и статического параметра. При этом априори можно не рас-

смагивать объекты, при автоматическом управлении которыми не предъявляются жесткие требования по быстродействию и точности управления. К таким задачам можно отнести регулирование уровней жидких продуктов в технологических емкостях, плотности и расходов пульпы, скорости вращения приводов и т.п.

В табл. 1.1 приведен примерный перечень систем автоматического управления основных объектов управления добычи и обогащения угля, для которых целесообразно применять адаптивные методы автоматического управления.

Таблица 1.1

Область применения адаптивных систем управления

Наименование системы управления	Основные функции системы управления	Цель использования адаптивных методов
1	2	3
САУ режимом работы очистного (проходческого) комбайна.	1.Стабилизация производительности комбайна при отсутствии ограничений по нагрузке. 2.Стабилизация нагрузки привода при отсутствии ограничений по производительности.	Компенсация изменения коэффициента усиления объекта.
САУ системой очистной комбайн – конвейер.	1.Стабилизация производительности конвейера при отсутствии ограничений. 2.Стабилизация нагрузки наиболее нагруженного привода конвейера и комбайна.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания объекта.
САУ системой очистной комбайн – предохранительная лебедка.	Синхронизация скоростей движения предохранительного каната и подачи комбайна.	Компенсация изменения постоянной времени объекта.
САУ концентраций метана на исходящей струе воздуха.	1.Стабилизация концентрации метана на исходящей струе воздуха. 2.Защита от недопустимых концентраций метана в призабойном пространстве.	Компенсация изменений коэффициента усиления и чистого запаздывания объекта.

В процессе испытаний аппаратуры КАУФ.1 установлено, что при её применении выход флотоконцентрата увеличился на 0,36% по сравнению с аппаратурой САРФ-3. Затраты окупаются за 4 месяца эксплуатации комплекса.

Применение контроллера МБ57.03 обеспечило снижение металлоемкости пультов, уменьшение количества оригинальных электронных узлов и блоков, снижение потребляемой мощности, автодиагностику отказов, более высокую надежность и ремонтпригодность аппаратуры.

На основании положительных результатов испытаний комплекс КАУФ.1 рекомендован к серийному производству.

6.5. Система автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации

Процессы сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации оказывают существенное влияние на функционирование гравитационных процессов обогащения угля, поскольку качество разделения в отсадочных машинах, сепараторах и гидроциклонах зависит от плотности оборотной воды и ее стабильности во времени. Обычно допускается содержание твердых примесей на сливе до 30кг/м^3 для сгустителей отходов флотации и до 150кг/м^3 для сгустителей шламовых вод при обеспечении заданного диапазона изменения плотности сгущенного продукта (содержание твердой фазы в сгущенном продукте $140\text{--}400\text{кг/м}^3$).

Опыт эксплуатации сгустителей показал, что при ручном управлении невозможно обеспечить приемлемые показатели сгущения и осветления. Это приводит помимо снижения эффективности гравитационного обогащения угля также и к повышенному расходу флокулянта.

Поэтому целью автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации является стабилизация содержания твердых продуктов в сливе на допустимом уровне и поддержание плотности сгущенного продукта в заданном диапазоне при минимальном расходе флокулянта. При разработке системы автоматического управления этими процессами встретились значительные трудности, связанные с недостаточной их изученностью, что не позволило получить соответствующую математическую модель, исходя из описания физико-химических явлений, происходящих при сгущении и осветлении, особенно с использованием флокулянтов.

Поэтому при разработке системы автоматического управления для определения математической модели процессов сгущения и осветления как объектов управления были использованы экспериментальные

Управление дозаторами реагентов осуществлялось программируемым микроконтроллером МБ57.03 ГСП МикроДАТ, регулирование процессов - регулирующим микропроцессором Ремиконт-100.

Аппаратура испытывалась в следующих условиях:

- температура окружающей среды 5-36°C;
- влажность окружающего воздуха 72-96%;
- запыленность окружающей среды 4,5-10мг/м³;
- виброперемещение 0,01-0,1мм;
- напряжение питающей сети 187-260В.

Технологические параметры флотационного отделения:

- расход исходной пульпы 780-860м³/ч;
- плотность исходной пульпы 70-120г/л;
- зольность исходного продукта 12-22%;
- зольность отходов флотации 60-82%;
- зольность флотоконцентрата 6-10%;
- плотность отходов флотации 30-50г/л.

Промышленные испытания проведены на ЦОФ "Сибирь", где 60% общего количества реагентов подается в начало процесса, а 40% - дробно, по камерам флотомашин. Были заданы следующие удельные расходы реагентов: собирателя 3,5л/т, пенообразователя 6кг/м³, соответственно, расходы через дозаторы основного собирателя 168л/ч, дробного - 112л/ч, основного пенообразователя 2,9л/ч и дробного 1,9л/ч.

Анализ результатов исследований дозаторов реагентов показал, что среднеквадратическое отклонение расчетных и экспериментальных данных составило 1,84л/ч; абсолютная погрешность дозирования реагентов при доверительной вероятности 0,95 составила 3,68л/ч (2,2%). Погрешность контроля плотности пульпы составила около 6,0г/л или 6,1%, погрешность контроля объемного расхода пульпы – до 10%.

Эффективность работы аппаратуры оценивалась точностью стабилизации зольности флотоконцентрата по сравнению с аппаратурой аналогичного назначения САРФ-3 [3], внедренной ранее на этой фабрике. Анализ результатов измерений зольности флотоконцентрата показал, что при автоматической стабилизации зольности концентрата среднеквадратическое отклонение зольности составило 0,106% абс., а при косвенном управлении, реализованном в аппаратуре САРФ-3, эта величина в 3,62 раз больше (0,384% абс.). Соответственно погрешность стабилизации зольности флотоконцентрата при доверительной вероятности $p=0,95$ для комплекса КАУФ.1 составила 0,212% абс. (2,6% отн.), а для аппаратуры САРФ-3 - 0,68% абс. (10,1% отн.).

Зольность отходов флотации соответствовала заданию: $A^d_0 \geq A^{d*}_0 = 64\%$.

Продолжение табл. 1.1.

1	2	3
САУ режимом работы магистрального конвейера.	1.Стабилизация производительности конвейера при отсутствии ограничений. 2.Регулирование степени натяжения ленты конвейера. 3.Стабилизация нагрузки конвейера при ограничениях производительности.	Компенсация изменений времени чистого запаздывания.
САУ проветриванием шахты.	1.Стабилизация расхода воздуха, поступающего в шахту. 2.Регулирование концентрации метана на исходящей струе шахты.	Компенсация времени чистого запаздывания и коэффициента усиления объекта.
САУ подготовкой шихты рядовых углей на обогатительной фабрике.	1.Стабилизация производительности питателя. 2.Стабилизация нагрузки на секцию фабрики. 3.Стабилизация долевого участия шахтогрупп в шихте.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания.
САУ процессом обогащения угля в минеральной суспензии.	1.Стабилизация (оптимизация) зольности концентрата. 2.Регулирование вязкости суспензии. 3.Регулирование уровней суспензии в технологических емкостях.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания.
САУ процессом обогащения в отсадочных машинах.	1.Стабилизация (оптимизация) зольности концентрата. 2.Регулирование высоты отсадочной постели. 3.Регулирование разрыхленности отсадочной постели.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания.
САУ процессом флотации угля.	1.Стабилизация зольности концентрата. 2.Регулирование зольности отходов флотации. 3.Регулирование подачи флотореагентов.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания.

Продолжение табл. 1.1.

1	2	3
	4.Регулирование плотности и расхода пульпы на входе процесса. 5.Регулирование уровня пульпы в ваннах флотомашин.	
САУ процессами обезвоживания в фильтрах.	1.Регулирование производительности фильтра. 2.Регулирование влажности кека. 3.Синхронизация производительностей флотационного и фильтровального отделений. 4.Стабилизация уровней пульпы в фильтрах.	Компенсация изменений коэффициента усиления, постоянной времени и времени чистого запаздывания.
САУ сгущением угольных шламов и осветлением отходов флотации.	1.Регулирование содержания твердой фазы в сливе сгустителя. 2.Регулирование подачи флокулянта в процесс. 3.Регулирование плотности сгущенного продукта. 4.Регулирование плотности оборотной воды.	Компенсация изменений коэффициента усиления и времени чистого запаздывания.

В табл. 1.1 не приведены САУ процессами, в которых не наблюдается существенное изменение параметров (коэффициент усиления, постоянная времени), значительное время чистого запаздывания (переменное и постоянное), а также при отсутствии сложного характера формирования возмущающих воздействий. К ним отнесены САУ пространственным перемещением очистных механизированных комплексов и проходческих комбайнов, режимов работы рудничных локомотивов, подъемных и водоотливных установок, погрузки угля в железнодорожные вагоны и др. Это вовсе не исключает необходимость и эффективность использования адаптивных методов управления этими объектами, например, при наличии возмущающих воздействий типа смесей с переменными центрами классов или значительного диапазона изменения одного класса (например, клетевой подъем и др.). В сложных системах автоматического управления в качестве подсистем нижнего уровня могут использоваться более простые, не требующие адаптации, например, регуляторы уровней, плотности и др.

Для решения задачи поиска методов построения адаптивных сис-

Реагент поступает в дозаторы из баков стабилизации уровня реагента 3, 4, 6, 7. Основные дозаторы реагентов 3, 4, осуществляющие дозирование в начале процесса, производят подачу реагентов пропорционально объемной нагрузке, нагрузке по твердому продукту на флотоотделение с коррекцией по разности прогнозируемой и заданной зольности флотоконцентрата.

Дозаторы дробной подачи реагентов 6 и 7, осуществляющие дозирование по камерам флотомашин, производят подачу реагентов пропорционально объемной нагрузке, нагрузке по твердому продукту на флотоотделение с коррекцией по зольности отходов флотации.

Эмульгирование реагентов, а также распределение их по точкам технологического процесса в заданном соотношении производится распределителем реагентов 10.

Управление шиберами флотомашин 2 производится при помощи блоков исполнительных механизмов 5.

Изменение расхода исходной пульпы, поступающей на флотацию, производится регулирующей заслонкой 2 с блоком исполнительного механизма 5.

Регулирование плотности пульпы, поступающей на флотацию, производится путем добавления технической воды в исходную пульпу при помощи регулирующей заслонки 2 и блока исполнительного механизма 5.

При необходимости в комплексе предусмотрено дистанционное управление подачей реагентов, объемным расходом и плотностью исходной пульпы и уровнем в ванне флотомашин.

Комплекс имеет модульное исполнение и может применяться при различных технологических схемах флотационных отделений фабрики. С целью достижения необходимой адаптации к изменениям технологии, обычно имеющей место при эксплуатации фабрик, разработан типовой комплект комплекса, который может видоизменяться применительно к конкретным технологическим условиям.

Типовой комплект аппаратуры КАУФ.1 содержит пульта управления соответственно реагентным режимом, качеством и уровнями, дозаторы и распределители реагентов, блоки оценивания расхода, плотности, зольности отходов флотации, зольности концентрата и уровня пульпы, регулирующие заслонки, исполнительные механизмы, баки стабилизации уровня реагента и информационное табло.

Типовой комплект опытного образца аппаратуры КАУФ.1 прошел промышленные испытания в флотационном отделении ЦОФ "Сибирь" ПО "Кузбассуголеобогащение".

6) автоматическое регулирование расхода реагента-собираателя в начало процесса в соответствии с нагрузкой по твердому продукту:

$$M\{q_c(t)\} = k_1 \cdot M\{q(t)\} M\{\rho(t)\},$$

где q_c - расход реагента-собираателя; k_1 - коэффициент пропорциональности;

7) автоматическое регулирование расхода реагента-пенообразователя в начало процесса в соответствии с объемной нагрузкой:

$$M\{q_{\Pi}(t)\} = k_2 \cdot M\{q(t)\},$$

где q_{Π} - расход реагента-пенообразователя; k_2 - константа;

8) автоматическую коррекцию удельных расходов реагентов собирателя и пенообразователя при недопустимом снижении зольности отходов:

$$\begin{aligned} q_c(t) &= q_c^* + \Delta q_c(t); \quad q_{\Pi}(t) = q_{\Pi}^* + \Delta q_{\Pi}(t); \\ \Delta q_c(t) &= F_1(\Delta A_0^d)(1 - \operatorname{sgn} \Delta A_0^d); \\ \Delta q_{\Pi}(t) &= F_2(\Delta A_0^d)(1 - \operatorname{sgn} \Delta A_0^d); \\ \Delta A_0^d &= M\{A_0^d(t)\} - A_0^{d*}; \end{aligned} \quad (6.38)$$

$$\operatorname{sgn} \Delta A_0^d = \begin{cases} 1; & \Delta A_0^d > 0 \\ 0; & \Delta A_0^d \leq 0, \end{cases}$$

где q_c, q_{Π} - удельные расходы реагентов собирателя и пенообразователя соответственно;

q_c^*, q_{Π}^* - заданные удельные расходы реагентов;

F_1, F_2 - функции, в общем случае нелинейные;

$\Delta q_c, \Delta q_{\Pi}$ - приращения удельных расходов реагентов;

9) аварийную и технологическую сигнализацию.

В соответствии с приведенными выше функциями в аппаратуре предусмотрен автоматический контроль следующих параметров:

- расход исходной пульпы, фильтрата и технической воды блоками оценивания расхода 1;

- плотность исходной пульпы и отходов флотации блоками оценивания плотности 8;

- зольность исходного продукта, отходов флотации и зольность флотоконцентрата устройствами контроля зольности 9, 15 типов УЗПИ [51] и УЗОФ [52], соответственно;

- уровень пульпы в ваннах флотомашин блоками оценивания уровня 14.

Значения контролируемых параметров поступают в функциональную часть аппаратуры 11, 12, 13, где происходит их обработка по заданной программе и формирование соответствующих управляющих воздействий.

тем управления необходимо найти достаточно простые способы идентификации вероятностных параметров возмущающих воздействий по наблюдениям.

АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

2.1. Алгоритм идентификации

При разработке систем автоматического управления объектами горного производства необходимо учитывать свойства возмущающих воздействий, для чего желательно использовать автоматические идентификаторы по наблюдениям. При этом перспективным направлением является использование методов автоматической классификации, идеи использования которых изложены в работах [17,18] (решение задачи разделения смесей нормальных распределений), в [19] (байесовский подход и его различные варианты) и (метод потенциальных функций).

В указанных подходах необходимо заранее выбирать число классов и знать априорные плотности распределения смеси, что сужает область их применения. Наиболее перспективными являются адаптивные алгоритмы. Параметры распределения каждого класса могут быть определены адаптивным методом, изложенным в [14].

В соответствии с [14] условия минимума среднего риска имеют следующий вид:

$$\int_{X_k} \nabla_{u_k} F_k(x - u_k) P(x) dx = 0 \quad (2.1)$$

$$f(x, u_k, u_m) = F_k(x - u_k) - F_m(x - u_m) = 0, \quad (2.2)$$

где u_k, u_m - центры k -го и m -го классов, соответственно;
 F_k, F_m - оптимальные функции потерь k -го и m -го классов соответственно;
 x - элемент смеси;
 $P(x)$ - совместная плотность вероятности смеси;
 ∇_{u_k} - градиент функции F_k .

Условие (2.1) определяет оптимальные значения параметров смеси $u_k^* = u_k$, характеризующие центры классов, а (2.2) – линию (поверхность), разделяющую области X_k, X_m на классы. Решение уравнений (2.1) и (2.2) для случая двух классов приводит к следующему виду [14]:

$$du_1(t) / dt = -\gamma_1(t) \nabla_{u_1} F_1[x(t), x_1(t)], \quad (2.3)$$

если $f[x(t), u_1(t), u_2(t)] \leq 0$,

$$du_2(t) / dt = -\gamma_2(t) \nabla_{u_2} F_2[x(t), u_2(t)], \quad (2.4)$$

При коррекции удельных расходов реагентов по зольности флотоконцентрата, осуществляемой при стабилизации его зольности адаптивной системой управления, снижается дисперсия зольности, в результате чего выход концентрата увеличивается на 0,76%. При этом не учитывалось изменения флотуемости угля, являющейся основным возмущающим воздействием на процесс. Минимальное время адаптации системы управления составляет 40-45 мин.

В процессе исследований было установлено, что точность прогнозирования зольности флотоконцентрата значительно выше при использовании уравнений материального баланса, чем при использовании уравнения регрессий. Кроме того, с целью расширения диапазона прогнозируемых значений зольности целесообразно учесть также и стохастический нестационарный характер изменения плотности и расхода пульпы. С этой целью идентификатор лучше включить после модели объекта, т.е. выполнять идентификацию прогнозируемых значений зольности, а не зольности исходного угля. В этом случае дисперсия прогнозируемого значения на порядок меньше, чем при идентификации классов зольности исходного питания флотации ($M\{\sigma_{A1}\}=0,019$; $M\{\sigma_{A2}\}=0,329$).

Практическая реализация указанной задачи осуществлена в разработанной филиалом аппаратуре автоматизированного управления процессом флотации типа КАУФ.1, предназначенной для автоматизации флотационных отделений углеобогатительных фабрик, оснащенных механическими и пневмомеханическими флотомашинами. Функциональная часть аппаратуры выполнена на микропроцессорной технике. Блок-схема ее приведена на рис.6.8. Аппаратура КАУФ.1 выполняет следующие основные функции:

1) автоматическую стабилизацию заданного среднего значения зольности флотоконцентрата: $M\{A_k^d(t)\}=A_k^{d*}=\text{const}$, A_k^d - текущая зольность концентрата, A_k^{d*} - заданная зольность;

2) автоматическое ограничение снижения средней зольности отходов флотации ниже допустимого значения: $M\{A_0^d(t)\}\geq A_0^{d*}=\text{const}$, где $A_0^d(t)$, A_0^{d*} - зольность отходов текущая и заданная;

3) автоматическую стабилизацию плотности исходной пульпы (при необходимости): $M\{\rho_n(t)\}=\rho_n^*=\text{const}$, $\rho_n(t)$, ρ_n^* - текущая и заданная плотность пульпы;

4) автоматическую стабилизацию расхода исходной пульпы (при необходимости): $M\{q_n(t)\}=q_n^*=\text{const}$, где $q_n(t)$, q_n^* - текущее и заданное значения расхода;

5) автоматическую стабилизацию заданного уровня в ванне флотомашин: $M\{h(t)\}=h^*=\text{const}$, где $h(t)$, h^* - текущее и заданное значения уровня пульпы;

если $f[X(t), U_1(t), U_2(t)] > 0$,

где $\gamma_i(t)$ - коэффициент, удовлетворяющий следующим условиям ($i=1,2$)

$$\gamma_i(t) > 0; \int_0^\infty \gamma_i(t) dt = \infty; \int_0^\infty \gamma_i^2(t) dt < \infty. \quad (2.5)$$

Качество разделения смеси на классы зависит от вида функции потерь $F(x, u_k)$. При нормальном законе распределения помехи оптимальная функция потерь является квадратичной, а при экспоненциальном - модульная. Причем в первом случае оптимальные функции потерь, как правило, являются четными, поэтому для любой четной функции потерь $F_i[x(t), u_i(t)]$ выполняется равенство

$$F_i[X(t) - u_i(t)] = F_i[-(X(t) - u_i(t))]. \quad (2.6)$$

В связи с тем, что четная функция потерь зависит только от расстояния $[x(t) - u_i(t)]$, можно утверждать, что

$$F_1[x(t) - u_1(t)] = F_2[x(t) - u_1(t)] \quad (2.7)$$

Тогда разделяющая линия для случая двух классов в смеси определяется следующим выражением:

$$f[x(t), u_1(t), u_2(t)] = F_1[x(t) - u_1(t)] - F_2[x(t) - u_2(t)] = 0. \quad (2.8)$$

Следовательно,

$$F_1[x(t), u_1(t)] = F_2[x(t), u_2(t)], \quad (2.9)$$

что позволяет утверждать:

$$u_1(t) < x(t) < u_2(t). \quad (2.10)$$

На основании (2.10), (2.6) и (2.7) равенство (2.9) можно представить в следующем виде:

$$F_1[x(t) - u_1(t)] = F_1[-(x(t) - u_2(t))]. \quad (2.11)$$

Откуда следует равенство аргументов

$$x(t) - u_1(t) = -(x(t) - u_2(t)). \quad (2.12)$$

Тогда разделяющая линия определяется равенством:

$$x(t) = \frac{u_1(t) + u_2(t)}{2}. \quad (2.13)$$

Таким образом, при четной функции потерь, зависящей только от расстояния между элементами смеси и соответствующими центрами классов, разделяющая функция не зависит от конкретного вида функций потерь.

Решающее правило имеет вид:

$$x(t) \in x_1 \quad \text{При} \quad x(t) \leq \frac{u_1(t) + u_2(t)}{2}$$

$$x(t) \in x_2 \quad \text{При } x(t) > \frac{u_1(t) + u_2(t)}{2} . \quad (2.14)$$

На рис. 2.1а приведены плотности вероятностей $p(x)$ смеси с различными дисперсиями классов, а на рис. 2.1б реализации разделяющей функции двумя квадратичными или (рис.2.1в) двумя модульными функциями потерь. Точка пересечения по (2.14) определяет разделяющую линию, делящую наблюдаемые значения $x(t)$ на два класса. Как видно из

рис.2.1б,в, оценки \hat{u}_1 и \hat{u}_2 будут смещенными, поскольку разделяющая линия будет относить часть значений второго класса x_2 к первому классу x_1 .

Таким образом, общим недостатком разделяющих функций, реализующих решающее правило (2.14), является смещенность оценок u_1 , u_2 даже в случаях не пересекающихся классов, так как очевидно, что несмещенные оценки будут только в случае

$$3\sigma_1 \leq \frac{|u_2 - u_1|}{2} \leq 3\sigma_2 . \quad (2.15)$$

Однако при непересекающихся классах возможно нарушение неравенства (2.15), когда

$$3\sigma_1 + 3\sigma_2 \leq |u_2 - u_1| , \quad (2.16)$$

т.е. классы не пересекаются, но

$$3\sigma_1 > \frac{|u_2 - u_1|}{2} \quad (2.17)$$

или

$$3\sigma_2 > \frac{|u_2 - u_1|}{2} . \quad (2.18)$$

Следовательно, решающее правило (2.14) в случае непересекающихся классов при различных дисперсиях элементов смеси дает смещенные оценки центров математических ожиданий классов. Этот недостаток может быть устранен за счет смещения функции потерь на величину дисперсий противоположных классов (рис.2.1г). Разделяющая функция в данном случае имеет следующий вид:

$$f[x(t), \sigma_2^2(t), \sigma_2^2(t), u_1(t), u_2(t)] = F_1^*[x(t), u_1(t)] - F_2^*[x(t), u_2(t)] + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t), \quad (2.19)$$

а производные функции потерь соответственно

$$\begin{aligned} \nabla_{u_1} F_1 &= \nabla_{u_1} F_1^*[x(t), u_1(t)]; \\ \nabla_{u_2} F_2 &= \nabla_{u_2} F_2^*[x(t), u_2(t)], \end{aligned} \quad (2.20)$$

нал блока сравнения 20 поступает на вход корректирующего регулятора 22 (например, интегратора).

Выходной сигнал $u_B = P^*_1$ с регулятора 22 подается на вход управляемого генератора случайного сигнала 23. В случае управления только реагентным режимом зольность концентрата колеблется в значительном диапазоне (размах колебаний до 2,5% абс. при неизменных параметрах объекта управления).

Время интегрирования идентификаторов изменялось в пределах 0,5-500с и коэффициента усиления - 0,3-5. При этом качество выходных продуктов практически не зависит от параметров настройки идентификатора. В дальнейшем принято $T=300$ с, $k_y=1$.

Наименьшая дисперсия зольности концентрата имеет место при отношении периода треугольных импульсов к периоду прямоугольных импульсов генератора случайного сигнала, равном $\sqrt{2}$ (по сравнению с отношениями $\sqrt{3}$, π , e). Оценка качества процесса управления при изменении параметров настройки интеграторов идентификатора показала, что при $T_H < 100$ с и $k_y > 1$ время адаптации и перерегулирование возрастают. Результаты исследований приведены в табл.6.3 (Δq_c , Δq_p - приращение удельных расходов реагентов собирателя и пенообразователя соответственно; $A_{кв}^d$ - прогнозируемое значение зольности концентрата; $A_{к}^{d*}$ - заданная зольность концентрата).

Таблица 6.3

Качество переходных процессов системы адаптивного управления процессом флотации

$\frac{\Delta q_c}{A_{к}^{d*} - A_{кв}^d}$	$\frac{\Delta q_p}{A_{к}^{d*} - A_{кв}^d}$	Время адаптации, мин.	Максимальное значение, $A_{к}^d$, %	Установившееся значение, $A_{к}^d$, %	Заданное значение, $A_{к}^{d*}$	Перерегулирование, %	Статическая ошибка, %
0,5	0,2	29,6	11	10,8	11,6	2,0	+0,8
0,5	0,4	34,7	11,3	11	11,6	2,7	+0,6
0,5	0,6	49,5	11,7	11,1	11,6	4,5	+0,5
0,5	0,8	45	12	11,7	11,6	2,5	+0,1
0,5	1	58,4	12,3	11,65	11,6	5,6	+0,006
0,8	0,5	60	12,35	11,65	11,6	5,6	0
1	0,5	65	12,7	11,8	11,6	7,6	-0,2

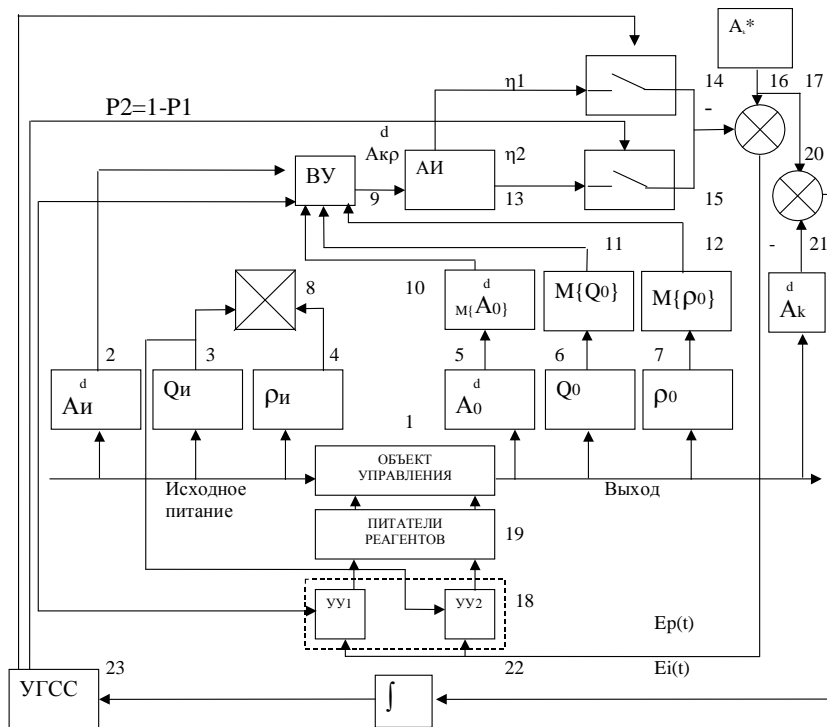


Рис. 6.7. Функциональная схема адаптивной САУ процессом флотации угля

Изменения зольности и плотности пульпы исходного питания во времени носят стохастический характер. Зольность флотоконцентрата определяется из уравнений материального баланса:

$$A_K^d = \frac{A_U^d Q_U \rho_U - A_0^d Q_0 \rho_0}{Q_U \rho_U - Q_0 \rho_0} \quad (6.37)$$

Сигнал, пропорциональный прогнозируемой зольности флотоконцентрата, сравнивается с сигналом задатчика 17 в блоке сравнения 16 и разностный сигнал изменяет расходы реагентов в блоках реагентных питателей 19 через управляющие устройства 18 УУ1 и УУ2. Для адаптации системы управления на изменения параметров измеряют текущее значение зольности флотоконцентрата датчиком 24 и сравнивают с заданным значением (задатчика 17) в блоке сравнения 20. Выходной сиг-

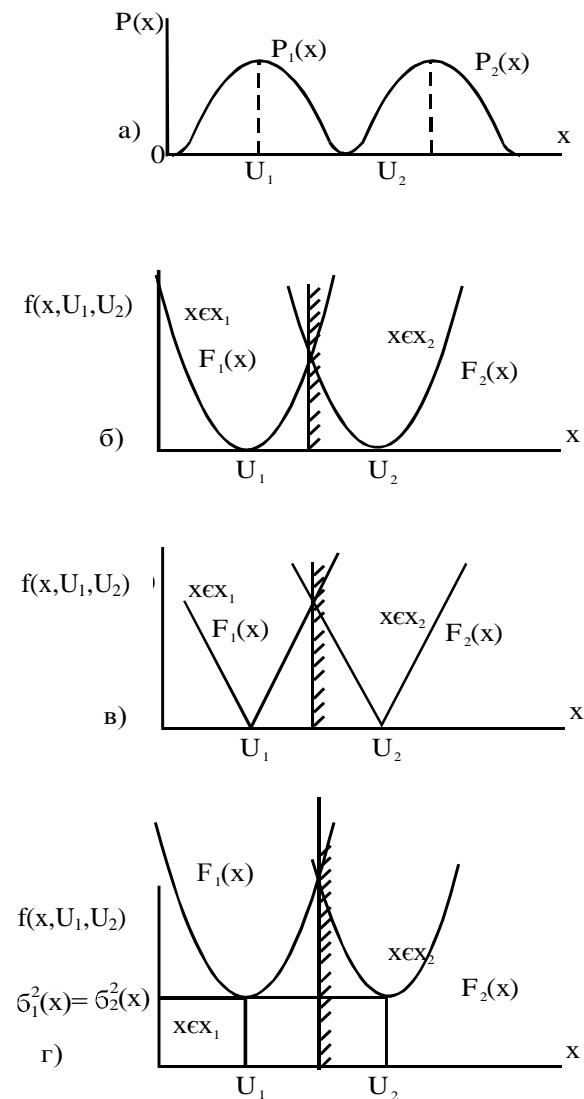


Рис. 2.1. Влияние дисперсий классов на смещённость оценок их центров: плотность вероятностей смеси с различными дисперсиями двух классов (а), разделяющая линия при квадратичной функции потерь (б), то же при модульной функции потерь (в), разделяющая линия при коррекции функции потерь на величину дисперсий противоположных классов (г)

где $\sigma_1^2(t)$, $\sigma_2^2(t)$ - дисперсии первого и второго классов в смеси.

При $\sigma_1 = \sigma_2$ (2.19) превращается в (2.14), т.е. (2.14) является частным случаем (рис.2.2). Предложенный алгоритм (2.19) приводит к устранению смещенности оценок u_1 и u_2 за счет коррекции разделяющей линии на величину дисперсий (см. рис.2.1г).

Определение дисперсии также удобно выполнять методом Я.З.Цыпкина [14]:

$$\frac{d\sigma^2(t)}{dt} = -\gamma_k(t) \{ \sigma_k^2(t) - [x(t) - u_k(t)]^2 \}, \quad (2.21)$$

где $\gamma_k(t)$ – величина шага, удовлетворяющая условиям (2.5).

Вероятность появления классов в смеси можно определить по формуле:

$$P_k(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \text{sgn } Z_1 dt \left[\frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t dt + 1 \right]^{-1} \quad (2.22)$$

$$\text{sgn } Z_1 = \begin{cases} 1; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) \leq 0 \\ 0; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) > 0, \end{cases}$$

где $T_{\text{и}}$ – постоянная интегрирования;

t - текущее время.

Поскольку помехи, действующие на объекты при добыче и обогащении угля хорошо аппроксимируются гауссовской плотностью распределения, то с учетом (2.19) оптимальной функцией потерь будет квадратичная, что приводит к следующим выражениям:

$$F_1[x(t), \sigma_2^2(t), u_1(t)] = \frac{1}{2} [x(t) - u_1(t)]^2 + \sigma_2^2(t) \quad (2.23)$$

$$F_2[x(t), \sigma_1^2(t), u_2(t)] = \frac{1}{2} [x(t) - u_2(t)]^2 + \sigma_1^2(t); \quad (2.24)$$

$$\nabla_{u_1} F_1[x(t), \sigma_2^2(t), u_1(t)] = -[x(t) - u_1(t)]; \quad (2.25)$$

$$\nabla_{u_2} F_2[x(t), \sigma_1^2(t), u_2(t)] = -[x(t) - u_2(t)]; \quad (2.26)$$

$$f[x(t), \sigma_1^2(t), \sigma_2^2(t), u_1(t), u_2(t)] = \\ = 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) + u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t). \quad (2.27)$$

Решающее правило имеет вид:

$$x(t) \in X_1 \text{ при } x(t) \leq \frac{u_2^2(t) - u_1^2(t) + \sigma_1^2(t) - \sigma_2^2(t)}{2[u_2(t) - u_1(t)]}; \quad (2.28)$$

ностью отходов передаточные функции имеют следующий вид:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau_3 p}}{T^2 p^2 + 2\xi T_p + 1}, \quad (6.36)$$

где параметры k , T , ξ , τ_3 приведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Параметры передаточных функций					
Канал управления	Значение параметров				
	Коэффициент усиления, k	Постоянная времени, T , мин.	Коэффициент затухания, ξ	Время чистого запаздывания, τ_3 , мин.	
	Размерность	Величина			
Расход исходного питания - зольность отходов	$\%(\text{м}^3/\text{ч})^{-1}$	0,142	7,7	1,6	10
Удельный расход реагента-пенообразователя - зольность отходов	$\%(\text{мг}/\text{м}^3)^{-1}$	2,1	9,4	1,03	13
Удельный расход реагента-собираателя - зольность отходов	$\%(\text{л}/\text{ч})^{-1}$	33,33	6,8	1,2	12
Расход реагента-собираателя в камеры флотомашин - зольность отходов	$\%(\text{л}/\text{ч})^{-1}$	0,21	3,5	1,1	7
Расход реагента – пенообразователя в камеры флотомашин - зольность отходов	$\%(\text{л}/\text{ч})^{-1}$	3,75	6,5	1,1	15

Синтез системы автоматического управления процессом флотации угля выполнен путем моделирования с использованием случайной стратегии управления.

На рис.6.7 приведена функциональная схема системы управления процессом флотации [50]. Работает она следующим образом.

В процесс 1 флотации поступает исходная пульпа, содержащая угольные и породные частицы класса 0-0,5 мм, зольность твердой фазы которой измеряется датчиком зольности 2, а расход и плотность пульпы соответственно датчиками расхода 3 и плотности 4.

соизмеримо с временем чистого запаздывания сигнала о зольности концентрата (около 40 мин.), что не позволяет решить задачу автоматического управления процессом флотации по зольности концентрата традиционными методами.

Время спада автокорреляционных функций зольности исходного угля составляет около 30 мин., плотности исходной пульпы - 30 мин., нагрузки по твердому продукту - 20 мин. - и оно изменяется от реализации к реализации в зависимости от характеристик обогащаемого угля, применяемого оборудования и т.п.

Связь между выходными показателями процесса флотации и управляющими и возмущающими воздействиями получены в виде уравнений множественной регрессии (в приращениях) для условий ЦОФ "Стахановская":

$$\delta A_0^d = -0,00105 + 1,3836 \cdot \delta Q_{и} + 0,07825 \cdot \delta p_{и} + 0,00858 \cdot \delta G_{и} + 0,02447 \cdot \delta Q_C + 0,9792 \cdot \delta Q_{П} + 0,01242 \cdot \delta A_{и}^d \quad (6.32)$$

$$\delta A_K^d = 0,00113 + 0,06368 \cdot \delta Q_{и} + 3,1128 \cdot \delta p_{и} - 1,2547 \cdot \delta G_{и} - 0,2861 \cdot \delta Q_C - 1,048 \cdot \delta Q_{П} - 0,32 \cdot \delta A_{и}^d \quad (6.33)$$

$$\delta \Gamma_K = 0,00009 + 0,377 \cdot \delta Q_{и} - 0,162 \cdot \delta p_{и} + 0,6836 \cdot \delta G_{и} - 0,0021 \cdot \delta Q_C + 0,8842 \cdot \delta Q_{П} + 0,0392 \cdot \delta A_{и}^d, \quad (6.34)$$

где δA_0^d , $\delta A_{и}^d$, δA_K^d - относительные приращения зольностей отходов флотации, исходного питания и концентрата;

$\delta Q_{и}$, δQ_C , $\delta Q_{П}$ - относительные приращения расходов исходной пульпы, реагента-собираателя и реагента-пенообразователя;

$\delta \Gamma_K$, $\delta G_{и}$ - относительные приращения выхода концентрата и нагрузки по твердому на входе процесса.

Относительные приращения параметров определялись по следующей формуле (на примере зольности отходов флотации):

$$\delta A_0^d = \frac{A_0^d - M\{A_0^d\}}{A_{0\max}^d}, \quad (6.35)$$

где A_0^d , $A_{0\max}^d$ - текущее и максимальные значения;
 $M\{A_0^d\}$ - оценка математического ожидания.

Динамические свойства процесса флотации аппроксимированы аperiodическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием. В частности, по каналу расход реагентов - зольность концентрата $\tau_3=20-70$ мин., а постоянная времени $T=10-20$ мин. При этом остальные звенья системы управления можно принять безинерционными, поскольку их постоянные времени на порядок меньше. По каналам управления золь-

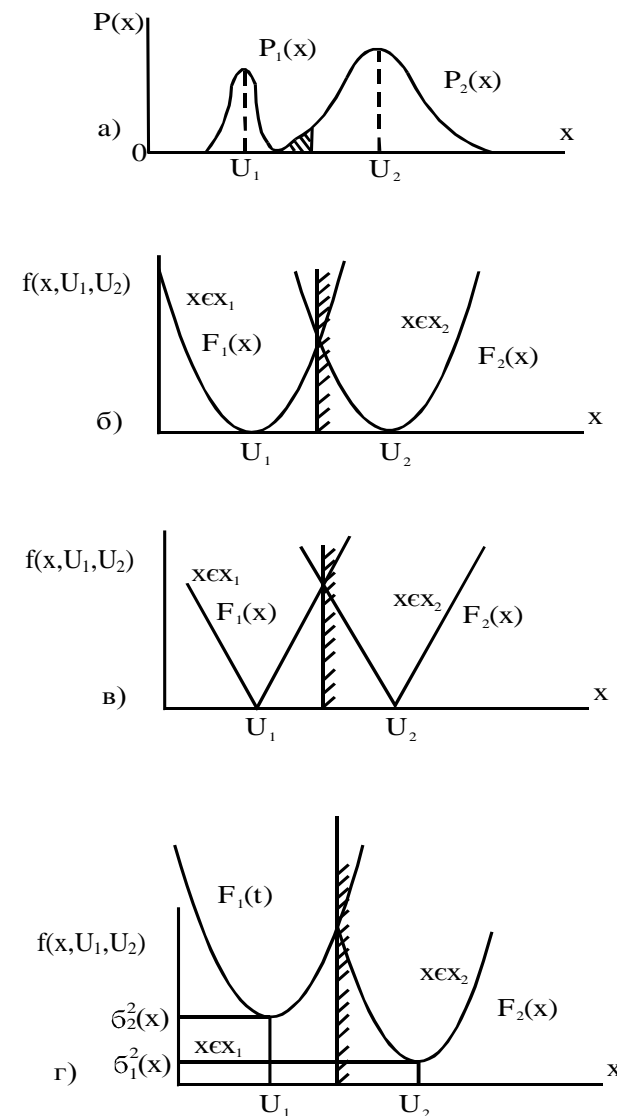


Рис. 2.2. Частный случай определения разделяющей функции при равенстве дисперсий: плотность распределения вероятностей двух непересекающихся классов смеси (а), разделяющая линия при квадратичной функции потерь (б), то же при модульной функции потерь (в), разделяющая функция с учётом дисперсий классов (г)

$$x(t) \in X_2 \text{ при } x(t) > \frac{u_2^2(t) - u_1^2(t) + \sigma_1^2(t) - \sigma_2^2(t)}{2[u_2(t) - u_1(t)]}.$$

Тогда адаптивные алгоритмы идентификации параметров смеси для случая двух классов имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_1(t)}{dt} &= -\gamma_1(t)[u_1(t) - x(t)] \operatorname{sgn} z_1; \\ \frac{d\sigma_1^2(t)}{dt} &= -\gamma_1(t)[\sigma_1^2(t) - [u_1(t) - x(t)]^2] \operatorname{sgn} z_1; \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_2(t)}{dt} &= -\gamma_2(t)[u_2(t) - x(t)] \operatorname{sgn} z_2; \\ \frac{d\sigma_2^2(t)}{dt} &= -\gamma_2(t)[\sigma_2^2(t) - [u_2(t) - x(t)]^2] \operatorname{sgn} z_2; \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1(t) &= \left[\frac{1}{T_n} \int_0^t \operatorname{sgn} z_1 dt + 1 \right]^{-1}; \\ \gamma_2(t) &= \left[\frac{1}{T_n} \int_0^t \operatorname{sgn} z_2 dt + 1 \right]^{-1}; \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} p_1(t) &= \frac{1}{T_n} \int_0^t \operatorname{sgn} z_1 dt \left[\frac{1}{T_n} \int_0^t dt + 1 \right]^{-1}; \\ p_2(t) &= \frac{1}{T_n} \int_0^t \operatorname{sgn} z_2 dt \left[\frac{1}{T_n} \int_0^t dt + 1 \right]^{-1}; \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn} z_1 &= \begin{cases} 1; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) > 0; \\ 0; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) \leq 0; \end{cases} \\ \operatorname{sgn} z_2 &= \begin{cases} 1; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) \leq 0; \\ 0; 2x(t)[u_2(t) - u_1(t)] + u_1^2(t) - u_2^2(t) + \sigma_2^2(t) - \sigma_1^2(t) > 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Полученные алгоритмы могут применяться и для случая “к” классов в смеси [20].

При этом решающее правило имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x(t) \in X_1, \text{ если} \\ f_{12} &= [x(t) - u_1(t)]^2 - \sigma_1^2(t) - [x(t) - u_2(t)]^2 - \sigma_2^2(t) \leq 0; \\ f_{13} &= [x(t) - u_1(t)]^2 - \sigma_1^2(t) - [x(t) - u_3(t)]^2 - \sigma_3^2(t) \leq 0; \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2.33)$$

Выходной сигнал интегратора И подается на вход третьего звена сравнения ЗЗ, где алгебраически суммируется с сигналом, пропорциональным давлению пара и частоте вращения барабана. Сигнал рассогласования с этого звена подается на регулятор, управляющий тиристорным преобразователем. Последний изменяет соответственно скорость вращения барабана.

Система управления реализована на регулирующем микроконтроллере Ремиконт-110.

При промышленных испытаниях экспериментального образца аппаратуры в условиях сушильно-прессового комплекса №5 Кумертауской брикетной фабрики на сушильном агрегате №38 установлено, что система управления стабилизирует заданную влажность с погрешностью 0,45% абс. Величина перерегулирования не превышает 10-15%, время переходного процесса составляет в среднем 30 мин. при ступенчатом изменении задания на 10-15%. По сравнению с ручным при автоматическом управлении процессом сушки дисперсия влажности высушенного угля снизилась в 3,5-4 раза.

6.4. Адаптивное управление процессом флотации угля

Процесс флотации угля является одним из важнейших при переработке угля на обогатительных фабриках, от эффективности которого зависят не только количественные и качественные характеристики обогащения, но и степень загрязнения окружающей среды. Основными требованиями к этому процессу являются стабилизация заданного значения зольности флотоконцентрата при зольности отходов не ниже допустимой. При такой постановке задачи автоматического управления процессом флотации угля возникают значительные трудности, обусловленные существенным запаздыванием сигнала от датчика зольности концентрата, составляющим 40-60 мин. в зависимости от конкретных условий фабрики. Это обусловливается тем, что зольность концентрата в технологическом потоке можно измерить на конвейерной ленте после его обезвоживания.

Флотация подвержена действию значительного числа возмущающих воздействий, основными из которых являются изменения зольности и плотности исходного угля, нагрузки по твердому и т.п., имеющие стохастический нестационарный характер. Зольность и плотность исходного питания и нагрузку по твердому допускается рассматривать как квазистационарные вероятностные процессы. Время спада корреляционных функций приведенных параметров

Таким образом, при $\varepsilon^* \geq |M\{\varepsilon(t)\}|$ генератор ГПН не работает, и постоянная интегратора И равна бесконечности, т.е. обратная связь системы управления разомкнута. При $\varepsilon^* < |M\{\varepsilon(t)\}|$ сигналом с $\Sigma 2$ запускается генератор ГПН, который своим сигналом изменяет постоянную времени интегратора пропорционально сигналу с выхода генератора. Если за один цикл работы генератора ошибка регулирования не снизится до заданного значения, цикл изменения постоянной времени интегратора повторяется.

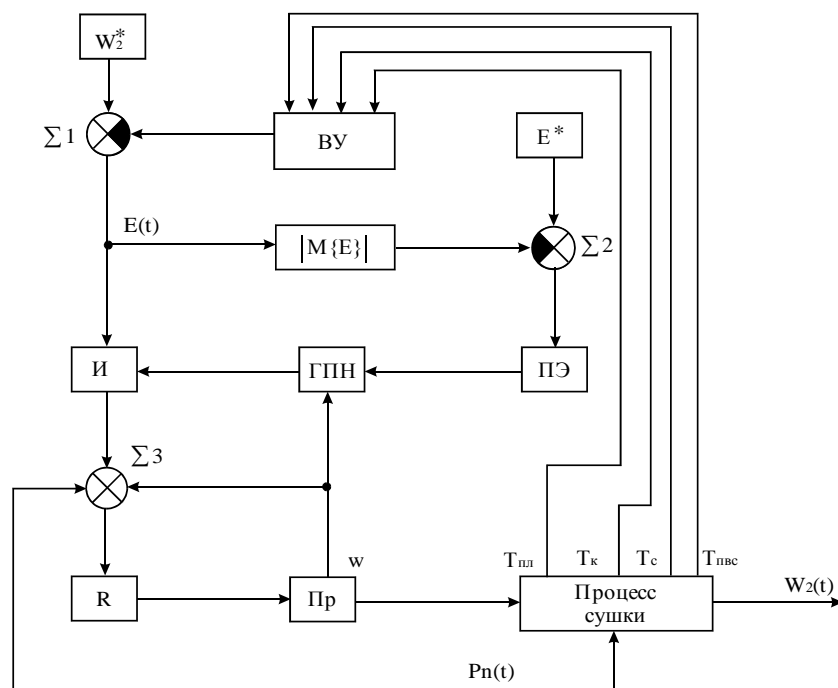


Рис. 6.6. Функциональная схема адаптивной САУ паровой трубчатой сушилкой

[illegible]

2.2. Исследования алгоритмов идентификации параметров смесей

Проверка полученных алгоритмов идентификации осуществлена с использованием эталонных смесей, полученных с помощью модели возмущающих воздействий.

Результаты исследований по идентификации параметров эталонных смесей приведены в табл.2.1. На рис.2.3 приведены примеры переходных процессов при идентификации параметров смесей. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что оценки параметров при непересекающихся и слабо пересекающихся классах стремятся к теоретическим значениям параметров смесей, причем относительное время обучения τ_{06} зависит от величины $\gamma(t)$ и снижается с его увеличением ($\tau_{06} = t_{06}/\Delta t$, t_{06} - время обучения, Δt - шаг дискретизации). Например, при $\gamma_k = 0,05 = \text{const}$ оно составляет на эталонных смесях с параметрами $u_1=18$, $u_2=32$, $\sigma_1=1,2$, $\sigma_2=3,4$ 90-100 шагов, а при $\gamma_k=0,1$ - 60-70 шагов. При переменном шаге $\gamma_k(t) = \frac{1}{1+t}$ оно снижается до 20-30 шагов. При сильно

пересекающихся классах с разными математическими ожиданиями и различными дисперсиями (см. табл. 2.1) получены два непересекающихся множества с близкими дисперсиями и сильно смещенными оценками центров классов и их дисперсий. Причем величина смещения оценок параметров смеси увеличивается с увеличением степени пересечения классов. В случае разделения смеси без учета дисперсий классов смещение оценок возрастает на 20-25%.

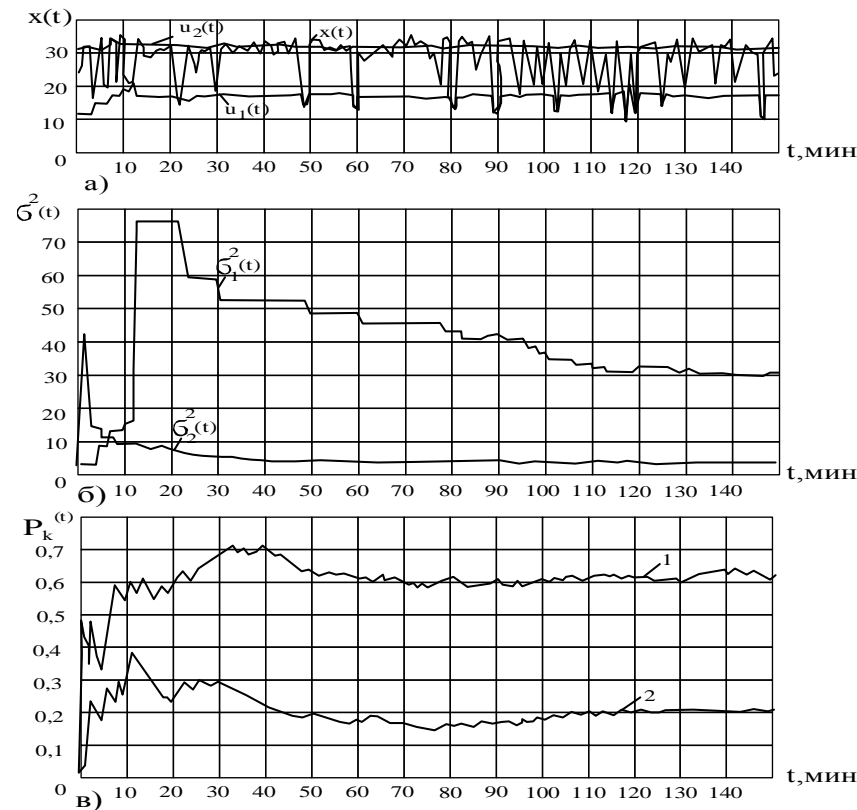


Рис. 2.3. Графики переходных при идентификации параметров смеси двух классов ($u_1=18$, $u_2=32$, $\sigma_1=1,2$, $\sigma_2=3,4$): центров классов (а), дисперсий (б), вероятностей (1 – при $p_1=0,7$, $p_2=0,3$)

При этом время обучения (число шагов N_0 обучения) определено по моменту пересечения кривой $u_k(t)$ с линиями, 5% от среднего значения $M\{u_k(t)\}$, т.е. по моменту, когда выполняется неравенство [20]

$$u_k[N_0] \leq (1 \pm 0,05) M\{u_k[N_k]\}, \quad (2.36)$$

где $U_k[N_k]$ - оценка центра k -го класса в смеси;

N_k - число точек, для которых $x(t) \in X_k$.

Наличие аддитивного шума $e(t)$ ($M\{e(t)\}=0$, $\sigma_e^2(t) < \infty$, $\sigma_e^2(t)$ - дисперсия шума) мало влияет на смещение оценок параметров, а при сильно пересекающихся классах даже снижает их смещение.

6.3. Адаптивное управление паровой трубчатой сушилкой

Для сушки бурого угля, используемого в качестве бытового топлива, применяются паровые трубчатые сушилки [49].

Институтом НИПИУглеавтоматизация разработана аппаратура автоматизации процесса сушки бурого угля в паровых трубчатых сушилках, в составе которой функционирует система автоматического управления влажностью высушенного угля. В системе использован нелинейный адаптивный регулятор с исчезающей обратной связью (алгоритм см. 4.21).

Регулирование влажности высушенного угля осуществляется путем изменения нагрузки по сырому углю регулированием частоты вращения барабана с коррекцией по давлению пара. Динамические свойства объекта управления аппроксимированы передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau_3 p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (6.30)$$

где $T_1=82,8$ с; $T_2=115,9$ с; $k=0,42\% \text{ ч}^{-1}$; $\tau_3=900$ с.

В системе управления предусмотрены два варианта построения: с использованием в качестве источника информации о влажности высушенного угля датчика влажности или вычислительного устройства, определяющего влажность по данным косвенных измерений режимных параметров. В вычислительном устройстве влажность определяется по уравнению регрессии (коэффициент корреляции 0,59):

$$W_2(t) = a_0 - a_1 \cdot T_{\text{ПВС}}(t) + a_2 \cdot T_K(t) - a_3 \cdot T_C(t) - a_4 \cdot T_{\text{ПЛ}}(t), \quad (6.31)$$

где a_0 - a_4 - коэффициенты, определяемые при наладке системы управления на объекте;

$T_{\text{ПВС}}(t)$ - текущая температура паровоздушной смеси в шахте электрофильтра;

$T_K(t)$ - текущая температура конденсата;

$T_C(t)$ - то же высушенного угля;

$T_{\text{ПЛ}}(t)$ - то же пыли.

Структурная схема системы управления приведена на рис.6.6. Работает аппаратура следующим образом.

На входы звена сравнения $\Sigma 1$ подаются сигналы с датчика влажности высушенного угля W_2^* и вычислительного устройства ВУ1 (датчика влажности). На выходе этого звена сравнения сигнал $\varepsilon(t)$ подается на входы интегратора И и блока оценки модуля ошибки регулирования. Постоянная интегрирования интегратора изменяется от начального значения T_0 до бесконечности. Это изменение осуществляется сигналом от генератора пилообразного напряжения ГПН. Генератор пилооб-

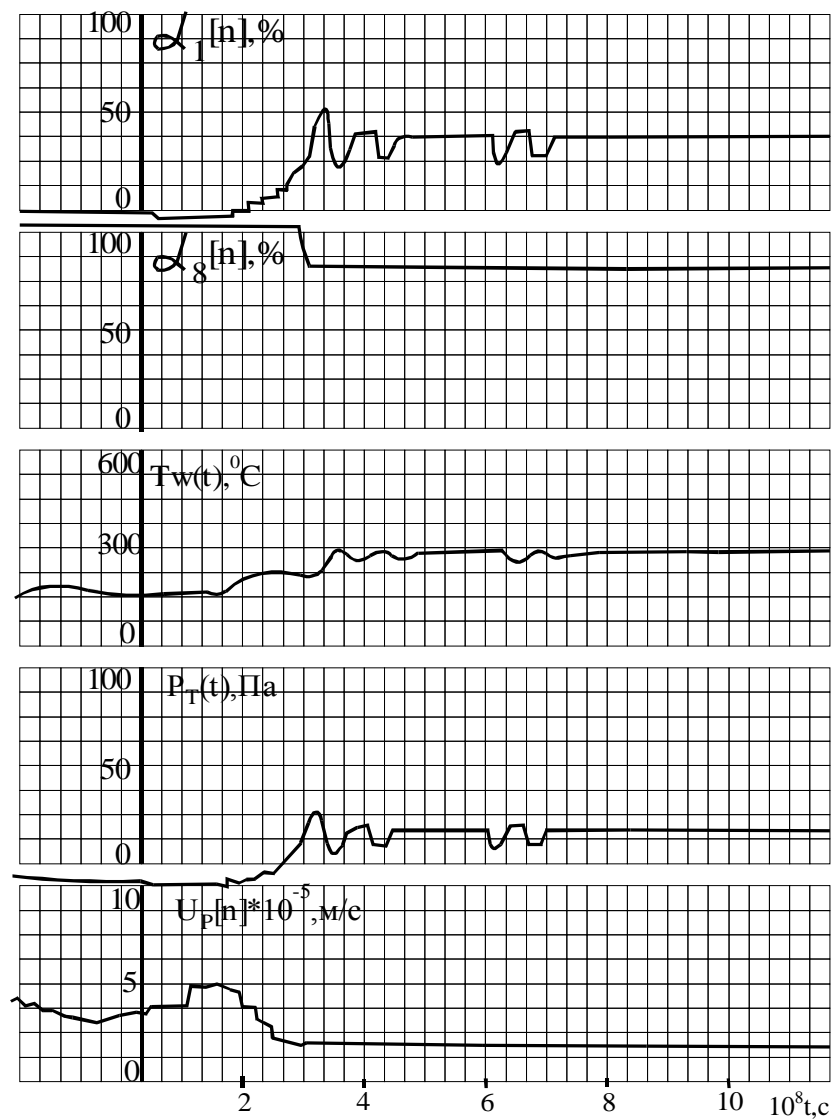


Рис. 6.5. Переходные процессы в САР прямого цифрового регулирования процессом горения угля

Оценка точности идентификации параметров эталонных смесей предложенными алгоритмами выполнена путем определения доверительных интервалов для центров классов u_k , дисперсий σ_k^2 и вероятностей (частот) p_k . Доверительные границы для оценок центров классов получены с вероятностью 0,95 по формуле [21]:

$$\hat{u}_k[n] = 1,96 \frac{\sigma_k[n]}{\sqrt{n_k}}, \quad (2.37)$$

где \hat{u}_k – оценка центра k-го класса эталонных смесей;
 σ_k – теоретическое значение среднеквадратического отклонения элементов $x[n]$ k-го класса эталонной смеси;
 n_k – число элементов смеси в "k"-ом классе.

При построении доверительных интервалов использованы табулированные выражения [22]:

$$g_n = \chi_{\frac{m-1+\varepsilon}{2}} \hat{\sigma}_k; \quad g_v = \chi_{\frac{m-1-\varepsilon}{2}} \hat{\sigma}_k; \quad (2.38)$$

где g_n, g_v – нижний и верхний доверительные интервалы для среднеквадратических отклонений классов;

$\chi_{\frac{m-1+\varepsilon}{2}}, \chi_{\frac{m-1-\varepsilon}{2}}$ – табличные коэффициенты из [21] при $m=N_{k-1}$ и ε ;

$\varepsilon=0,95$ – доверительная вероятность;

$\hat{\sigma}_k[n]$ – оценка среднеквадратического отклонения для k-го класса.

В табл.2.2 приведены доверительные интервалы при $n=350$, $p=0,7$, $\varepsilon=0,95$ для вероятностей появления классов, их центров и среднеквадратических отклонений. Из табл.2.2 следует, что алгоритмы идентификации параметров смесей дают несмещенные оценки в случае непересекающихся и слабо пересекающихся классов, а также в случае сильно пересекающихся классов с близкими по величине дисперсиями.

Однако при $p=0,7$ в слабо пересекающихся классах и при различных дисперсиях наблюдается смещение оценок среднеквадратических отклонений от доверительного интервала (4,21-5,11 при $\sigma_1=5,0$ и 2,13-2,85 при $\sigma_2=2,0$) до 1,6-3,0%. В случае сильно пересекающихся классов и различных дисперсиях имеют место смещенные оценки. При сильно пересекающихся классах с равными математическими ожиданиями и различными дисперсиями получаются сильно смещенные оценки центров классов, дисперсий и вероятностей появления классов в смеси.

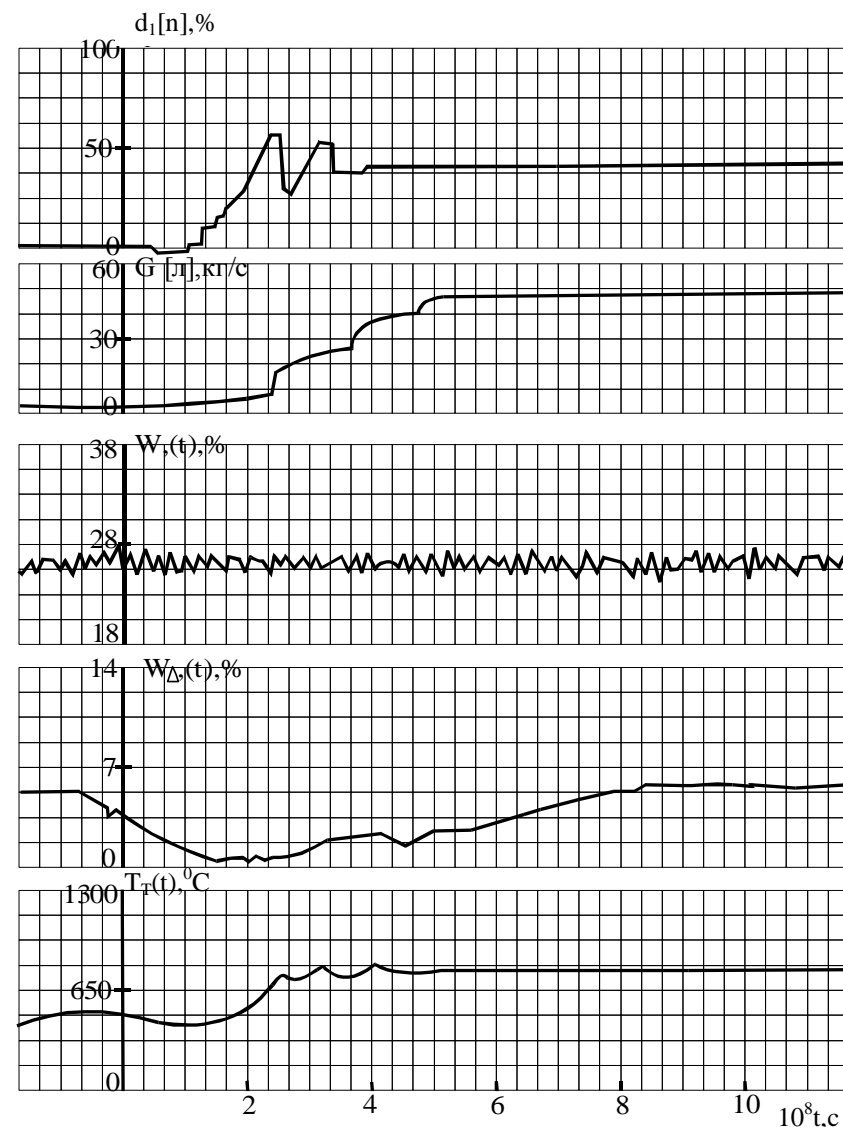


Рис. 6.4. Переходные процессы в САР прямого цифрового регулирования процессом сушки

ляторах и микроконтроллера Ремиконт-100. Устойчивость и качество процессов регулирования остались на прежних показателях и не изменились в связи с последовательной дискретной обработкой информации в системе.

Экспериментальные исследования разработанной системы автоматического управления процессом сушки на ЦОФ “Сибирь” подтвердили изложенные выше результаты [11].

Таблица 6.1

Время выполнения задач управления		
Обозначение программного модуля	Функциональное назначение	Время выполнения, с
FAIL	Формирование входной информации в общей области оперативной памяти	3,3
KOR	Корректировка входной информации	3
AI	Ввод аналоговой информации	0,1
DI	Ввод дискретной информации	0,1
TAI	Обработка аналоговой и дискретной информации	0,1
SKOR	Расчет управляющих технологических параметров	0,2
WOS	Формирование и выдача управляющих воздействий	1,5
ZAP	Запуск программ управления	2
ZNAK	Вывод информации на печать или видеотерминал	До 7,2

Таблица 2.2

Доверительные интервалы при вероятности появления классов $p=0,7$

Параметры эталонных смесей					Доверительные интервалы			
u_1	u_2	σ_1	σ_2	Вероятности появления классов p_1	центров классов		среднеквадратических отклонений классов	
					\hat{u}_1	\hat{u}_2	$\hat{\sigma}_1$	$\hat{\sigma}_2$
18	32	1,8	2,0	0,62-0,71	18,23-17,77	31,74-32,45	1,60-2,15	1,96-2,38
18	32	1,2	3,45	0,62-0,71	17,84-18,15	31,60-32,90	1,22-1,49	3,02-4,05
18	32	3,5	3,5	0,62-0,71	17,44-18,35	31,68-32,91	3,19-3,88	3,03-4,05
18	32	5,0	2,0	0,57-0,66	16,79-18,04	31,44-32,15	4,21-5,11	2,13-2,85
18	32	4,0	4,2	0,62-0,71	17,38-18,41	31,65-33,14	3,56-4,32	3,52-4,72
18	32	2,0	8,0	0,73-0,82	18,14-18,65	33,5-36,4	2,39-2,94	5,29-7,10
32	32	2,0	5,0	0,47-0,61	29,54-30,05	33,71-35,48	2,45-2,98	1,81-2,43

2.3. Адаптивные идентификаторы возмущающих воздействий

Полученные алгоритмы положены в основу разработки адаптивных идентификаторов возмущающих воздействий, обеспечивающих автоматическую классификацию на 2, 3 или “k” классов. На рис.2.4 приведена принципиальная схема такого идентификатора, осуществляющего разделение смеси на два класса [20]. В идентификаторе реализуется решающее правило (2.14).

Идентификатор состоит из двух однотипных блоков оценки центров классов смеси $u_1(t)$ и $u_2(t)$, выполненных соответственно на звеньях сравнения 1 и 4, двух ключах 5 и 8, усилителях 6 и 9 с коэффициентами усиления $\gamma_1(t)$ и $\gamma_2(t)$, двух интеграторов 7 и 10. Разделяющая функция (4) реализована на двух звеньях сравнения 2 и 3, двух нелинейных элементах (диодах) 11 и 12, сумматоре 13, пороговом элементе 14 и логическом элементе “НЕ” 15.

Сигнал с датчика влажности описывается выражением

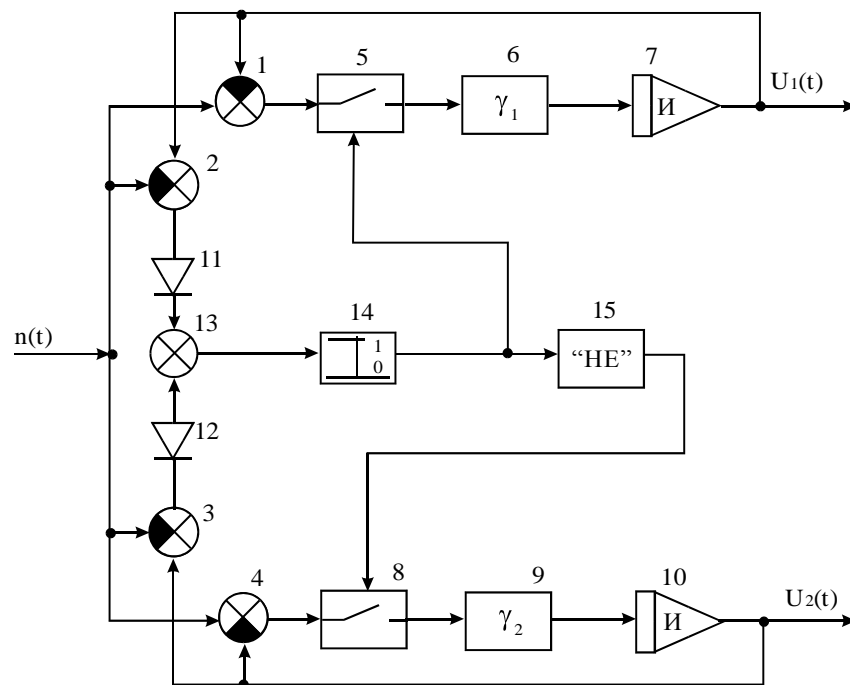


Рис. 2.4. Схема идентификатора смеси на два класса

$$\eta(t) = x(t) + e(t), \quad (2.39)$$

где $\eta(t)$ - наблюдаемая величина сигнала с датчика влажности;
 $e(t)$ - шум в канале измерения с неизвестной плотностью распределения $p[e(t)]$, нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией.

Измеренный сигнал $\eta(t)$ подается на первые входы звеньев сравнения 1 и 5, где он сравнивается с сигналами с выходов интеграторов 7 и 10, причем, начальные значения этих сигналов выбираются так, чтобы выполнялось условие

$$\eta_{\min} < u_1(0) < u_2(0) < \eta_{\max}, \quad (2.40)$$

где η_{\min} , η_{\max} - минимальное и максимальное значения наблюдаемого сигнала влажности исходного угля;
 $u_1(0)$, $u_2(0)$ - начальные значения центров классов смеси угольного концентрата.

где u_p - скорость движения колосниковой решетки;
 $I_{\text{сг}}$ - расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги;
 G_1 - производительность сушильной установки по сырому материалу (углю);
 $M\{W_1[n]\}$ - оценка среднего значения влажности исходного угля;
 m_0 - начальная порозность слоя топлива;
 γ_0 - плотность топлива;
 h_1 - высота слоя топлива на колосниковой решетке;
 b - ширина решетки;
 $G_{\text{сг}}$ - количество сухих газов, получаемых при сжигании 1 кг топлива.

Оценка среднего значения $\hat{M}\{W_1[n]\}$ производилась по следующему рекуррентному выражению:

$$\hat{M}\{W_1[n]\} = \hat{M}\{W_1[n-1]\} - \gamma_1[n] \left(\hat{M}\{W_1[n-1]\} - W_1[n] \right), \quad (6.29)$$

где $\gamma_1[n]$ - величина шага, удовлетворяющая условиям теоремы Дворецкого.

В качестве языка программирования использовался язык ФОРТРАН-IV, а в основу организации алгоритмов управления в реальном масштабе времени положен модульный принцип организации задач управления. Рекуррентная форма алгоритмов (6.29) позволила значительно снизить объем памяти, так как в этом случае для получения оценок

$\hat{M}\{W_1[n]\}$ необходимо помнить всего два дискретных значения - предыдущее и вновь поступившее, т.е. на шаге $[n-1]$ и $[n]$.

Время работы задач управления представлено в табл.6.1, из которой видно, что суммарное время регулирования составляет порядка 2С, а это вполне приемлемо при регулировании инерционных процессов сушки и горения угля.

Переходные процессы в системе прямого цифрового регулирования с моделью процессов сушки и горения угля, работающей в реальном масштабе времени, представлены на рис.6.4, 6.5. Из приведенных графиков следует, что выходные координаты процессов: влажность высушенного угля $W_2(t)$, температура в топке $T_T(t)$, разрежение в топке $p_T(t)$ и температура шлака $T_{\text{ш}}(t)$ сходятся к соответствующим заданным значениям $W^*_2=7\%$, $T^*_{\text{Т}}=700^\circ\text{C}$, $p^*_{\text{Т}}=25\text{Па}$ и $T^*_{\text{ш}}=350^\circ\text{C}$. Время регулирования составляет около 40 мин.

В целом приведенные результаты согласуются с ранее полученными результатами компьютерного моделирования и промышленных испытаний системы регулирования, реализованной на аналоговых регу-

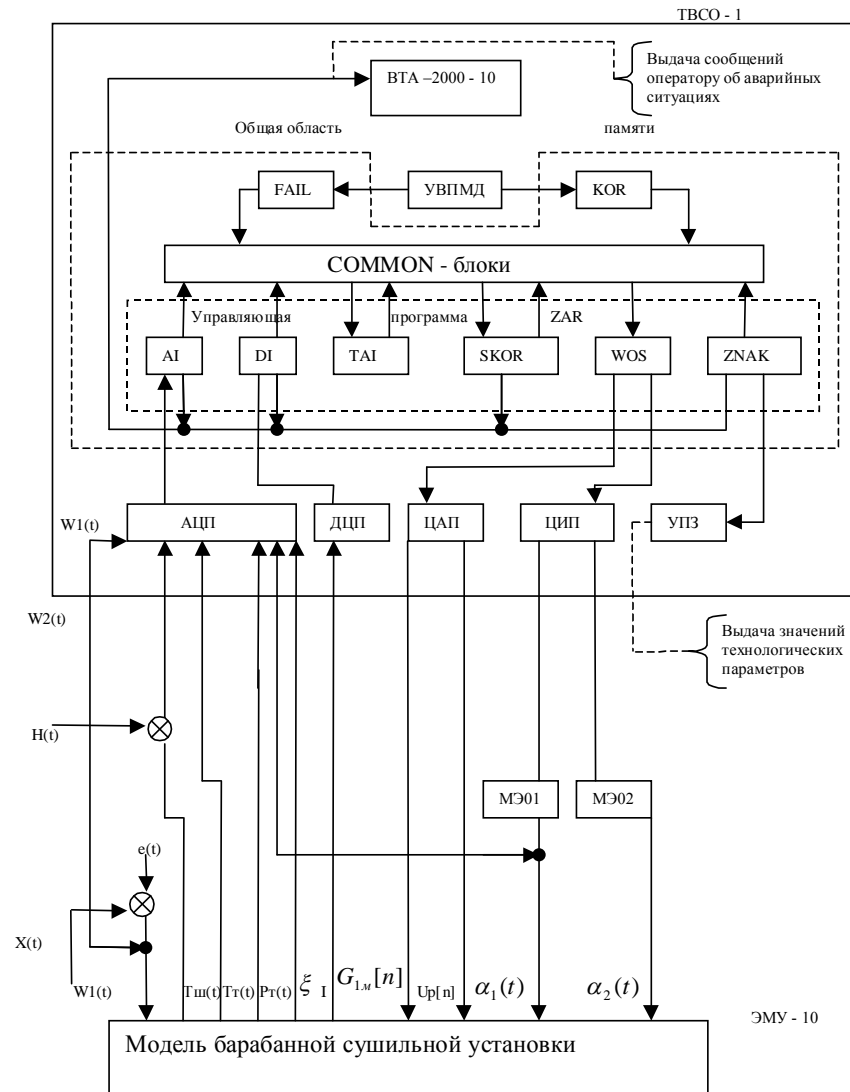


Рис. 6.3. Блок-схема модели прямого цифрового управления процессами горения и сушки с использованием МикроЭВМ, работающей в реальном масштабе времени

Если замкнут ключ 5, то сигнал с выхода звена сравнения 1 через усилитель 6 подается на вход интегратора 7, выходная величина которого увеличивается или уменьшается в зависимости от величины и знака разностного сигнала, поступающего со звена сравнения 1. Аналогично работают звенья 4, 9 и 10, когда замкнут ключ 8. На выходах интеграторов 7 и 10 образуются средние значения центров классов смеси, например, влажного угольного концентрата.

При размыкании ключей 5 или 8, интеграторы 7 или 10 запоминают свой выходной сигнал. Замыкание ключей 5 и 8 осуществляется в зависимости от результатов сравнения сигнала $\eta(t)$ с сигналами $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на звеньях сравнения 2 и 3 и подачей этих сигналов на сумматор 13. На сумматоре 13 образуется суммарный сигнал следующих величин:

$$u_2(t) - \eta(t) > 0 \text{ при } (u_1(t) - \eta(t) \geq 0) \text{ и } (u_2(t) - \eta(t) > 0), \quad (2.41)$$

так как нелинейный элемент (например, диод) 12 в этом случае будет находиться в закрытом состоянии. Этот сигнал не переключает пороговый элемент 14 и, следовательно, ключ 5 будет находиться в разомкнутом состоянии, а ключ 8 в замкнутом, потому что на выходе логического элемента НЕ 15 появится единичный сигнал, который и переводит ключ 8 в проводящее состояние:

$$[u_2(t) - \eta(t)] + [u_1(t) - \eta(t)] \geq 0 \text{ при } (u_1(t) - \eta(t) < 0) \text{ и } (u_2(t) - \eta(t) > 0). \quad (2.42)$$

В этом случае нелинейный элемент 12 будет находиться в проводящем состоянии, однако переключения порогового момента 14 не произойдет, так как сигнал на выходе сумматора 13 больше нуля:

$$[u_2(t) - \eta(t)] + [u_1(t) - \eta(t)] < 0 \text{ при } (u_1(t) - \eta(t) < 0) \text{ и } (u_2(t) - \eta(t) \geq 0). \quad (2.43)$$

В этом случае на выходе порогового элемента 14 появится единичный сигнал, так как сигнал на выходе сумматора 13 меньше нуля. Этот сигнал переводит ключ 5 в проводящее состояние, при этом ключ 8 разомкнется, так как сигнал на выходе логического элемента НЕ 16 станет равным нулю:

$$u_1(t) - \eta(t) < 0 \text{ при } (u_1(t) - \eta(t) < 0) \text{ и } (u_2(t) - \eta(t) < 0). \quad (2.44)$$

В этом случае нелинейный элемент 11 будет находиться в закрытом состоянии, и сигнал на выходе порогового элемента 14 не изменится, следовательно, положение ключей 5 и 8 остается неизменным.

Вероятность появления сигналов u_1 и u_2 может быть определена путем сравнения времени работы каждого из интеграторов с общим временем функционирования идентификатора.

Указанный идентификатор имеет недостаточную точность в случае кратковременного прекращения возмущающих воздействий, например, в случае прекращения подачи сырья в обоганительную машину и т.п. В этом случае сигнал на выходе датчика возмущающего воздействия значительно уменьшается или становится равным нулю, а идентифика-

тор ошибочно отнесет этот сигнал к какому-либо из классов u_1 или u_2 (например, при $u_1 > u_2$ указанный сигнал внесет погрешность в определение u_2). Во избежание этого на выходе датчика возмущающего воздействия используют звено сравнения с задатчиком и пороговый элемент, который в случае прекращения сигнала с датчика при помощи соответствующих ключей размыкает ключи 5 и 8, и сигналы на выходах интеграторов 7 и 10 запоминаются.

Рассмотренный выше идентификатор не учитывает смещенности оценок центров классов, т.е. выполнен без коррекции разделяющей функции. На рис.2.5 в качестве примера приведены функциональная схема идентификатора на три класса с коррекцией разделяющей функции по дисперсии.

Идентификатор содержит три аналогичных блока идентификации 1 и три аналогичных блока логического управления 2. На первые входы блоков 1 идентификации подключен выход датчика возмущающего воздействия 3.

Блок логического управления 2 содержит две схемы сравнения 4, выходы которых, через последовательно включенные два пороговых элемента 5, подключены на входы логического элемента И 6.

Выходы логических элементов И всех блоков логического управления 2 подключены на входы блоков идентификации 1. Выходы каждого из блоков 1 идентификации подключены на входы двух схем сравнения соответственно трех блоков логического управления 2, а на вторые входы двух схем сравнения 4, два блока 2 логического управления, кроме блоков логического управления, для которых выполняется условие $i=j$ (j - порядковый номер блока 2 логического управления, i - порядковый номер блока 1 идентификации, $i=3, j=3$), подключены выходы остальных блоков 1 идентификации. Блок 1 идентификации (рис.2.6) состоит из сумматора 7, ключа 8, усилителя 9 и интегратора 10.

Выход интегратора 10 является выходом блока идентификации по математическому ожиданию соответствующего класса. Вычисление дисперсии каждого класса осуществляется благодаря использованию квадратора 11, звена сравнения 12, ключа 13, усилителя 14 и интегратора 15. Выход интегратора 15 является вторым выходом блока идентификации по дисперсии. Сигнал $x(t)$ с датчика возмущающего воздействия 3 подается на входы блоков 1 идентификации, где он сравнивается с сигналами с выходов интеграторов 10 каждого из трех блоков 1 идентификации.

Начальные условия для $u_i(0)$ и $\sigma_i^2(0)$ должны выбираться из условия

Качество регулирования оценивалось средним риском:

$$R = M \left\{ \sum_{s=1}^n [\beta(W_2^* - W_2[s])^2] \right\} \quad (6.26)$$

где M - оператор математического ожидания;
 β - постоянный коэффициент;
 $W_2[s]$ - текущая (наблюдаемая) влажность высушенного угля в дискретный момент времени $s, s=1, \dots, n$;
 n - количество дискретных интервалов времени Δt .

На рис.6.3 представлена блок-схема системы прямого цифрового регулирования процессами горения и сушки угля на базе ТВСО-1 (СМ 1634) с моделью барабанной сушильной установки (6.1-6.9) (ВТА 2000-10 - видеотерминал; УВПМД - устройство внешней памяти; FAIL - программный модуль формирования входной информации; ZAP - модуль запуска программ управления; AI - программный модуль ввода аналоговой информации; DI - программный модуль ввода дискретной информации; TAI - программный модуль обработки аналоговой и дискретной информации; SKOR - программный модуль расчёта управляющих параметров; WOS - программный модуль выдачи управляющих воздействий; ZNAK - программный модуль вывода информации на печатающее устройство; АЦП, ДЦП, ЦАП, ЦИП - устройство аналого-цифрового, дискретно-цифрового, цифро-аналогового и цифро-импульсного преобразования; МЭО₁, МЭО₂ - исполнительные механизмы; ξ_i - дискретные сигналы о состоянии механизмов). Сигналы о влажности исходного и высушенного угля формировались с учетом шумов измерения, характерных для датчиков влажности ВАК-4 по следующим выражениям:

$$W_1(t) = x(t) + e(t) \quad (6.26)$$

$$W_2(t) = y_1(t) + h(t), \quad (6.27)$$

где $W_1(t), W_2(t)$ - наблюдаемые сигналы с датчиков влажности исходного и высушенного угля в моменты времени t ;
 $x(t), y_1(t)$ - влажность исходного и высушенного угля;
 $e(t), h(t)$ - аддитивные шумы измерения для влажности исходного и высушенного угля с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченными дисперсиями.

Вероятностные параметры сигналов (6.26) и (6.27) формировались генераторами случайного сигнала. С учетом дискретной обработки сигналов алгоритмы регулирования представлялись в рекуррентном виде, так, например, вычисление скорости движения колосниковой решетки слоевой топki осуществлялось по следующему выражению:

$$u_p = 0.01 \frac{l_{CT} G_1 [M\{W_1[n]\} - W_2^*]}{(1 - m_0) \gamma_0 b h_1 G_{CT}}, \quad (6.28)$$

по испаренной влаге на 12707 кг/ч, а удельный расход условного топлива на 1кг испаренной влаги снизить на 0,164-0,189 кг.

Система управления сушильной установки нормально функционировала при зольности топлива меньше 25% (теплотворная способность не ниже 21КДж/кг), т.е. промпродукт в качестве топлива не всегда может быть использован.

В процессе эксплуатации автоматизированной сушильной установки на ЦОФ “Суходольская” определены основные показатели, в частности, время обучения системы при изменении задания влажности W^*_2 составило 40 мин., среднеквадратическое отклонение влажности при автоматическом управлении $\sigma_{WA}=1,81\%$ ($W^*_2=12\%$), при ручном управлении $\sigma_{WP}=3,96\%$ (при среднем значении $W_{2CP}=14,4\%$), т.е. в 2 раза больше, чем при автоматическом.

Среднеквадратическое отклонение температуры в топке в автоматическом режиме $34,4^\circ\text{C}$ ($T=500^\circ\text{C}$), а в ручном $118,9^\circ\text{C}$, зольность шлаков в автоматическом режиме составила 64,3%, а в ручном – 58,4%.

КПД топки увеличился за счет автоматизации режима сушки на 6,55%, производительность сушилки по испаренной влаге - на 19,4%, повысилась безопасность ведения процесса, снизилась напряженность работы оператора.

6.2. Цифровое управление процессом сушки

На обогатительных фабриках в настоящее время применяются АСУТП с использованием распределенной структуры средств вычислительной техники с двумя уровнями иерархии. На нижнем уровне сбор и обработка информации осуществляется при помощи микроЭВМ. В таких случаях желательно возложить на ЭВМ также функции управления отдельными технологическими процессами. Такая попытка предпринята для автоматического управления процессом сушки угольного концентрата на ЦОФ “Сибирь”. Однако построение на них систем прямого цифрового регулирования процессами сушки и горения угля затрудняется отсутствием их всесторонней экспериментальной проверки, позволяющей оценить точность управления, влияние дискретизации аналоговых сигналов на устойчивость процесса регулирования, время, затрачиваемое на решение задач регулирования, методы организации задач управления в реальном масштабе времени и др.

Для этого разработаны прикладные программы, реализующие алгоритмы управления процессами сушки и горения угля и их экспериментальное исследование.

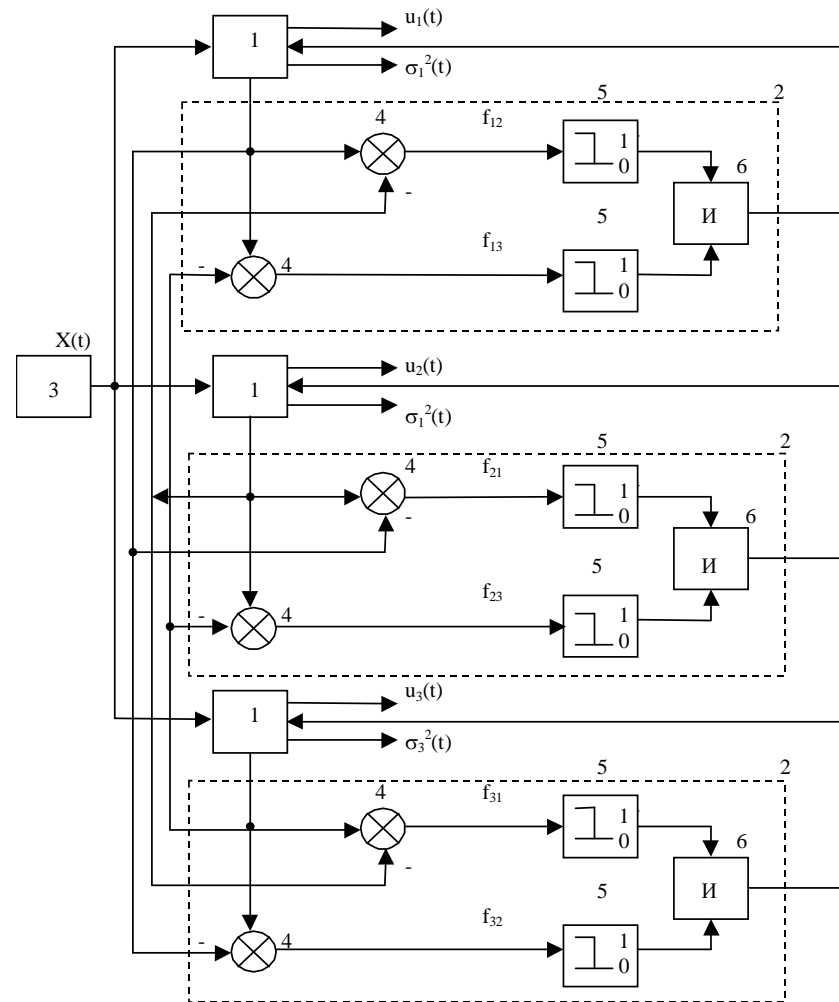


Рис. 2.5. Адаптивный идентификатор возмущающих воздействий на три класса с коррекцией разделяющей функции

$$\begin{aligned} u_1(0) < u_2(0) < u_3(0) \\ \sigma_1^2(0) = \sigma_2^2(0) = \sigma_3^2(0) = 0. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Выходной сигнал интегратора 10 равен математическому ожиданию соответствующего класса случайного процесса. В случае размыкания ключа 8 сигнал на выходе интегратора 10 запоминается.

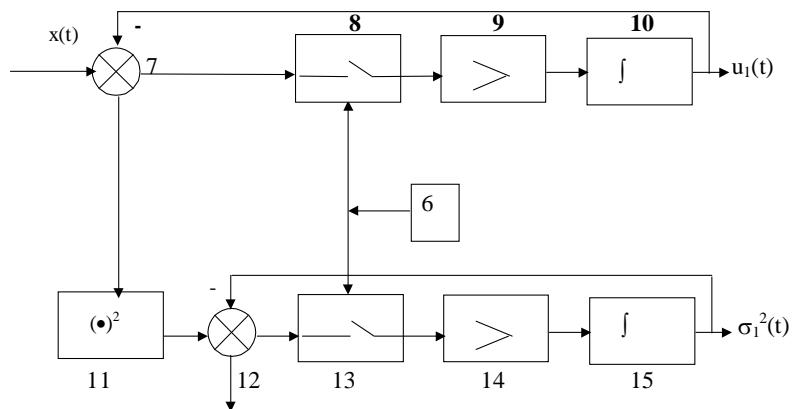


Рис. 2.6. Функциональная схема блока идентификатора

Коррекция разделяющих функций в зависимости от величин дисперсий классов в смеси $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ позволяет осуществлять идентификацию параметров смеси при различных дисперсиях и их соотношениях в результирующей смеси. Представленные алгоритмы идентификации возмущающих воздействий удобно реализовать на ЭВМ. В случае необходимости аналогично реализуется также алгоритм идентификации смеси, состоящей из произвольного числа классов. Схема идентификатора “k” классов приведена в [23].

Для идентификации технологических нарушений, имеющих спорадический характер, где необходимо оценивать только моменты появления возмущающих воздействий, может быть использован следующий алгоритм:

$$U_a = \text{sgn} \left\{ (\sigma^*)^2 - [M\{x(t)\} - x(t)]^2 \right\},$$

$$\text{sgn} \left\{ (\sigma^*)^2 - [M\{x(t)\} - x(t)]^2 \right\} = \begin{cases} 1; & \Delta \varepsilon < 0; \\ 0, & \Delta \varepsilon \geq 0; \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\Delta \varepsilon = (\sigma^*)^2 - [M\{x(t)\} - x(t)]^2,$$

где U_a - единичный сигнал на выходе идентификатора;
 $(\sigma^*)^2$ - заданный порог нормальных режимов;
 $x(t)$ - контролируемый параметр.

воздуха в топку осуществляется вентилятором ВД-12, а разрежение в сушильном тракте - дымососом ДН-19-Б, подача сырого угля в барабан осуществляется дисковым питателем ДТ-25. Щиты-пульты управления топкой и сушилкой, шкаф регистрирующих приборов установлены перед фронтом топки, устройства управления направляющими аппаратами - на отметках размещения вентилятора первичного воздуха и дымососа, датчик влажности высушенного угля - в скребковом затворе, другие технологические датчики - непосредственно в местах отбора информации. Микроконтроллеры, шкаф согласующих устройств и шкаф тиристорного электропривода размещены в специально построенном для этих целей помещении.

Основные технологические параметры процесса следующие: $W_1=23,5-30,5\%$; $W_2=11,6-14,4\%$; зольность топлива $A^d_T=7-9\%$; теплота сгорания топлива 6460-6941 ккал/кг; насыпная масса топлива 780кг/м³; ширина слоя 2,2м; расход топлива $G_T=1911,8$ кг/ч; $h=10-130$ мм; $u_p=4,5-9$ м/ч; $G=46-47$ т/ч; производительность по испаренной влаге 6,5-8,5т/ч; температура газов перед барабаном 750-850°C, в разгрузочной камере 100-110°C, перед дымососом 80-100°C; разрежение перед барабаном 80-100Па, в топке 10-20Па, в разгрузочной камере 20-50Па; давление воздуха после вентилятора 700-90Па, газов после дымососа 500-700Па.

В результате исследований на ЦОФ “Криворожская” установлена работоспособность системы автоматической стабилизации влажности высушенного угля и эффективность использования вероятностного алгоритма управления. Перерегулирование не превышало 10%, время обучения адаптивной системы составило 40-120мин. в зависимости от характера изменения влажности исходного угля, его расхода и элементарного состава топлива.

При автоматическом управлении режимом сушки при задании $T=655^\circ\text{C}$ среднее значение температуры в топке составило $M\{T(t)\}=650^\circ\text{C}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{TA}=12,5^\circ\text{C}$, а при ручном, соответственно, $M\{T(t)\}=686,3^\circ\text{C}$ и $\sigma_{TP}=62,2^\circ\text{C}$. Влажность высушенного угля $M\{W_2(t)\}=11,54\%$ приближалась к заданному значению $W^*_2=12\%$ и ее среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_{WA}=0,527\%$. Амплитуда колебаний влажности не превышала 4%. При ручном управлении $M\{W_2(t)\}=14,14\%$, $\sigma_{WP}=5,07\%$.

За счет автоматизации процесса горения потери тепла из-за химического недожога топлива снизилась на 0,79%, а из-за механического - на 4,87%. Это привело к увеличению к.п.д. топки на 5,82% и соответственно к росту общего к.п.д. сушильной установки на 7,26%. Благодаря этому, появилась возможность увеличить производительность установки

В блоке 58 вычитания определяется разность между сигналами, поступающими от датчика 41 влажности высушенного материала и датчика 33 влажности высушенного материала. Разностный сигнал $\varepsilon_3(t)$ поступает в блок 59 контроля точки росы. В этом случае сигнал с датчика 38 влажности высушенного материала значительно больше сигнала с датчика 41 влажности высушенного материала и на выходе блока вычитания 58 появится разностный сигнал $u_9(t)$ отрицательной полярности, который поступает на вход блока 60 вычитания и при отсутствии сигнала о пересушке (с корректирующего регулятора R5) подается на корректирующий регулятор R6 61, в качестве которого использован интегратор. На выходе интегратора 61 появится сигнал $u_{10}(t)$, который корректирует работу регулятора R3 расхода “первичного” воздуха следующим образом.

Сигнал с регулятора R6 подается на вход регулятора R3 и на вход исполнительного механизма 51, а затем на регулирующий орган 52 подачи “первичного” воздуха.

Если конденсация испаренной влаги продолжается, периодически поступают импульсы на вход интегратора 61. В случае прекращения выпадения влаги на выходе блока вычитания 58 сигнал станет равным нулю. Интегратор 61 запоминает сигнал, соответствующий последнему такту коррекции температуры факела.

Если при достижении точки росы имеет место пересушка материала, на второй выход блока 60 вычитания поступает сигнал с корректирующего регулятора 57 со знаком “минус”, обеспечивая коррекцию температуры факела с учетом пересушки. Если сигнал с регулятора 57 больше сигнала с блока точки росы, будет снижено задание температуры факела, так как приоритет безопасности выше, чем режим точки росы. Это означает, что режим сушки не выдержан и требуется изменение задания степени разрежения в топке или расхода сушильного агента.

В качестве элементной базы аппаратуры использован регулирующий микроконтроллер Ремиконт-100.

Промышленные образцы аппаратуры испытаны в условиях ЦОФ “Криворожская” и “Суходольская” объединения “Луганскуглеобогашение”. Условия ЦОФ “Криворожская”: влажность исходного угля $W_1=20-38\%$, зольность топлива (рядовой уголь марки Г) 7-55%.

На ЦОФ “Суходольская” аппаратура работает на сушильном агрегате № 5. Подготовка сушильного агента осуществляется в слоевой топке типа БЦР-М 2,3х6,5, а процесс сушки - в барабанной сушилке диаметром 2,8 м и длиной 14 м. Сушке подвергается флотоконцентрат, в качестве топлива используется уголь марки Г и Ж. Подача первичного

2.4. Оценка среднего значения параметров

Для оценки среднего значения каждого класса теоретически такое устройство описывается в операторной форме следующим выражением [24]:

$$W(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{Tp}, \quad (2.47)$$

где T - интервал времени, на котором определяется среднее значение реализации;

p - оператор Лапласа.

Структура такого устройства приведена на рис.2.7а. Однако практическая реализация этого устройства сопряжена с известными трудностями, поэтому можно предложить приближенный метод определения среднего значения, основанный на следующих соображениях.

Разлагая e^{-Tp} в ряд Паде при $v=\mu=1$ [25], выражение (2.47) аппроксимируется следующим:

$$W(p) = 1 - e^{-Tp} / Tp \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{2}Tp}. \quad (2.48)$$

Представим (2.48) в дифференциальной форме

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{2}{t} [x(t) - u(t)]. \quad (2.49)$$

Сравнивая (2.48) с выражением (2.49) для параметров смеси, полученным методом стохастической аппроксимации, убеждаемся, что последнее является частным случаем при $\gamma(t)=2/t$. Таким образом, если пренебречь помехами, получаем алгоритм стохастической аппроксимации с постоянным шагом, в противном случае усилитель должен иметь исчезающий во времени коэффициент усиления. Структура полученного звена приведена на рис.2.7б.

Тогда аналогично можно синтезировать устройство для определения оценки дисперсии σ^2 (рис.2.7в).

При необходимости подавления помех следует использовать усилитель с $\gamma(t)$, периодически изменяющимся от максимального значения до нуля (в данном случае $\sup \gamma(t)=\gamma_0=2/T$ с периодом t_0 , меньшим времени, в течение которого процесс может рассматриваться как стационарный).

В случае реализации алгоритмов идентификации возмущающих воздействий с использованием аналоговых устройств приняты некоторые упрощения: величина шага в алгоритмах идентификации принята постоянной, разделяющая функция принята без коррекции по величине

дисперсий классов и аппроксимирована нелинейными функциями потерь.

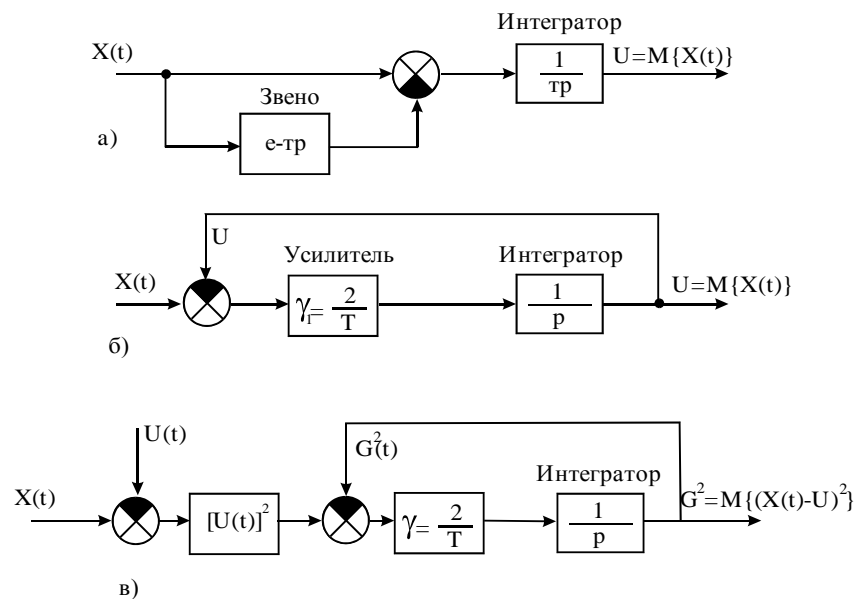


Рис. 2.7. Структура блоков оценки средних значений:

- а) теоретическая для U ;
- б) практическая для U ;
- в) практическая для G^2 .

В экспериментальном образце адаптивного идентификатора для двух классов в смеси разделяющая функция реализована на двух звеньях сравнения и двух диодах.

В качестве интеграторов использованы интеграторы блока динамического преобразования Д05.1 (Московский завод теплоавтоматики (МЗТА)), а остальные элементы идентификатора выполнены с использованием операционных усилителей. Как показали исследования в промышленных условиях (сушильная установка на ЦОФ “Криворожская” ПО “Луганскуглеобогащение”), устойчивость процесса разделения сигнала $\eta(t)$ смеси и получения оценок центров классов зависит от выбора коэффициентов усиления интеграторов γ_1, γ_2 . При $\gamma_1 = \gamma_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ наблюда-

емого усилителя 44, который корректируется сигналом G^* задатчика 34 расхода материала. Этот сигнал подается на управляемый вход усилителя 44 и изменяет его коэффициент усиления таким образом, что большому сигналу с задатчика 34 соответствует больший коэффициент усиления усилителя 44.

Сигнал Q^* задатчика 20 расхода сушильного агента подается на исполнительный механизм 21, который, воздействуя на регулирующий орган 22 дымососа 15, устанавливает заданный расход сушильного агента, величина которого в процессе работы остается неизменной и выбирается из условия максимально допустимой скорости сушильного агента, при которой отсутствует унос частиц сушимого материала из барабана 1.

Для регулирования влажности высушенного угля использована случайная стратегия управления с вероятностной обратной связью реализуемая при помощи датчика влажности 23 исходного питания, идентификатора И1 25, моделирующих блоков 27 и 31, задатчика влажности 41, блоков вычитания 26 и 32, ключей 29 и 33, сумматора 30, регулятора R4 35 расхода материала, задатчика 34, управляемого генератора псевдослучайных импульсов 43, датчика влажности высушенного угля 36, блока оценки среднего его значения 39, звена сравнения 40 и задатчика влажности 41.

Регулятор R4 расхода материала стабилизирует загрузку барабана 1 материалом, воздействуя через исполнительный механизм 36 на регулирующий орган 37 питателя 4, на двух уровнях расхода исходного материала G_1 и G_2 (что зависит от того, какой из ключей 29 или 33 замкнут).

Для предотвращения пересушки текущее значение влажности высушенного материала сравнивают на блоке 55 вычитания с сигналом W^*_{2min} от задатчика минимально допустимой конечной влажности материала, и если сигнал от датчика 38 влажности станет меньше сигнала задатчика 54, то разностный сигнал $\varepsilon_1(t)$ с выхода блока 55 вычитания пройдет через диод 56 на корректирующий регулятор R5 57. Сигнал $u_8(t)$ этого регулятора подается на блок 45 вычитания, чем уменьшает сигнал с управляемого усилителя 44, а это ведет к снижению расхода топлива, “вторичного” и “первичного” воздуха, чем предотвращается пересушка материала.

В процессе сушки материала возможно достижение точки росы, когда испаренная влага конденсируется и выпадает снова в высушенный материал. Это снижает точность управления режимом сушки и, как следствие, КПД сушильной установки.

Для предотвращения режима точки росы использован идентификатор И2 аварийных режимов 39 в соответствии с алгоритмом (2.46).

Сушильный агент образуется в камере 14 при смешивании “вторичного” воздуха из воздухопровода 13 с топочными газами из топки 12.

Топочные газы образуются от сгорания твердого топлива на колосниковой решетке 9 прямого хода. Топливо поступает с конвейера 7 в аккумулирующий бункер 8 и самотеком на колосниковую решетку 9.

Высота слоя топлива устанавливается шибером 10 и измеряется датчиком 47 высоты слоя топлива, сигнал $u_2(t)$ которого подается на регулятор R2 расхода топлива.

Регулятор R2 обеспечивает требуемый расход топлива изменением скорости движения колосниковой решетки 9, воздействуя через исполнительный механизм 48 на регулирующий орган 49.

Для улучшения режима горения топлива подача “первичного” воздуха в топку по воздуховоду 11 регулируется регулятором R3 50, на который поступают сигналы $u_3(t)$ от датчика 33 температуры факела и $u_4(t)$ с регулятора R2 расхода топлива.

В зависимости от расхода топлива регулятор R3 изменяет подачу “первичного” воздуха, воздействуя через исполнительный механизм 51 на регулирующий орган 52. Сигнал датчика 53 температуры факела корректирует подачу “первичного” воздуха регулятором R3, обеспечивая полное сгорание топлива за время его нахождения на решетке 9.

Влажность исходного материала, поступающего с конвейера 2 в бункер 3, измеряется датчиком 23 влажности, сигнал $u_5(t)$ которого подается на блок 24 оценки среднего значения влажности $W_1(t)$ материала в бункере. Параметры этого блока корректируются сигналом $u_1(t)$ датчика 26 веса, который нормирует сигнал на выходе блока 24 в зависимости от производительности конвейера 2 по весу исходного материала.

Сигнал с блока 24 поступает на блок 42 вычитания, где из него вычитается сигнал W_2^* задатчика 41 влажности высушенного материала. Разностный сигнал $\varepsilon(t)$ с выхода блока 42 вычитания усиливается управляемым усилителем 44 и подается через блок 45 вычитания на вход регулятора R1 расхода “первичного” воздуха и на вход регулятора R2 расхода топлива. Эти регуляторы пропорционально разности средней влажности исходного материала в бункере 3 и заданной влажности высушенного материала устанавливают расход топлива и “вторичного” воздуха, воздействуя через свои исполнительные механизмы 48 и 18 на регулирующие органы 49 и 19.

Разностный сигнал $\varepsilon(t)$ на выходе блока вычитания 42 пропорционален среднему количеству влаги, которую необходимо выделить из материала, чтобы его высушить до заданной величины. Коэффициент пропорциональности определяется коэффициентом усиления управляе-

ются незначительные колебания в области установившихся значений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, что вполне приемлемо.

Наиболее целесообразно реализовывать идентификаторы на микроконтроллерах.

В идентификаторе нарушений нормального режима, используемого в аппаратуре автоматизации суши, усилитель и апериодическое звено, схема сравнения и др. выполнены с использованием схем на операционных усилителях. Параметры апериодического звена могут изменяться ступенчато путем изменения сопротивления резистора и емкости конденсатора. Пороговый элемент выполнен по схеме детектора пересечения нулевого уровня. В случае нарушения технологического режима на выходе порогового элемента появится сигнал, включающий в работу одновибратор и ключ. Ключ замыкает цепь реле, которое своим контактом замыкает цепь звукового сигнализатора, а выходной сигнал одновибратора замыкает второй ключ, включая тем самым второе реле, а последнее - цепь световой сигнализации (световой сигнализатор). Одновременно включается цепь светодиода, сигнализирующего о нарушениях режима, например, на мнемосхеме или пульте управления. Световой сигнал отключается с выдержкой времени, а звуковой - при исчезновении нарушения.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассмотренные выше возмущающие воздействия на объекты горного производства могут быть контролируруемыми или неконтролируемыми. В случае контролируемых воздействий можно более оперативно скомпенсировать их влияние на функционирование процесса и тем самым улучшить качество автоматического управления. К таким объектам относятся некоторые аппараты для обогащения угля, сушильные установки и др., когда возмущающими воздействиями являются изменения характеристик исходного сырья, для контроля которых имеются технические средства измерения.

Как правило, возмущающие воздействия представляют собой действие нескольких факторов, среди которых можно выделить основной, подлежащий компенсации. Лишь некоторые объекты горной технологии можно рассматривать с одним видом возмущающего воздействия, например, сушильные установки, в которых возмущающим воздействием является изменение влажности исходного угля при условии стабилизации нагрузки по сырому углю. В некоторых случаях действие нескольких контролируемых воздействий можно заменить одним эквивалентным. Однако в любом случае всегда действуют неконтролируемые возмущения, скомпенсировать которые принципиально невозможно. Поэтому все системы автоматического управления технологическими процессами должны иметь также и контур регулирования по отклонению выходной координаты.

В связи с этим все объекты горного производства целесообразно разделить на два класса: с контролируемыми и неконтролируемыми возмущающими воздействиями. Ниже рассмотрены алгоритмы управления обоими классами объектов.

3.1. Анализ возможных методов управления технологическими процессами

Рассмотренные особенности динамических свойств объектов автоматического управления процессами значительно снижают эффективность функционирования систем и зачастую делают невозможным использование традиционных методов их построения и синтеза.

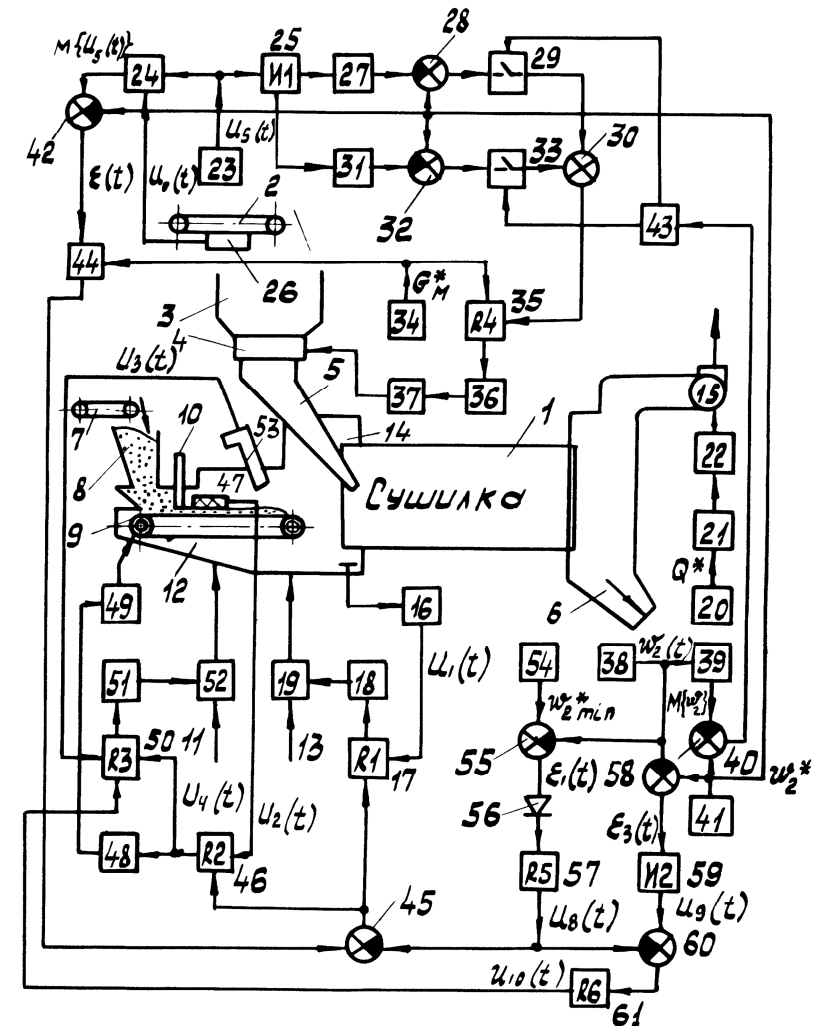


Рис. 6.2. Функциональная схема адаптивной САУ барабанной сушильной установкой

Исходный материал с конвейера 2 через аккумулирующий бункер 3, питатель 4 и течку 5 поступает внутрь барабана 1, где он отдает часть влаги сушильному агенту. Оработанный агент удаляется дымососом 15, а высушенный материал разгружается через течку 6.

9) автоматическую сигнализацию о превышении содержания кислорода выше допустимой нормы, при достижении температуры перед дымососом 115°C, а подшипников дымососа 70°C, крайних положений направляющих аппаратов вентиляторов первичного и вторичного воздуха, дымососа, клапана растопочной трубы и шиберы смесительной камеры, исполнительных механизмов подачи защитного пара, целостности цепи шламового конвейера, скребкового герметичного питателя, верхнего и нижнего уровней в бункерах топлива и исходного угля, верхнего уровня воды в шламовом конвейере.

В аппаратуре предусмотрено дистанционное и местное управление механизмами топки и сушки, исполнительными механизмами подачи защитного пара. При необходимости осуществляется также дистанционное изменение скорости движения колосниковой решетки, скорости питателя исходного угля и питателя топлива, при факельно-слоевой топке, степени открытия направляющих аппаратов вентиляторов первичного и вторичного воздуха, дымососа. Может быть реализована также связь с вышестоящим уровнем управления фабрикой путем выдачи заданий аппаратуре КАСУ.1 от управляющей вычислительной машины, а также выдача необходимой информации в ЭВМ.

Регулирующая часть аппаратуры КАСУ.1 представляет собой четыре взаимосвязанные системы управления подачей топлива, температурой сушильного агента, степенью разрежения в топке и влажностью высушенного угля. Причем последняя система регулирования является верхним уровнем иерархии по отношению к остальным.

Регулирование температуры в топке осуществляется изменением поступающего в нее расхода топлива и количества первичного воздуха, необходимого для поддержания устойчивого процесса горения. Расход первичного воздуха регулируется изменением положения направляющего аппарата вентилятора в соответствии с разностью заданного и текущего значений температуры в топке. Это обеспечивает компенсацию возмущений на входе (влажности и нагрузки по сырому углю).

Изменение расхода сырого угля осуществляется изменением скорости вращения дискового питателя П2ДШ-310А, приводимого в действие регулируемым электродвигателем посредством тиристорного преобразователя типа ЭКТ 160/380.

На рис.6.2 приведена функциональная схема разработанной адаптивной системы управления. Сигнал $u_1(t)$ с датчика 16 давления подается на регулятор R1 17 расхода "вторичного" воздуха, который обеспечивает стабилизацию давления в топке 12, воздействуя через исполнительный механизм 18 на регулирующий орган 19 воздухопровода 13.

Рассмотрим возможность использования различных методов автоматического управления для рассматриваемого класса объектов. Одним из главных препятствий при создании систем автоматического управления являются значительная величина чистого запаздывания сигналов в цепях измерения и наличие условий неопределенности.

Условия неопределенности возникают, когда моменты измерения и приложения возмущающего воздействия разнесены во времени или измерение возмущающего воздействия возможно лишь после его воздействия на процесс.

Задачи автоматического управления объектами в условиях неопределенности зачастую решаются с использованием принципа управления по отклонению. С увеличением коэффициента усиления в замкнутом контуре можно уменьшить влияние неконтролируемых воздействий на объект управления. Такое увеличение коэффициента усиления может достигаться созданием скользящих режимов в релейных системах [26], введением нелинейных корректирующих звеньев [27], созданием систем с переменной структурой [28], с измерением и последующей компенсацией переменного запаздывания [29] и др.

Однако увеличение коэффициента усиления ограничивается наличием запаздывания, нелинейностей и инерции в объекте управления, поэтому без увеличения априорной информации об объекте дальнейшее повышение коэффициента усиления невозможно, а для объектов, запаздывание в которых соизмеримо или больше времени спада автокорреляционной функции возмущающего воздействия, указанный принцип управления использовать невозможно [30,31].

Методы компенсации чистого запаздывания, например, регулятора Смита и Ресвика [31], чувствительны к изменениям параметров процессов. Управление с компенсацией возмущающих воздействий [32] эффективно в тех случаях, когда известны параметры объекта и возмущающих воздействий и последние не изменяются во времени. Наилучшие результаты дает комбинированное управление [33], при котором реализуются оба принципа: управление с обратной связью (по отклонению) и компенсация измеряемых возмущений, однако как их использовать для автоматического управления объектами с возмущающими воздействиями типа смесей, никто не рассматривал.

В некоторых случаях при управлении объектами с чистым запаздыванием эффективен метод прогнозирования с косвенным измерением возмущений. Однако этот метод требует знания априори коэффициентов регрессии, что не всегда возможно реализовать на практике, особенно при нестационарности параметров объекта управления.

В работе [34] рассматриваются задачи управления объектами в

условиях нестатистически заданной неопределенности, т.е. когда возмущение невозможно измерить, априорные сведения о них минимальны и могут быть заданы в виде ограничений. Как можно использовать этот подход при управлении объектами с рассматриваемыми возмущающими воздействиями, неизвестно, и вряд ли целесообразно, так как не учитываются параметры смеси распределений возмущающих воздействий.

Зачастую процесс управления рассматривают как игру, при которой допускается, что распределение возмущений остается почти неизменным, хотя само оно может быть неизвестным. Такой подход развит, например, в работе [35], а в условиях нестохастически заданной неопределенности - в [36]. В последней работе решаются задачи игрового адаптивного управления при условии, что параметры управления неизвестны, причем уточнение априорных оценок осуществляется в результате измерений во время движения объекта, а новые априорные оценки используются для улучшения качества управления. Эти методы использованы при управлении конкретными технологическими объектами.

Для управления технологическими процессами добычи и обогащения угля эти методы недостаточно эффективны из-за большой размерности платежной матрицы, существенно усложняющей нахождение частот системы. Игровые методы не рассматривают управление объектами с возмущениями типа смесей.

Одним из эффективных методов управления является разработанная А.А.Фельдбаумом теория дуального управления [37], обобщающая задачу стохастического управления. Результаты этих исследований могут успешно использоваться также для управления технологическими процессами в горном деле. Основы этой теории изложены в [38]. Задача дуального управления аналитически решается только в простых случаях [38]. Поэтому усилия многих исследователей направлены на разработку субоптимальных алгоритмов дуального управления. При этом приходится отказаться от оптимальности переходного процесса в объекте управления, что позволяет рассматривать объект статическим. Заслуживают внимания работы [24,39], в которых показано, что при коротких выборках, небольшом времени обучения и т.п., оптимальной стратегией оказывается случайная стратегия, что привело к появлению обучающихся систем управления с вероятностными связями [40], которые применяются в тех случаях, когда вероятностные значения переменных определяются проще, чем действительные. Этот подход может оказаться также плодотворным и при возмущениях типа смесей, если научиться идентифицировать их параметры.

В задачах автоматического управления могут использоваться принципы распознавания. При этом может использоваться обучение

1) автоматическую стабилизацию заданной влажности высушенного угля без его пересушки $M\{W_2(t)\}=W^*_{*2} \geq W^*_{2min}$, где $W_2(t)$ - текущая влажность высушенного угля, W^*_{*2} - заданная влажность, W^*_{2min} - минимально допустимая влажность, M - оператор математического ожидания;

2) автоматическое регулирование температуры в топке (в режиме стабилизации $T(t)=T^*$ при $W_2(t) \geq W^*_{2min}$; $p(t) \geq p^*$ или $T(t)=F\{T^*, W_2(t), W^*_{2min}\}$ при ограничениях на влажность высушенного угля или разрежение в топке, где $T(t)$, T^* - текущая и заданная температура в топке, $p(t)$, p^* - текущее и заданное разрежение в топке, $F\{.\}$ - нелинейная функция;

3) автоматическое регулирование степени разрежения в топке ($p(t) \geq p^*$);

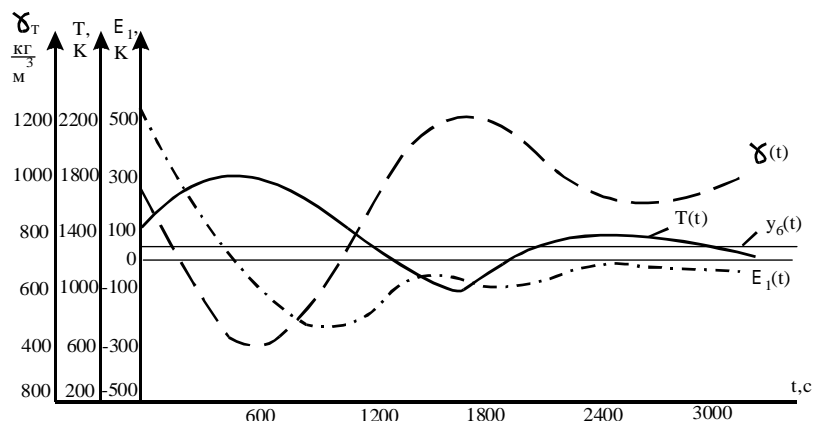
4) автоматическое регулирование подачи топлива в соответствии с нагрузкой сушилки и влажностью сырого угля;

5) автоматическую идентификацию режима точки росы и корректировку температуры сушильного агента с целью предотвращения конденсации испаренной влаги и пересушки угля;

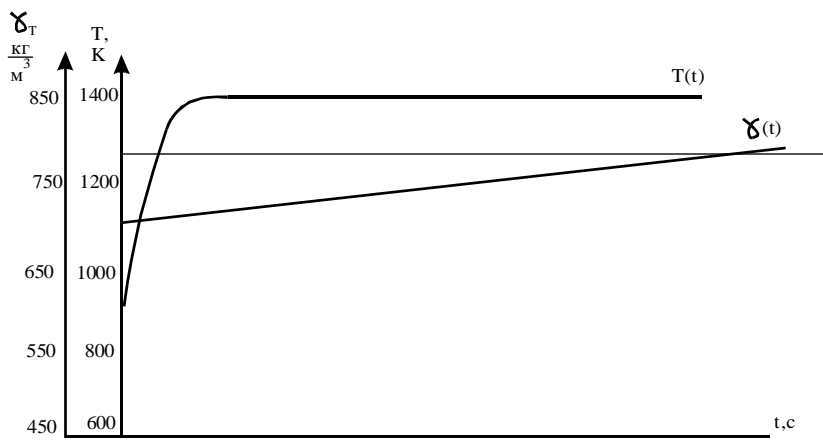
6) автоматическую подачу защитного пара при аварийных ситуациях, а также в место поступления подачи исходного угля (для труб сушилок) при аварийных ситуациях;

7) автоматический контроль и индикацию температуры в топке, перед и за сушилкой, перед дымососом, подшипников дымососа, охлаждающей панели топки воды, разрежения в топке перед и за сушилкой, перед дымососом, давления первичного и вторичного воздуха, за дымососом, защитного пара, подаваемой в мокрый пылеуловитель воды, нагрузки на электродвигатели барабана, дымососа, вентиляторов первичного и вторичного воздуха, питателя исходного угля, степени открытия направляющих аппаратов первичного, вторичного воздуха и дымососа, индикацию нагрузки исходного угля на сушильное отделение, скорости движения питателя исходного угля, содержания кислорода в отходящих газах, крайних положений клапана растопочной трубы и шиберы смесительной камеры, исполнительных механизмов подачи защитного пара, забивки течек разгрузочной камеры и циклона, целости цепей шлакового конвейера, герметичного скребкового питателя, питателя забрасывателя, верхнего и нижнего уровня в бункерах топлива и исходного угля, подачи исходного угля, выпадения росы в выгрузочной камере сушильной установки;

8) автоматическую регистрацию температуры дымовых газов перед сушилкой и дымососом, содержания кислорода в отходящих дымовых газах, влажности высушенного угля, влажности исходного угля, давления защитного пара;



а)



б)

Рис. 6.1. Графики переходных процессов САУ топочным устройством: $T(t)$ – температура в топке, $\gamma_T(t)$ – плотность топлива, y_6 – сигнал термопары, измеряющей температуру в топке, $\varepsilon_1(t)$ – ошибка регулирования. Параметры настройки регулятора: $k_2=0,001, k_3=10^{-5}, k_4=10^{-9}, k_5=1000$ (а), $k_2=0,0002, k_3=10^{-6}, k_4=10^{-9}, k_5=800$ (б)

горения и подсистемы управления процессом сушки.

Аппаратура КАСУ.1 выполняет следующие основные функции:

системы посредством оператора или специального обучающего устройства. Основным допущением, принимаемым в этих работах, является неизменность распределения возмущений, что не удовлетворяется в объектах горного производства.

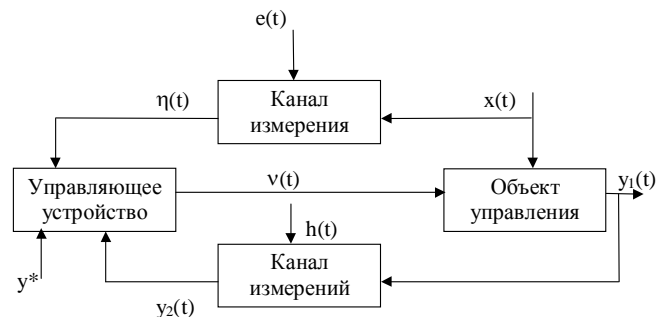
3.2. Постановка задачи управления

Задача управления объектами с возмущениями типа смеси до настоящего времени никем не рассматривалась. Из существующих методов решения задачи управления наиболее приемлемыми представляются методы дуального управления А.А.Фельдбаума [38].

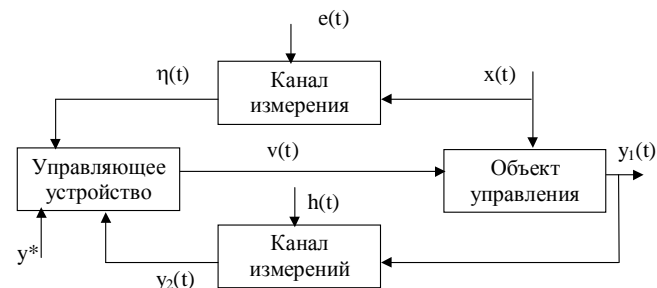
Однако методы дуального управления требуют знания априорных плотностей распределения внешних возмущающих воздействий и параметров объекта управления и приводят к весьма сложным решениям, реализовать которые в таком виде невозможно. Кроме того, плотность вероятностей возмущающих воздействий процессов добычи и обогащения угля априори неизвестна и изменяется во времени в зависимости от характера протекания производственного процесса. Поэтому задачу управления рассмотренным классом объектов можно решить лишь приближенно. При этом приняты следующие условия и допущения: отказ от требования оптимальности переходного процесса, объект управления принимается безинерционным, шумы учитываются только в каналах измерения возмущения и выходной координаты объекта управления, известно количество классов в смеси.

В связи с тем, что процессы добычи и обогащения угля как объекты управления имеют одну управляемую координату, рассмотрим задачу стабилизации одномерного объекта. Принимаем, что плотности распределения возмущающего воздействия и шумов в каналах измерения неизвестны, возмущающие воздействия представляют собой смеси с неизвестными вероятностными характеристиками. Возмущающее воздействие входит аддитивно и мультипликативно в уравнение объекта и допускает его прямое измерение, причем могут иметь место случаи медленно и быстро изменяющихся неизмеряемых возмущений, входящих мультипликативно в уравнение объекта. На рис.3.1а,б приведены структурные схемы рассматриваемых задач дуального управления. Задающее воздействие u^* подается на управляющее устройство, возмущающее воздействие $x(t)$ измеряется в канале измерения, где во время его прохождения примешивается шум $e(t)$. В управляющее устройство поступает сигнал $y_1(t)$, характеризующий состояние объекта управления. В канале измерения к нему примешивается шум $h(t)$. Управляющее устройство выраба-

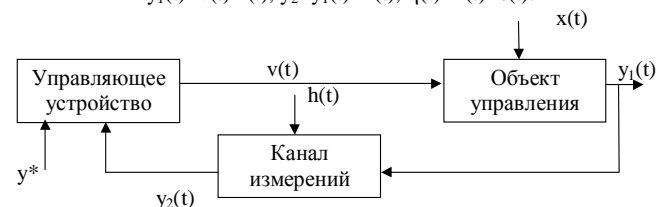
тывает управляющее воздействие $v(t)$, поступающее на управляющий вход объекта.



а) при измеряемом аддитивном возмущающем воздействии:
 $y_1(t) = \mu v(t) + x(t)$; $y_2(t) = y_1(t) + h(t)$; $\eta(t) = x(t) + e(t)$



б) при измеряемом мультипликативном возмущающем воздействии:
 $y_1(t) = v(t) \cdot x(t)$; $y_2(t) = y_1(t) + h(t)$; $\eta(t) = x(t) + e(t)$.



в) при неизмеряемом мультипликативном "медленно" изменяющемся возмущающем воздействии: $y_1(t) = v(t) \cdot x(t)$

Рис. 3.1. Структурные схемы систем дуального управления:
 при измеряемом аддитивном возмущающем воздействии (а),
 при измеряемом мультипликативном возмущающем воздействии (б),
 при неизмеряемом мультипликативном "медленно" изменяющемся возмущающем воздействии (в)

$$G_{1M} = \begin{cases} k_{13} [W_2^* - k_{14} u_1(t)] & \text{при } y_4(t) > \alpha(t) \\ k_{15} [W_2^* - k_{16} u_2(t)] & \text{при } y_4(t) \leq \alpha(t) \end{cases} \quad (6.22)$$

$$\frac{du_1(t)}{dt} = -k_{17} [u_1(t) - W_1(t)] \operatorname{sgn}[(u_1(t) - u_2(t))(2W_1(t) - u_1(t) - u_2(t))] \quad (6.23)$$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = -k_{18} [u_2(t) - W_1(t)] \operatorname{sgn}[(u_1(t) - u_2(t))(u_1(t) + u_2(t) - 2W_1(t))], \quad (6.24)$$

где $k_{10}-k_{18}$ - коэффициенты усиления нелинейных регуляторов;
 y_4 - доходная величина сигнала корректирующего регулятора;
 u_1, u_2 - текущие оценки наиболее вероятных значений влажности исходного угля;
 $\alpha(t)$ - равномерно распределенные на интервале $[0,1]$ случайные числа.

Исследования алгоритмов управления сушильной установкой выполнено на ЭВМ методом Рунге-Куты.

Коэффициенты усиления регуляторов выбраны из условия минимума времени t_n переходных процессов при максимально допустимом заданном значении величины перерегулирования $\sigma=20\%$, выбранной из условия устойчивости процесса горения и сушки.

Для системы управления горением выбраны оптимальные параметры настройки регулятора $k_2=0,001$, $k_3=10^{-5}$, $k_4=10^{-9}$, $k_5=1000$, при которых имеет место слабо колебательный процесс ($\sigma=14\%$, $t_n=180c$) (рис.6.1).

При использовании для управления процессом сушки регуляторов с динамической компенсацией транспортного запаздывания (методом, изложенным в (9.1)), не удалось получить приемлемого качества переходных процессов: при использовании метода динамической компенсации по (9.1) имеет место статическая ошибка $\delta=25-30\%$, а при использовании регуляторов Смита и Ресвика [31] переходные процессы носят колебательный характер, амплитуда автоколебаний значительно превышает допустимые пределы (появляется пересушка, приводящая к аварийным ситуациям).

Эти недостатки устраняются в системе управления процессом сушки со случайной компенсацией возмущений.

Приведенный алгоритм и результаты исследований использованы при создании аппаратуры типа КАСУ.1 [48]. Аппаратура КАСУ.1 предназначена для автоматизации процесса сушки углей в трубах-сушилках и барабанных сушилках со слоевыми и факельно-слоевыми топками и представляет собой адаптивную систему управления, состоящую из двух сильно связанных подсистем: подсистемы управления процессом

$$v_0 = k_2 \varepsilon_1 + k_3 \int_0^t \varepsilon_1 dt + k_4 \varepsilon_1^3 + k_5 u_p \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_1 = T_0^* - T \quad (6.14)$$

$$v_{\text{обг}} = k_6 \varepsilon_2 + k_7 \int_0^t \varepsilon_2 dt + k_8 \varepsilon_2^3 + k_9 u_p \quad (6.15)$$

$$\varepsilon_2 = p_0^* - p, \quad (6.16)$$

где k_1 - k_5 - коэффициенты усиления нелинейного регулятора, обеспечивающего стабилизацию температуры в топке;
 k_6 - k_9 - коэффициенты усиления нелинейного регулятора, обеспечивающего стабилизацию давления в смесительной камере;
 $c(t)$ - текущее значение влажности угля в аккумулирующем бункере перед сушкой;
 G_1^* - заданный расход угля в сушильную установку;
 W_2^* - заданное значение влажности высушенного угля;
 T_0 - среднее время заполнения аккумулирующего бункера;
 h - высота слоя топлива на колосниковой решетке;
 W_1 - влажность исходного угля;
 v_0 - расход воздуха, идущего на горение угля;
 T_0^* - заданное значение температуры в топке;
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - ошибки регулирования по температуре и давлению, соответственно;
 p, p^* - текущее и заданное значение давления.

Управление процессом сушки в силу значительного постоянного запаздывания в объекте по отклонению невозможно, поэтому использован рассмотренный выше вариант комбинированного управления с компенсацией возмущений.

Достаточно эффективным является вариант управления процессом сушки со случайной компенсацией возмущений. Его алгоритм:

$$\frac{dy_1}{dt} = a_{19} (a_{20} G_{1M} - y_1) \quad (6.17)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = a_{21} (a_{22} W_1(t) - y_2) \quad (6.18)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = a_{21} (a_{23} v_1 - y_3) \quad (6.19)$$

$$W_2(t) = y_1(t - \tau_1) + y_2(t - \tau_2) - y_3 \quad (6.20)$$

$$y_4 = k_{10} (W_2^* - W_2) + k_{11} (W_2^* - W_2)^3 + k_{12} \int_0^t (W_2^* - W_2) dt \quad (6.21)$$

Уравнение объекта в общем случае тогда может быть представлено так:

$$y_1(t) = F[v(t), x(t)], \quad (3.1)$$

где $y_1(t)$ - выходная координата объекта;
 $F[\cdot]$ - оператор объекта, заданный с точностью до случайного параметра;
 $v(t)$ - управляющее воздействие;
 $x(t)$ - возмущающее воздействие.

Для случая аддитивного возмущающего воздействия

$$F[v(t), x(t)] = \mu_1 v(t) + \mu_2 x(t), \quad (3.2)$$

где μ_1 - известный статический коэффициент усиления объекта по управляющему входу;
 μ_2 - известный статический коэффициент усиления объекта по возмущающему входу.

Для случая мультипликативного возмущающего воздействия

$$F[v(t), x(t)] = \mu_2 v_2(t) x(t). \quad (3.3)$$

Информация о состоянии объекта управления в канале измерения смешивается аддитивно со случайной помехой $h(t)$:

$$y_2(t) = y_1(t) + h(t), \quad (3.4)$$

где $y_2(t)$ - наблюдаемая координата;
 $h(t)$ - помеха, представляющая собой независимую случайную величину с неизвестной плотностью вероятностей, нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией:

$$M\{h(t)\} = 0; D[h(t)] < \infty. \quad (3.5)$$

Аналогично аддитивно смешивается возмущающее воздействие $x(t)$ с шумом $e(t)$ в канале измерения:

$$\eta(t) = x(t) + e(t), \quad (3.6)$$

где $\eta(t)$ - наблюдаемая величина возмущающего воздействия;
 $e(t)$ - шум, представляющий собой независимую случайную величину с неизвестной плотностью распределения $p[e(t)]$ с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией.

Удельная функция потерь принимается в виде:

$$W(t) = \chi [y^* - y_1(t)]^2, \quad (3.7)$$

где χ - постоянный коэффициент;
 y^* - задающее воздействие;
 $y_1(t)$ - выходная координата объекта.

Задача управления заключается в нахождении управления $v(t)$ управляющим устройством, обеспечивающим минимум среднего риска $R(t)$, т.е.

$$R(t) = M\{w(t)\} = M\{\chi [y^* - y_1(t)]^2\} = M\{R(t)\}, \quad (3.8)$$

где $W(t)$ - функция потерь;

M - оператор математического ожидания (эмпирическое среднее).

Обычно решение задачи дуального управления сводится к байесовой задаче, т.е. управление ищется в классе регулярных стратегий. Как показал А.Г.Ивахненко [41], при относительно коротких выборках или ограниченном времени наблюдения преимущество имеет случайная стратегия.

При известных априори плотности вероятностей возмущающих воздействий и шумов в объекте и каналах измерения разработаны методы решения задачи минимизации полного риска на основе теории статистических решений, динамического программирования и т.п. Однако эти методы неприменимы к рассматриваемому случаю, поскольку априори не заданы плотности вероятностей возмущающих воздействий и шумов в каналах измерения, которые изменяются во времени и зависят от условий функционирования процесса или изменения свойств добываемого или обогащаемого угля.

3.3. Адаптивные алгоритмы дуального управления

Представим уравнение объекта (3.1) с учетом случайного параметра в следующем виде:

$$y_1(t) = F[v(t, q), x(t)], \quad (3.9)$$

где q - неизвестный параметр.

Для нахождения q можно использовать итеративные алгоритмы [14]. Тогда критерий оптимизации представим в виде функционала от параметра

$$J[q(t)] = M\{R[y_1(t), q(t)]\}. \quad (3.10)$$

Функционал (3.10) в явном виде неизвестен, т.е. плотности вероятностей возмущающих воздействий $x(t)$ и шумов $h(t)$ и $e(t)$ в каналах измерения неизвестны, а известны только реализации $R[y_1(t), q(t)]$, которые зависят от случайных процессов $h(t)$ и $e(t)$ и неизвестного параметра $q(t)$.

Условие оптимальности функционала (3.10) согласно [14] имеет вид:

$$\nabla J[q(t)] = M_{y_1}\{\nabla_q R[y_1(t), q(t)]\} = 0, \quad (3.11)$$

где M_{y_1} - оператор математического ожидания выходной координаты объекта;

$$\nabla_q R[y_1(t), q(t)] = \frac{\partial R[y_1(t), q(t)]}{\partial q(t)}. \quad (3.12)$$

Но градиент функционала $\nabla J[q(t)]$ неизвестен, а известны только

запаздыванием, обусловленным транспортированием материала по сушильному тракту. Величина транспортного запаздывания значительно превышает или близка к времени спада автокорреляционной функции основного возмущающего воздействия (влажности исходного угля).

Адекватность полученных моделей процессов горения и сушки установлена методом компьютерного моделирования и сравнением рассчитанных переходных процессов с данными экспериментальных исследований в промышленных сушильных установках (величина расхождения между теоретическими и экспериментальными данными составляют: для модели процесса горения 6-10%, для модели процесса сушки - 12-17% [47]. Полученные модели использованы при синтезе системы управления.

Модель слоевой топки представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, что не позволяет осуществить их линеаризацию, и поэтому известные аналитические методы синтеза структуры и параметров регулятора не приемлемы.

В связи с тем, что во избежание аварийных ситуаций требуется высокое быстродействие регулятора и низкая чувствительность его к высокочастотным помехам, использован нелинейный регулятор с переменным коэффициентом усиления, следующего вида:

$$v(t) = b_1 [\varepsilon + F(\varepsilon)] + b_2 \int_0^t \varepsilon dt, \quad (6.10)$$

где $v(t)$ - выходная координата регулятора;

b_1, b_2 - коэффициенты усиления;

ε - величина ошибки управления;

$F(\varepsilon) = \varepsilon^3$ - нелинейная функция.

Такой регулятор при малых величинах сигнала рассогласования в силу незначительной величины $F(\varepsilon)$ обеспечивает ПИ-закон регулирования, а при больших рассогласованиях коэффициент усиления значительно возрастает, что приводит к повышению его быстродействия. Выбор параметров настройки регулятора выполнен методом компьютерного моделирования.

Полученный алгоритм управления слоевой топкой имеет следующий вид:

$$u_p = k_1 + G_1^* \frac{c(t) - W_2^*}{h} \quad (6.11)$$

$$\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{6}{T_0} \frac{dc(t)}{dt} + \frac{12}{T_0^2} c(t) = \frac{12}{T_0^2} W_1(t) \quad (6.12)$$

Таблица 6.1

Значения коэффициентов модели процесса горения	
Выражение для определения	ЧИСЛОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ
$1/(1-m)bhl$	1,06
$(1 - m_0)\gamma_{\text{то}}bh(1 - k'_1)$	227,4
$(1 - m_0)\gamma_{\text{то}}h(1/l)$	15,04
$bh(1-m)$	0,168
$1/(1-m)bhl c_T$	0,001
q_{H}^p	$2827 \cdot 10^4$
$1 \cdot 0.01 A^d$	0,88
γ_b	1,29
$10^{-3} \varphi c_{\text{ПР}} bl$	0,021
$\overline{\alpha F''}$	424,4
$c_{\text{П}}$	1230
c_T	1060

$$\frac{dy_1}{dt} = a_1 [a_2 G(t - \tau_1) - y_1] \quad (6.6)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = a_3 [a_4 W_1(t - \tau_2) - y_2] \quad (6.7)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = a_3 [a_5 - V_1 - y_3] \quad (6.8)$$

$$W_2 = y_1 + y_2 + y_3, \quad (6.9)$$

где y_1, y_2, y_3 – составляющие влажности высушенного угля по расходу исходного угля, его влажности и скорости сушильного агента;
 $W_1(t)$ – текущая влажность исходного угля;
 τ_1, τ_2 – время чистого запаздывания по соответствующим каналам, $\tau_1=900\text{с}$, $\tau_2=480\text{с}$;
 a_1 – a_5 – коэффициенты, $a_1=5,95 \cdot 10^{-3}$; $a_2=0,03$; $a_3=2,778 \cdot 10^{-3}$; $a_4=0,7$; $a_5=0,2$.

Полученные системы уравнений, описывающие процесс горения угля в слоевой топке и процесс сушки угля в барабанной сушилке, представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения. Причем процесс сушки описывается дифференциальными уравнениями с чистым

реализации $\nabla_q R[y_1(t), q(t)]$. Градиент функционала (3.11) может быть определен по следующей формуле [14]:

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\gamma(t) \nabla_q R[y_1(t), q(t)], \quad (3.13)$$

где $\gamma(t)$ – коэффициент, удовлетворяющий условиям (2.5).

Вычисление градиента по $q(t)$ приближенно можно заменить вычислением градиента функционала (3.12) по $y_2(t)$:

$$\nabla_q R[y_1(t), q(t)] \approx \nabla_{y_2} R[y_2(t), y^*], \quad (3.14)$$

так как изменения $q(t)$ всегда будут приводить к однозначному изменению координаты $y_2(t)$. Компенсация указанного упрощения может обеспечиваться выбором нормирующего множителя χ в выражениях среднего риска (3.8). Тогда значения наблюдаемого градиента функционала (3.11) можно приближенно записать в форме

$$\nabla_q R[y_1(t), q(t)] \approx -2\chi[y^* - y_2(t)]. \quad (3.15)$$

Вводя величину (-2χ) в выражение для $\gamma(t)$, определим алгоритм адаптации неизвестного параметра $q(t)$ в следующем, виде

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\gamma(t)[y_2(t) - y^*]. \quad (3.16)$$

Тогда в установившемся режиме $M\{y_i(t)\} = y^*$ при аддитивном возмущающем воздействии управляющее воздействие

$$v(t) = \mu_1^{-1}[y^* - \mu_2 x(t)] \quad (3.17)$$

и при мультипликативном возмущающем воздействии

$$v(t) = \frac{y^*}{\mu_2 x(t)}. \quad (3.18)$$

В соответствии с результатами второго раздела возмущающее воздействие в виде смеси, состоящей из k -классов, аппроксимируем суммой

$$\eta(t) \approx \sum_{i=1}^k U_i(t) p_i^*; \sum_{i=1}^k p_i^* = 1, \quad (3.19)$$

где $\eta(t)$ – наблюдаемая реализация смеси возмущающего воздействия в момент времени t ;

$u_i(t)$ – оценка центра i -го класса;

p_i^* – заданная вероятность появления i -го класса.

Рассмотрим наиболее важный для практики случай возмущающего воздействия, состоящего из двух классов.

Алгоритм управляющего устройства зависит от того, какие вероятностные характеристики возмущающего воздействия определяются в процессе функционирования объекта. Так, если идентифицируются только оценки центров классов, алгоритм управляющего устройства

можно представить в следующем виде:

$$v(t)=q_1(t)v_1(t)+[1-q_1(t)]v_2(t) . \quad (3.20)$$

При аддитивном возмущающем воздействии, исходя из (3.2)

$$v_1(t)=\mu_1^{-1}[y^*-\mu_2 u_1(t)] \quad (3.21)$$

$$v_2(t)=\mu_1^{-1}[y^*-\mu_2 u_2(t)] . \quad (3.22)$$

Соответственно при мультипликативном возмущающем воздействии

$$V_1(t)=\frac{y^*}{\mu_2 u_1(t)}; \quad V_2(t)=\frac{y^*}{\mu_2 u_1(t)} , \quad (3.23)$$

где $q_1(t)$ - текущая вероятность появления управляющего воздействия $u_1(t)$, определяемая управляющим устройством.

Тогда окончательно получим алгоритм дуального управления при аддитивном возмущающем воздействии:

$$v(t)=\mu_1^{-1}\{[y^*-\mu_2 u_1(t)]q_1(t)+[y^*-\mu_2 u_2(t)][1-q_1(t)]\} \quad (3.24)$$

При мультипликативном возмущающем воздействии:

$$V(t)=y^*\left(\frac{q_1(t)}{\mu_2 u_1(t)}+\frac{1-q_1(t)}{\mu_2 u_2(t)}\right). \quad (3.25)$$

Величина параметра $q_1(t)$ характеризует вероятность появления стратегии $v_1(t)$, а $(1-q_1(t))$ вероятность стратегии $v_2(t)$. Вероятность $q_1(t)$ стратегии $v_1(t)$ определяется по формуле:

$$q_1(t)=\text{sgn}[q_1^*(t)-\alpha(t)], \quad (3.26)$$

где $q_1^*(t)$ - заданная вероятность появления управляющего воздействия $V_1(t)$, определяемая аналогично (3.16):

$$\frac{dq_1^*(t)}{dt}=\gamma(t)[y^*-y_2(t)]; \quad (3.27)$$

$\alpha(t)$ - равномернораспределенные на интервале $[0,1]$ случайные числа.

На заданную вероятность должно быть наложено ограничение

$$0 \leq q_1^*(t) \leq 1 . \quad (3.28)$$

Алгоритм (3.24) в (3.25) назовем алгоритмами дуального управления со случайной стратегией.

Если алгоритм изучения предусматривает вычисление вероятности появления классов в смеси $p_1^*(t)$ и $(1-p_1^*(t))$, управляющее воздействие для случая двух классов в смеси можно определить по формуле:

$$v(t)=p_1(t)v_1(t)+[1-p_1(t)]v_2(t)+q_2(t), \quad (3.29)$$

где $p_1(t)$ - текущее значение вероятности появления первого класса в смеси;

$q_2(t)$ - неизвестный параметр.

$$(1-m)\gamma_T b h l c_T \frac{dT}{dt} = Q - Q' , \quad (6.4)$$

где T - температура процесса горения;

C_T - теплоемкость слоя топлива;

Q, Q' - количество тепла, поступающего в топку и выносимого из нее.

После подстановки соответствующих значений и необходимых преобразований получаем окончательное уравнение теплового баланса слоевой топки:

$$\begin{aligned} (1-m)\gamma_T b h l c_T \frac{dT}{dt} = & (1-m_0)\gamma_{T0} b h u_p c_{T0} + c_B t_B \gamma_B v_0 + \\ & + q_H^p (1-m_0)\gamma_{T0} h u_p \xi_I \frac{v_0}{\ell} - \\ & - c_{\Pi} T \left[(1-m_0)\gamma_{T0} h u_p \xi_I \frac{v_0}{\ell} (1-0,01A^d) + v_0 \gamma_B (1+d_0) \right] - \\ & - \phi c_{\Pi P} \left[(0,01T)^4 - (0,01T_W)^4 \right] b \ell - \bar{\alpha} F'' (T - T_W) - \\ & - c_T k_1' (1-m_0)\gamma_{T0} b h u_p - c_{T3} T_3 (1-m)\gamma_T b h u_p, \end{aligned} \quad (6.5)$$

где c_{T0}, t_{T0} - соответственно теплоемкость и температура топлива, поступающего в топку;

c_B, γ_B, t_B - соответственно теплоемкость, плотность и температура поступающего воздуха;

c_{Π}, c_{T3} - теплоемкость соответственно отходящих газов и шлака (зола);

q_H^p - тепло, выделяемое при сгорании топлива;

A^d - зольность топлива;

Wd_0 - влажность окружающего воздуха;

T, T_3, T_W - температура соответственно горящего слоя и отходящих газов, шлака (зола), стенок топки;

$\phi, c_{\Pi P}$ - соответственно угловой и приведенный коэффициенты излучения поверхности слоя топлива;

F'' - отдающая тепло поверхность слоя;

$\bar{\alpha}$ - суммарный коэффициент теплоотдачи от газов к стенке топки.

Значения параметров математической модели процесса горения натурального топлива приведены в табл.6.1.

Процесс сушки. Математическая модель процесса сушки концентрата:

Процесс горения натурального топлива. Топочное устройство должно подготовить определенное количество сушильного агента, достаточного для испарения влаги, содержащейся в сыром угле

$$W_b = \frac{G_1(M\{W_1(t)\} - W_2^*)}{100 - W_2^*}, \quad (6.1)$$

где W_b - количество влаги, которую необходимо испарить из угля;
 G_1 - производительность сушилки по сырому материалу;
 W_2^* - заданная конечная влажность угля;
 $M\{W_1(t)\}$ - среднее значение влажности исходного угля.

Исходными уравнениями для получения математической модели процесса горения натурального топлива являются уравнения материального и теплового балансов реагирующих веществ. При ее построении допускают отсутствие распределения параметров по координатам топки и частиц топлива. Материальный баланс по натуральному топливу (углю) можно записать так [47]:

$$(1 - m)bhl \frac{dy_T}{dt} = B_0 - B_0' - B_0'', \quad (6.2)$$

где m - порозность слоя топлива;
 b - ширина решетки;
 h - высота слоя топлива на решетке;
 l - длина решетки;
 γ_T - текущая плотность топлива;
 B_0, B_0', B_0'' - количество топлива соответственно загружаемого, исчезающего вследствие химических реакций и выносимого.
 После преобразования он принимает вид

$$(1 - m)bhl \frac{dy_T}{dt} = (1 - k_1')(1 - m_0)\gamma_{T0}bhu_p - (1 - m_0)\gamma_{T0}\xi_1 u_p \frac{V_0}{\ell} - (1 - m)\gamma_T bhu_p, \quad (6.3)$$

где m_0, γ_0 - начальные порозность и плотность слоя топлива;
 v_0 - объемный расход воздуха;
 u_p - скорость перемещения топлива по решетке;
 k_1', ξ_1 - коэффициенты, учитывающие соответственно долю топлива, покидающего топку в единицу времени, и реакционные свойства топлива.

Тепловой эффект реакции настолько велик, что ввод дополнительного тепла извне не требуется. Таким образом, тепловой баланс процесса может быть представлен как

Алгоритм дуального управления объектом (3.29) назовем алгоритмом со смешанной стратегией управления. В случае "k" классов в смеси алгоритм со смешанной стратегией управления при аддитивном возмущающем воздействии примет следующий вид:

$$v(t) = \mu_1^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k [y^* - \mu_2 u_i(t)] p_i(t) \right\} + q_2(t); \quad (3.30)$$

$$\sum_{i=1}^k p_i^*(t) = 1,$$

где $p_i^*(t)$ - заданная вероятность i-го класса в смеси.

Здесь принято (для двух классов в смеси):

$$q^*(t) = p_1^*(t). \quad (3.31)$$

Покажем, что при аддитивном возмущающем воздействии это равенство выполняется.

Рассмотрим величину статической ошибки ε при (3.31) и непрерывающихся классах.

Тогда

$$M\{y_1(t)\} = \mu_1 M\{v(t)\} + \mu_2 M\{x(t)\}. \quad (3.32)$$

Подставим в (3.32) вместо $M\{v(t)\}$ и $M\{x(t)\}$ их значения:

$$M\{x(t)\} = u_1 p_1^* + u_2 (1 - p_1^*); \quad (3.33)$$

$$M\{v(t)\} = v_1 q_1^* + v_2 (1 - q_1^*). \quad (3.34)$$

После подстановки (3.33) и (3.34) в (3.32) получим:

$$M\{y_1(t)\} = \mu_2 [P_1^* u_1 + (1 - P_1^*) u_2] + \mu_1 [q_1^* v_1 + (1 - q_1^*) v_2]. \quad (3.35)$$

Учитывая, что при $y^* = M\{y_1(t)\}$ в устойчивой системе ($y^* = \text{const}$):

$$y^* = \mu_2 x(t) + \mu_1 v(t), \quad (3.36)$$

величина управляющего воздействия

$$v(t) = \mu_1^{-1} [y^* - \mu_2 x(t)] \quad (3.37)$$

соответственно

$$v_1(t) = \mu_1^{-1} [y^* - \mu_2 U_1(t)]; \quad (3.38)$$

$$v_2(t) = \mu_1^{-1} [y^* - \mu_2 U_2(t)]. \quad (3.39)$$

Подставив в (3.35) значения управляющих воздействий по (3.38) и (3.39), получим:

$$M\{y_1(t)\} = \mu_2 p_1^* u_1(t) + \mu_2 (1 - p_1^*) u_2(t) + q_1^* y^* - \mu_2 q_1^* u_1(t) + (1 - q_1^*) y^* - (1 - q_1^*) \mu_2 u_2(t). \quad (3.40)$$

По условию $q_1^* = p_1^*$, тогда

$$M\{y_1(t)\} = \mu_2 q_1^* u_1 + \mu_2 (1 - q_1^*) u_2 + q_1^* y^* - \mu_2 q_1^* u_1 + (1 - q_1^*) y^* - (1 - q_1^*) \mu_2 u_2 = q_1^* y^* + (1 - q_1^*) y^* = y^*. \quad (3.41)$$

ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Разработанные методы и алгоритмы адаптивного управления позволили создать промышленную аппаратуру автоматизации процессов сушки угольного концентрата, флотации угольных шламов, осветления шламовых вод, сгущения отходов флотации и др. объектов обогащательных фабрик для управления качеством конечных продуктов, традиционные методы для которых оказались непригодными или неэффективными. Ниже дается краткое описание адаптивных систем управления рядом технологических процессов, разработанных в Восточноукраинском национальном университете и институте НИПИУглеавтоматизация в последние годы.

6.1. Адаптивное управление процессом сушки концентрата

Процесс сушки на углеобогащательных фабриках является завершающей технологической операцией по доведению влажности угольного концентрата до нормируемого значения. В качестве сушильных устройств используются барабаны, трубы-сушилки и сушка в кипящем слое. Этот процесс включает в себя подготовку сушильного агента в топочных агрегатах и собственно процесс сушки. В соответствии с этим система автоматического управления процессом сушки включает в себя две связанные между собой подсистемы: управления процессом горения натурального топлива и управления сушилкой.

Процесс подготовки теплоагента для сушильных установок на большинстве углеобогащательных фабриках Украины осуществляется в слоевых топках, топливом для которых является уголь.

Целью управления процессом сушки является стабилизация среднего значения влажности высушенного угля при ограничениях на температуру в топке, во избежание пересушки и конденсации испаренной влаги, а также поддержания разрежения в топке на заданном уровне, обеспечивающем нормальное безаварийное функционирование процесса.

На процесс сушки действуют стохастические возмущающие воздействия, характеристики которых априори неизвестны и имеют квазистационарный характер.

Рассмотрим динамические свойства процессов горения натурального топлива в слоевой топке и сушки угольного концентрата.

Из (3.41) следует, что величина статической ошибки при $q_1^* = p_1^*$ на выходе объекта равна нулю:

$$\varepsilon = y^* - M\{y_1(t)\} = 0. \quad (3.42)$$

В случае нарушения равенства $q_1^* = p_1^*$ рассмотрим разность

$$e = q_1^* - p_1^*, \quad (3.43)$$

тогда

$$p_1^* = q_1^* - e. \quad (3.44)$$

Подставим (3.43) в (3.44). После раскрытия скобок получаем:

$$\begin{aligned} M\{y_1(t)\} &= \mu_2(q_1^* - e)u_1 + \mu_2(1 - q_1^* + e)u_2 + q_1^*y^* - \mu_2q_1^*u_1 + (1 - q_1^*)y^* - \\ &- \mu_2(1 - q_1^*)u_2 = y^* - \mu_2eu_1 + \mu_2eu_2 = y^* + e\mu_2(u_2 - u_1). \end{aligned} \quad (3.45)$$

Из (3.45) получим выражение для ошибки

$$\begin{aligned} \varepsilon &= y^* - M\{y_1(t)\} = e\mu_2(u_1 - u_2) = \\ &= (q_1^* - p_1^*)\mu_2(u_1 - u_2). \end{aligned} \quad (3.46)$$

Соотношение (3.46) связывает среднюю ошибку ε на выходе системы с ее регулирующим параметром q_1^* - заданной вероятностью появления стратегии, а $(1 - q_1^*)$ - вероятностью появления стратегии $v_2(t)$, т.е. величина q_1^* является управляющей величиной, т.е. равенство (3.31) выполняется. Вероятность $p_1(t)$ определяется по аналогии с (3.26):

$$p_1(t) = \text{sgn}[p_1^*(t) - \alpha(t)], \quad (3.47)$$

где $p_1^*(t)$ - заданная вероятность первого класса в смеси:

$$\frac{dp_1^*}{dt} = \gamma(t)[y^* - y_2(t)]; q_1^* = p_1^*. \quad (3.48)$$

Для мультипликативного возмущающего воздействия соотношение (3.31) не выполняется. Покажем это для случая двух классов в смеси возмущающих воздействий.

По теореме умножения вероятностей можно записать (предполагая их независимость):

$$M\{y_1(t)\} = M\{v(t)\}\mu_2 M\{x(t)\} = y^*, \quad (3.49)$$

где

$$M\{v(t)\} = v_1(t)q_1^* + v_2(t)(1 - q_1^*) = \frac{y^*}{\mu_2 u_1(t)} q_1^* + \frac{y^*}{\mu_2 u_2(t)} (1 - q_1^*). \quad (3.50)$$

Возмущающее воздействие при $k=2$ может быть представлено следующим выражением:

$$M\{x(t)\} = u_1(t)p_1^* + u_2(t)(1 - p_1^*). \quad (3.51)$$

Равенство $M\{y_1(t)\} = y^*$ строго выполняется, если

времени корреляции $\hat{\tau}_k$. Причем при достижении равенства $N=N_1^*$ ($N_1^*=50-70$ выбирается из условия получения состоятельной оценки $\hat{\tau}_k$) в следующий момент времени на выходе звена сравнения 13 появится сигнал отрицательной полярности, который приводит к тому, что на выходе порогового элемента 14 появится единичный сигнал, замыкающий ключ 15, разрешая тем самым перенести τ_k с выхода блока 12 через сумматор 16 в интегратор 17 (память). Этот сигнал сравнивается в звене сравнения 18 с сигналом τ_3^* и в случае $\tau_3^* < \tau_k$ на выходе порогового элемента 19 появится сигнал. На вход элемента И 20 подаётся в этом случае разрешающий сигнал с порогового устройства 19. При этом на другом входе этого элемента имеется разрешающий сигнал (при включенном объекте) с порогового элемента 21. Тогда на выходе элемента И 20 в момент времени t_1 появляется сигнал, который замыкает ключи 1 и 2 и размыкает ключ 3, переводя тем самым объект на управление по первой стратегии (ПИД-регулятор).

После этого при поступлении следующего импульса на выходе звена сравнения 22 сигнал станет меньше нуля (так как $N_2^*=N_1^*+1$), следовательно, на выходе порогового элемента 23 появится сигнал, поступающий на один из входов элемента ИЛИ 24, на второй вход которого подаётся разрешающий сигнал с элемента НЕ 8. Поэтому на выходе элемента ИЛИ 24 появится сигнал, обнуляющий счетчик к новому циклу измерений τ_k .

Если нарушено одно из условий, а именно: $\tau_3^* - \tau_k > 0$, $N < N_1^*$ или $y(t) < 0$ (объект управления включен), разрешающего сигнала на переключение стратегии управления объектом не поступит.

Нарушение второго условия может произойти, если ухудшится качество процесса управления ($\varepsilon(t) < \varepsilon_1^*$) или ($\varepsilon(t) > \varepsilon_2^*$).

Тогда на выходе элемента ИЛИ 25 появится сигнал, и при $y_3(t) > 0$ с элемента И 7 сигнал подается на элемент НЕ 8, а последний размыкает ключ 6, поэтому вычисление τ_k прекращается.

Рассмотрим теперь работу системы по первой стратегии управления. Для этого необходимы следующие условия: $\varepsilon(t) < \varepsilon_2^*$ и $\varepsilon(t) < \varepsilon_1^*$, $\tau_3^* - \tau_k < 0$. При нарушении любого из них система автоматически возвращается в режим работы с исчезающей обратной связью, так как сигнал на выходе элемента И 20 исчезает.

$$M\{v(t)\} = \frac{y^*}{\mu_2 M\{x(t)\}} = \frac{y^*}{\mu_2 [p_1^* u_1 + (1-p_1^*) u_2]}. \quad (3.52)$$

Тогда величину p_1^* , при которой выполняется равенство (3.52), можно найти, решая следующее уравнение с учетом (3.50):

$$\frac{y^*}{\mu_2 u_1} q_1^* + \frac{y^*}{\mu_2 u_2} (1 - q_1^*) = \frac{y^*}{\mu_2 [p_1^* u_1 + (1-p_1^*) u_2]}, \quad (3.53)$$

Откуда

$$q_1^* = \frac{u_1 u_2}{[p_1^* u_1 + (1-p_1^*) u_2] (u_2 - u_1)} - \frac{u_1}{u_2 - u_1}. \quad (3.54)$$

Из (3.54) следует, что при $q_1^*=0$ и при $q_1^*=1$ соответственно $p_1^*=0$ и $p_1^*=1$, т.е. условия (3.31) выполняются только на концах интервала $[0,1]$. Анализ (3.54) показывает, что q_1^* зависит только от соотношения классов в смеси $\psi = u_1/u_2$:

$$q_1^* = \frac{\Psi}{[\Psi p_1^* - (1-p_1^*)] (1-\Psi)} - \frac{\Psi}{1-\Psi}. \quad (3.55)$$

На рис.3.2 приведены зависимости $q_1^* = f(p_1^*)$ при различных значениях ψ . При $\psi > 1$, $q_1^* > p_1^*$, а при $\psi < 1$, $q_1^* < p_1^*$, причем при $\psi \rightarrow 1$, $q_1^* \rightarrow p_1^*$ (см. рис.3.2, прямая 6), т.е. в интервале $p_1^*(0,1)$, $q_1^* \neq p_1^*$ и только на концах этого интервала $q_1^* = p_1^*$. В связи с тем, что соотношение ψ обычно не превышает 1,5-2,0, приближенно можно считать $q_1^* \approx p_1^*$.

Неточность выполнения равенства $q_1^* = p_1^*$ и смещенность оценок p_1 в случае сильно пересекающихся классов устраняется составляющей по отклонению $q_2(t)$.

Тогда для мультипликативного возмущающего воздействия алгоритм управления принимает следующий вид:

$$v(t) = y^* \left(\sum_{i=1}^k \frac{p_i}{\mu_2 u_i(t)} \right) + q_2(t); \sum_{i=1}^k p_i^* = 1, \quad (3.56)$$

где p_i , p_i^* - соответственно текущая и заданная вероятность появления классов в смеси.

Величина $q_2(t)$ в (3.56) определяется по аналогии с (3.26).

В случае вычисления вероятности появления классов в смеси в управляющем устройстве управляющее воздействие определяется по формуле

$$v(t) = M\left\{ \sum_{i=1}^k p_i^* v_i(t) \right\} + q_3(t); \sum_{i=1}^k p_i^* = 1, \quad (3.57)$$

где $q_3(t)$ - неизвестный параметр управления, подлежащий определению.

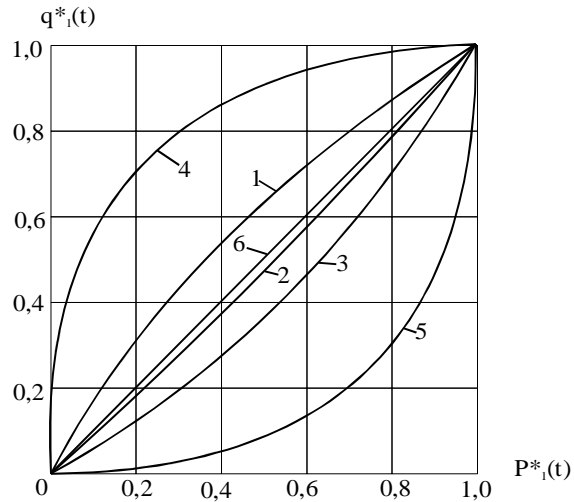


Рис. 3.2. Зависимость вероятности стратегии управления от вероятности появления классов в смеси при: 1 - $\psi=1,78$; 2 - $\psi=0,94$; 3 - $\psi=0,56$; 4 - $\psi=10$; 5 - $\psi=0,1$; 6 - $q^*_1=p^*_1$ (аддитивное возмущающее воздействие)

Полученный алгоритм назовем алгоритмом с регулярной стратегией управления. При аддитивном возмущающем воздействии и «k» классов в смеси алгоритм (3.57) имеет вид:

$$v(t) = \mu_1^{-1} M \left\{ \sum_{i=1}^k [y^* - \mu_2 u_i(t)] p_i^* \right\} + q_3(t); \quad (3.58)$$

$$\sum_{i=1}^k p_i^* = 1,$$

соответственно при мультипликативном возмущающем воздействии при допущении $p_i^* = q_i^*$

$$v(t) = y^* M \left\{ \sum_{i=1}^k \frac{p_i^*}{\mu_2 u_i(t)} \right\} + q_3(t), \quad (3.59)$$

где p_i^* - заданная вероятность.

Здесь $q_3(t)$ вычисляется также по (3.26). При вычислениях $q_1(t)$, $q_2(t)$ и $q_3(t)$ величину коэффициента рекомендуется определять по формуле:

11 путем деления общей длительности импульсов $t_{\text{имп}}$ на их количество N , а в блоке 12 (усилителе с коэффициентом усиления $\xi=2$) оценка

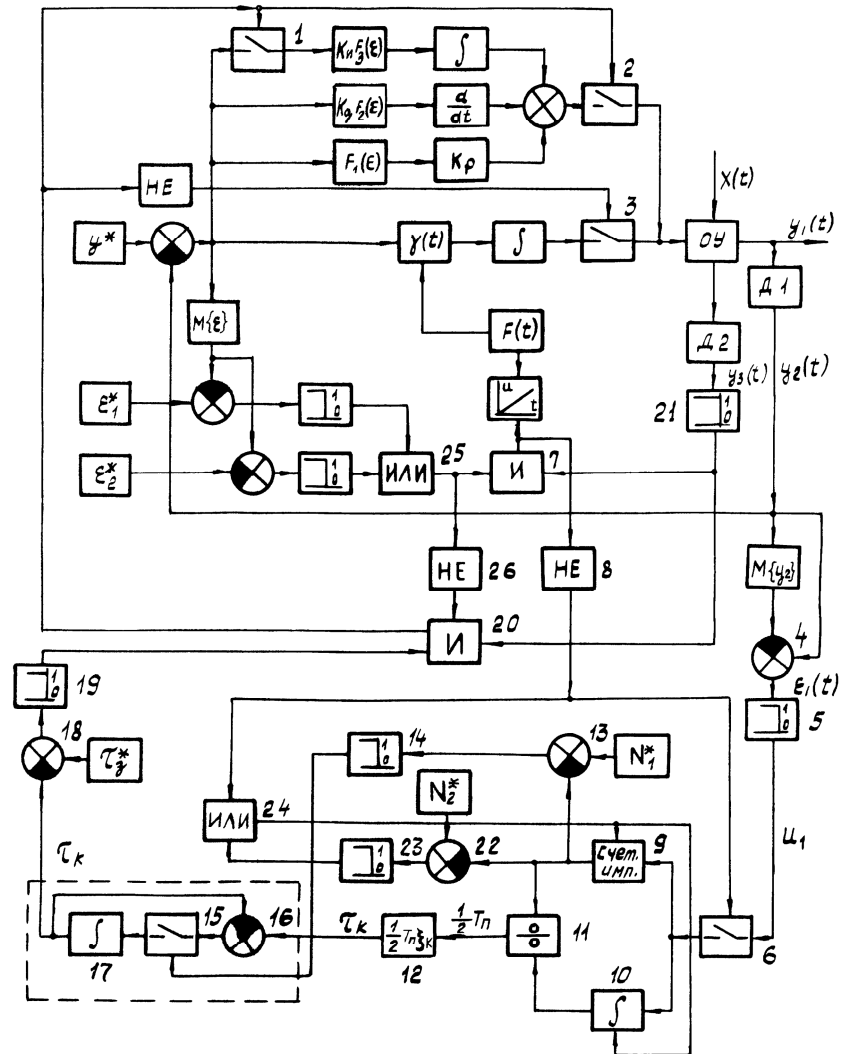


Рис. 5.13. Функциональная схема адаптивной САУ с переменной стратегией управления при неконтролируемом возмущающем воздействии

τ_3^* - время запаздывания в объекте управления, установленное в качестве задания.

Оценка времени корреляции вычисляется оперативно по следующей формуле [102]:

$$\hat{\tau}_k = \frac{2 \sum_{i=1}^{N_0} \Delta t_i}{N_0}, \quad (5.16)$$

где Δt_i - интервал времени между нулями реализации процесса;
 N_0 - число пересечений нулевого уровня.

Состоятельная оценка $\hat{\tau}_k$ имеет место при $N_0=50-70$.

Структурная схема адаптивной системы управления, функционирующей по алгоритму (5.15), приведена на рис. 5.13. Система работает следующим образом. В системе предусмотрены две стратегии: регулярная стратегия с нелинейным ПИД-законом управления (4.10) с дополнением третьего нелинейного элемента $F_3(\varepsilon)$ и дифференцирующего звена и стратегия управления с исчезающей во времени обратной связью (4.21). Первая стратегия используется при $\tau_3 < \tau_k$, а вторая при $\tau_3 \geq \tau_k$ (τ_3 - время чистого запаздывания в объекте, причем τ_3 может быть больше τ_3^* , т.е. задание в системе выбирается для обеспечения нужного соотношения между τ_3^* и τ_k , например, $\tau_3^* = 0,5\tau_k$).

При использовании первой стратегии ключи 1 и 2 замкнуты, а 3 разомкнут. При разомкнутых ключах 1 и 2 и замкнутом ключе 3 используется вторая стратегия управления. Выбор необходимой стратегии управления осуществляется адаптивно в зависимости от времени корреляции возмущающего воздействия, определяемого по реализации выходной координаты объекта при отсутствии управляющих воздействий (при второй стратегии, когда $\gamma(t)=0$). Это исключает возможность ложного счета числа пересечений нулевого уровня процесса. Для этого выходной сигнал объекта $y_2(t)$ центрируется в звене сравнения 4, т.е. его выходной сигнал равен

$$\varepsilon_1(t) = y_2(t) - M\{y_2(t)\}. \quad (5.7)$$

При $\varepsilon_1(t) < 0$ на выходе порогового устройства 5 появляются единичные сигналы длительностью Δt_i , т.е. половине периода. Если $\varepsilon(t) \leq \varepsilon_1^*$ и $\varepsilon(t) \leq \varepsilon_2^*$, ключ 6 замкнут, так как при этих условиях на выходе логического элемента И 7 сигнал отсутствует, а на выходе элемента НЕ 8 имеется сигнал. Тогда счетчик импульсов 9 ведет счет количества N поступающих импульсов U_1 , а интегратор 10 - их суммарную длительность $t_{\text{имп}}$. Средняя длительность полупериода $(-T_n - 1/2)$ определяется в блоке

$$\gamma(t) = \begin{cases} \frac{\gamma_0}{c_0 + t}; & 0 \leq t \leq T_n; |M\{\varepsilon(t)\}| > \varepsilon^*; \\ 0; & t = 0; |M\{\varepsilon(t)\}| \leq \varepsilon^*, \end{cases} \quad (3.60)$$

где γ_0, c_0 - константы;

T_n - длительность стационарности процесса;

ε^* - заданная ошибка управления;

$\varepsilon(t)$ - текущее значение ошибки.

Период изменения $\gamma(t)$ не должен превышать длительность интервала T_n , а в случае отключения объекта $\gamma(t)=0$.

При отсутствии или невысоком уровне помех измерения можно использовать постоянный шаг $\gamma(t)=\gamma_0=\text{const}$.

В соответствии с разработанными алгоритмами можно построить три варианта адаптивных систем дуального управления процессами добычи и обогащения угля, в частности:

- системы управления с вероятностными стратегиями управления;
- системы управления со смешанными стратегиями управления;
- системы управления с регулярными стратегиями управления.

При этом возмущающие воздействия могут иметь как аддитивный, так и мультипликативный или смешанный характер.

3.4. Адаптивные системы дуального управления

Рассмотрим методы построения адаптивных систем управления процессами в случаях, когда смесь состоит из двух классов (что в большинстве случаев наблюдается на практике).

На рис.3.3 приведена структурная схема адаптивной системы управления со случайной стратегией с использованием вероятностной обратной связи, реализующая алгоритм (3.4).

Система управления содержит идентификатор 2 (см. раздел 2), разделяющий возмущающее воздействие $x(t)$ на два класса, ключи 3 и 4, замыкание которых осуществляет управляемый генератор случайных сигналов 6 (УГСС), усилитель 7, коэффициент усиления которого равен обратному значению коэффициента усиления объекта по управляющему входу, датчики возмущающего воздействия D_1 (1) и выходной координаты D_2 (9), усилителя 11 с переменным коэффициентом усиления $\gamma(t)$, интегратора 12, двух звеньев сравнения 5 и 10 и задатчика 8 выходной координаты.

Система управления работает следующим образом. Возмущающее воздействие $x(t)$ измеряется датчиком D_1 и посредством адаптивного

идентификатора 2 разделяется на классы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в соответствии с алгоритмом рандомизации сигналы с соответствующими вероятностями подаются на звено сравнения 5. На вход усилителя 7 подается разность $(y^* - u_1(t))$ или $(y^* - u_2(t))$, на выходе которого образуется управляющее воздействие, компенсирующее изменение возмущающего воздействия.

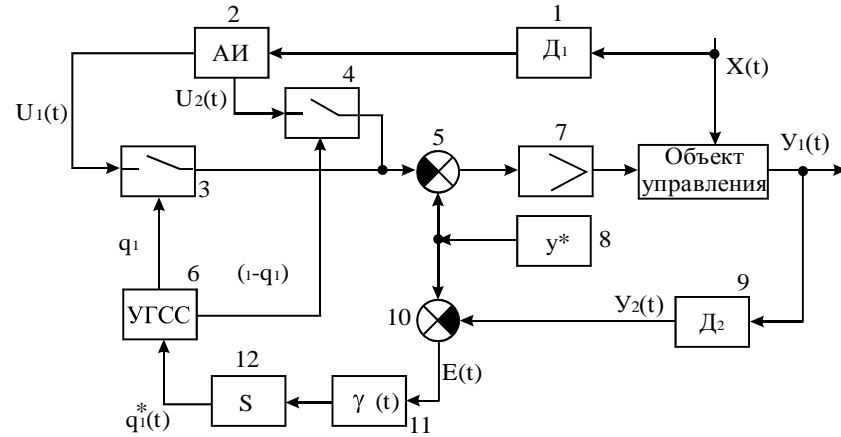


Рис. 3.3. Структурная схема адаптивной САУ со случайной стратегией управления при идентификации центров двух классов возмущающего воздействия

Вероятности $u_1(t)$ и $u_2(t)$ задаются замыканием ключей 3 и 4 от УГСС 6, на вход которого подается заданная величина вероятности q^* . Нескомпенсированная часть возмущающего воздействия устраняется за счет обратной связи по отклонению. Это осуществляется путем коррекции заданной вероятности путем измерения выходной координаты объекта посредством датчика D_2 , сравнение его выходного сигнала $y_2(t)$ с заданием y^* и усиления полученной разности усилителем 11 с переменным коэффициентом усиления. Интегратор 12 служит для запоминания сигнала усилителя.

Системы управления с вероятностной обратной связью характерны тем, что по устойчивости они приближаются к разомкнутым (по возмущению) системам, так как вероятностная обратная связь изменяет не сами величины управляющих воздействий $v_1(t)$ и $v_2(t)$, а их вероятности. Это приводит к тому, что среднее значение управляющего воздействия вычисляется непосредственно на объекте управления за счет подачи на

что приводит к размыканию ключа 2, и сигнал на выходе интегратора 3 запоминается. При отключении объекта генератор возвращается в исходное положение.

Если возмущающее воздействие невозможно или нецелесообразно контролировать, а время корреляции возмущающего воздействия изменяется в широких пределах, то предпочтительней использовать переменную стратегию, имеющую следующий алгоритм:

$$v(t) = \begin{cases} v_1 \operatorname{sgn}(\tau_k - \tau_3^*) \operatorname{sgn}(N - N_1^*) \operatorname{sgn} y_3(t); \\ v_2 [1 - \operatorname{sgn}(\tau_k - \tau_3^*)] [1 - \operatorname{sgn}(N - N_1^*)] \operatorname{sgn} y_3(t); \end{cases} \quad (5.15)$$

$$v_2(t) = \begin{cases} v_{\min}; v_{\min} > M_2; \\ \gamma(t) [y^* - y_2(t)] [\operatorname{sgn}(M\{\varepsilon(t)\} - \varepsilon_1^*) + \operatorname{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{\varepsilon(t)\})] dt \\ v_{\max}; v_{\max} < M_2; \end{cases}$$

$$v_1(t) = F_1(\varepsilon) k_P + k_U \int_0^t F_3 dt + k_g \frac{d[F_2(\varepsilon)]}{dt}$$

$$M_1 = \int_0^t \gamma(t) [y^* - y_2(t)] [\operatorname{sgn}(M\{\varepsilon(t)\} - \varepsilon_1^*) + \operatorname{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{\varepsilon(t)\})] dt$$

$$\operatorname{sgn}(\tau_k - \tau_3^*) = \begin{cases} 1; \tau_k > \tau_3^* \\ 0; \tau_k \leq \tau_3^* \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(N - N_1^*) = \begin{cases} 1; N > N_1^* \\ 0; N \leq N_1^* \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn} y_3(t) = \begin{cases} 1; y_3(t) > 0 \\ 0; y_3(t) \leq 0 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(M\{\varepsilon(t)\} - \varepsilon_1^*) = \begin{cases} 1; M\{\varepsilon(t)\} > \varepsilon_1^* \\ 0; M\{\varepsilon(t)\} \leq \varepsilon_1^* \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{\varepsilon(t)\}) = \begin{cases} 1; \varepsilon_2^* > M\{\varepsilon(t)\} \\ 0; \varepsilon_2^* \leq M\{\varepsilon(t)\}, \end{cases}$$

где N - удвоенное число пересечений нулевого уровня выходной координаты объекта управления;
 N_1^* - заданное число периодов изменения выходной координаты;
 $y_3(t)$ - сигнал на выходе датчика состояния объекта управления;
 τ_k - время спада автокорреляционной функции;

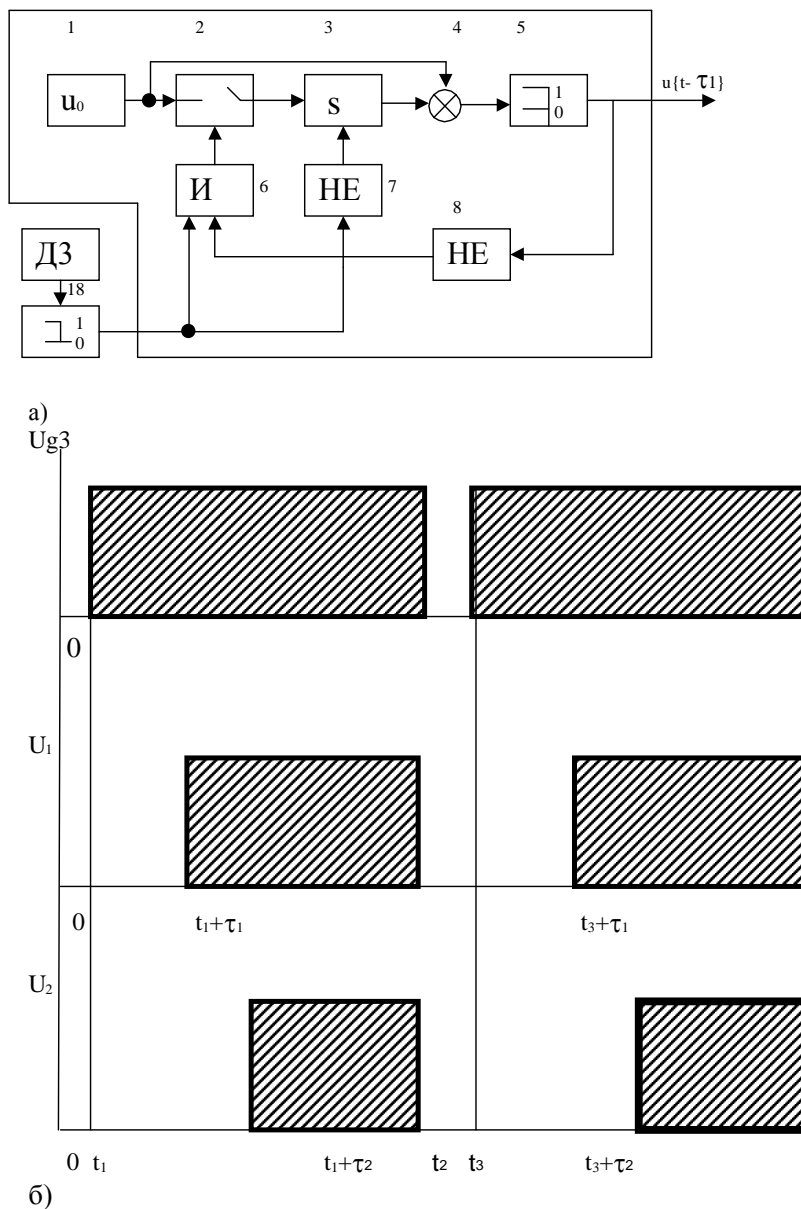


Рис. 5.12. Схема генератора импульсов (а) и диаграмма его работы (б)

его вход стратегий $v_1(t)$ и $v_2(t)$. Такая система управления наиболее эффективна для объектов, возмущающие воздействия в которой относительно медленно изменяются по сравнению с временем чистого запаздывания. В случае быстро изменяющихся возмущающих воздействий (время спада автокорреляционной функции соизмеримо с временем чистого запаздывания) необходимо более оперативно вносить коррекцию в систему, что может быть осуществлено путем оперативного вычисления не только средних значений классов, но и их вероятностей. На рис.17 приведена структура такой системы управления.

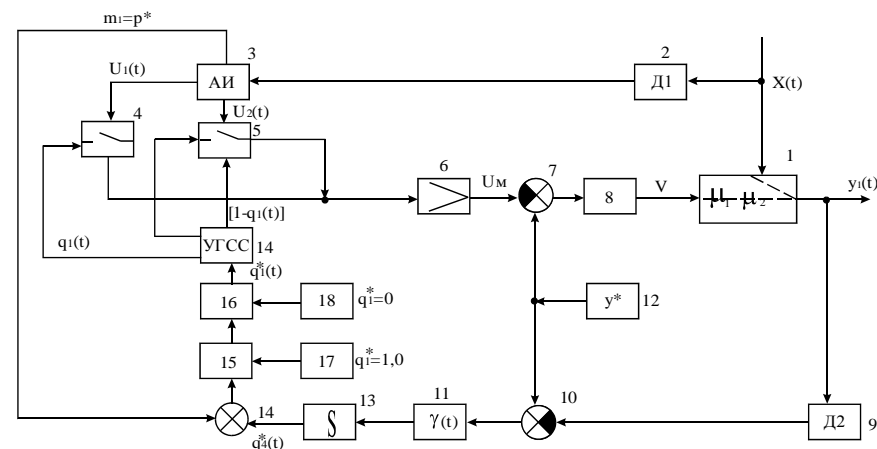


Рис. 3.4. Адаптивная система управления горной машиной при аддитивном возмущающем воздействии с вероятностной обратной связью при $\tau_k \geq \tau_3$ (случайная стратегия)

Управление в этом случае сводится к определению стратегий входных координат управления $v_1(t)$ и $v_2(t)$ вероятности появления их q_1 и $(1-q_1)$ и смешивания таким образом, чтобы среднее значение выходной координаты объекта управления было равно заданному.

Сигнал с датчика 2 ($Д_1$) возмущающего воздействия подается на вход адаптивного идентификатора 3 ($АИ$), в котором этот сигнал разделяется на два класса со средними значениями $u_1(t)$ и $u_2(t)$ и вероятностями их появления p и $(1-p)$.

В процессе работы системы управления могут изменяться параметры объекта, что приведет к появлению статической ошибки на выход-

де объекта. Для устранения этого влияния в системе управления используется коррекция вероятности по отклонению выходной координаты объекта, которая позволяет также устранить и другие неконтролируемые возмущения. При этом на выходе интегратора 13 появится сигнал q_4^* , который в сумматоре 14 алгебраически суммируется с сигналом p^* , поступающим с выхода адаптивного идентификатора 3:

$$q_1^* = p^* + q_4^* . \quad (3.61)$$

Блоки выделения минимума 15 и максимума 16, а также соответствующие задатчики 17 и 18 осуществляют ограничение в соответствии с (3.32):

$$q_1^* = \begin{cases} 0; p^* + q_4^* \leq 0; \\ p^* + q_4^*; 0 < p^* + q_4^* \leq 1; \\ 1; p^* + q_4^* > 1 \end{cases} \quad (3.62)$$

В случаях мультипликативного возмущающего воздействия система управления реализуется в соответствии с алгоритмом (3.25) (рис.3.5).

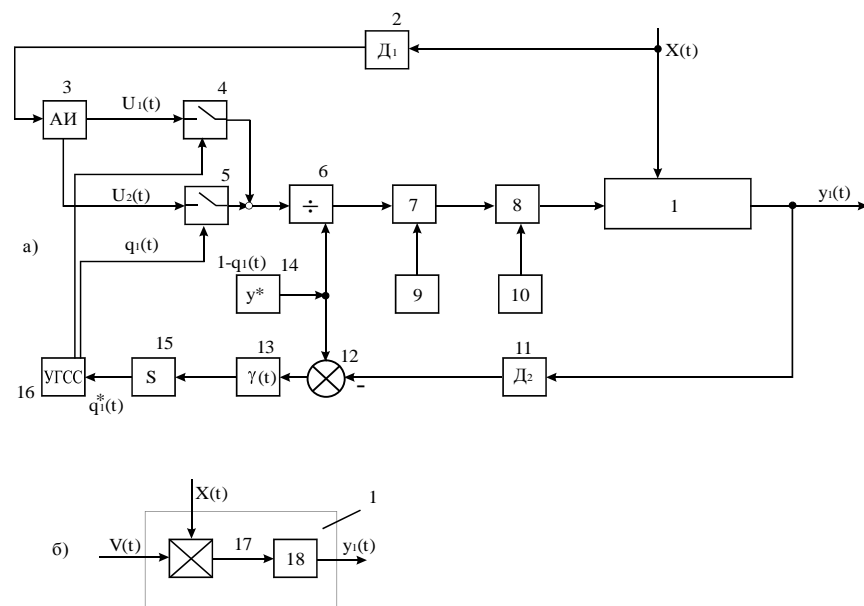


Рис. 3.5. Структурная схема адаптивной САУ при мультипликативном возмущающем воздействии (а) и схема объекта управления (б)

на двух входах которого имеются сигналы $u_{гз}$ и от элемента 25 НЕ. При этом замыкается ключ 26, а ключ 22 размыкается, так как сигнал на выходе элемента 19 И исчезает (на вход элемента 20 НЕ подаётся сигнал генератора ГИ1). Величина дисперсии запоминается теперь в блоке памяти П2.

В этот момент ключ 6 размыкается, а ключ 9 замыкается, поэтому к входу объекта управления подключается регулятор с исчезающей обратной связью. Спустя время $\tau_2=2\tau_1$, на выходе генератора ГИ2 появляется сигнал $u_2(t-\tau_2)$, через пороговый элемент 27, замыкающий ключ 28 и размыкающий ключ 23, т.е. обучение закончилось. Диаграмма работы генераторов приведена на рис.5.13б.

В звене сравнения 29 образуется сигнал $\sigma^2_2(t)-\sigma^2_1(t)$, и в зависимости от его полярности система выбирает ту или иную стратегию управления.

Допустим, что $\sigma^2_2(t)-\sigma^2_1(t) \geq 0$, т.е. случайная стратегия равноценна или лучше. Тогда на входе порогового элемента 30 появится сигнал положительной полярности. На выходе порогового элемента 30 сигнал отсутствует, поэтому ключ 9 размыкается, а ключ 6 замыкается, т.е. система управления подключает случайную стратегию. Если же $\sigma^2_2(t)-\sigma^2_1(t) < 0$ (лучше стратегия с исчезающей обратной связью), на выходе порогового элемента 30 появляется сигнал, который удерживает ключ 9 в замкнутом состоянии, а ключ 6 - в разомкнутом, т.е. система остается на прежней стратегии управления.

Если в процессе функционирования системы, например, из-за изменения параметров возмущающего воздействия, увеличится дисперсия ошибки управления, на выходе звена сравнения 29 изменится полярность сигнала, что приводит к переключению стратегии управления. При отключении объекта управления (момент t_2 на рис.5.12б) и последующем его включении в работу (момент t_3) обучение системы повторяется снова.

Работает генератор следующим образом. С источника 1 опорного напряжения u_0 подаётся сигнал на вход ключа 2 и сумматор 4. Если объект управления включен, сигнал от Д3 на вход элемента И 6 не поступает, и ключ 2 разомкнут, поэтому на выходе интегратора 3 сигнал равен нулю.

При включении объекта в работу на выходе датчика Д3 появляется сигнал, в результате чего замыкается ключ 2.

На вход интегратора 3 подаётся напряжение u_0 , и на выходе интегратора сигнал $u_{вых}$ плавно нарастает за время τ_1 до величины u_0 . Как только $u_{вых} > u_0$, на выходе порогового элемента 5 появится единичный сигнал $u(t-\tau_1)$. Одновременно на выходе элемента НЕ 8 сигнал исчезает,

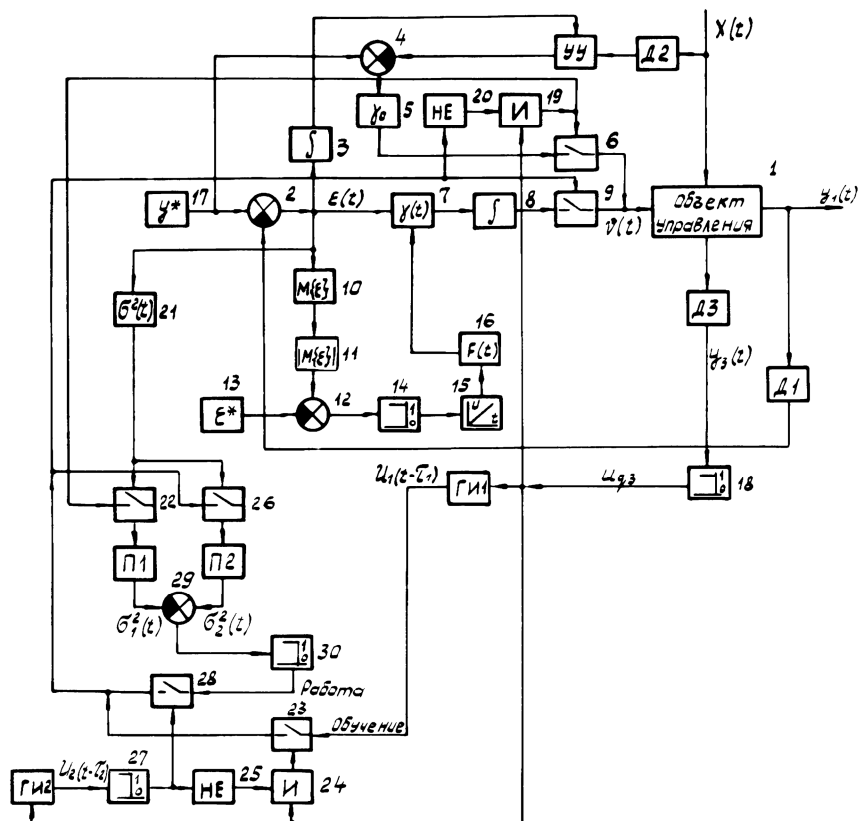


Рис. 5.11. Функциональная схема адаптивной САУ с переменной стратегией при контролируемом возмущающем воздействии

На втором входе элемента 19 И имеется сигнал, так как на выходах генераторов ГИ1 и ГИ2 сигналы появляются с запаздыванием τ_1 и τ_2 соответственно, и на входе элемента 20 НЕ сигнал отсутствует. Тогда ключ 6 замыкается, и на вход объекта управления подключается регулятор со случайной стратегией.

Одновременно в блоке 21 вычисляется дисперсия, и через ключ 22, замкнутый сигналом от элемента 19 И, подается в блок памяти П1.

Через время τ_1 на выходе генератора ГИ1 (рис.5.12а) появляется сигнал $u_1(t-\tau_1)$, который через замкнутый ключ 23 подается на входы ключа 9 и элемента 20 НЕ. Ключ 23 замкнут сигналом от элемента 24 И,

Отличие указанной системы от предыдущих заключается в том, что выходы ключей 4 и 5 подключены к блоку деления 6. Величина управляющего воздействия здесь ограничивается блоками выделения минимума 7 и максимума 8 с соответствующими задатчиками 9 и 10, т.е.

$$v_{\max} \geq v(t) \geq v_{\min}, \quad (3.63)$$

где v_{\max} и v_{\min} - максимальное и минимальное значения управляющего воздействия.

Ввиду того, что всегда:

$$x_{\max} > u_2(t) > M\{x(t)\} > x_{\min}, \quad (3.64)$$

где x_{\max} и x_{\min} - максимальное и минимальное значения возмущающего воздействия, то увеличение вероятности q_1 замыкания ключа 4 приводит к уменьшению управляющего воздействия $v(t)$, а уменьшение вероятности замыкания ключа 4 - к увеличению $v(t)$, чем обеспечивает равенство $M\{y_1(t)\} = y^*$.

В системах управления со смешанными стратегиями среднее значение управляющего воздействия вычисляется на объекте управления. На рис.3.6 приведена структурная схема такой адаптивной системы управления объектом при аддитивных возмущающих воздействиях, реализующая алгоритм (3.30) (при $k=2$).

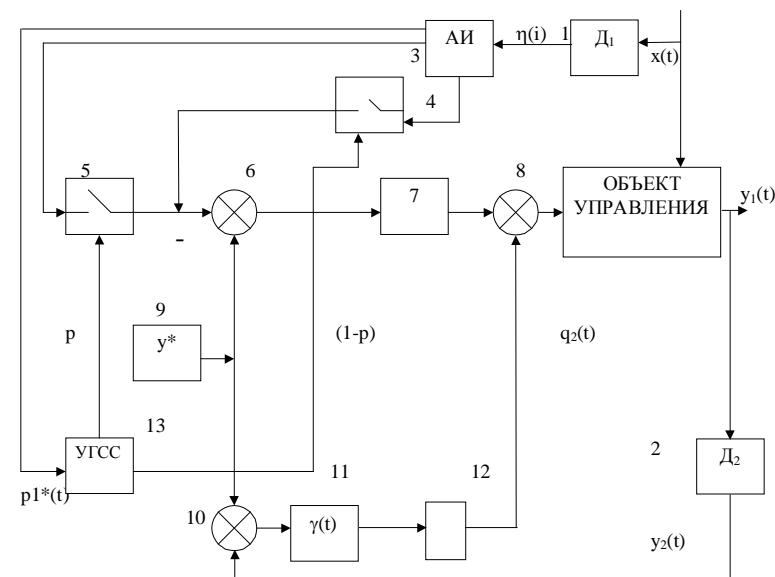


Рис. 3.6. Структурная схема адаптивной САУ со смешанной стратегией управления

Указанные системы целесообразно использовать в случаях, когда имеют место наряду с контролируемыми также и неконтролируемые возмущающие воздействия и изменения параметров объекта. Основное возмущающее воздействие компенсируется контуром по возмущению, а оставшийся разбаланс - контуром по отклонению, состоящему из датчика выходной координаты D_2 (2), звена сравнения 10, усилителя 11 с переменным коэффициентом усиления $\gamma(t)$, интегратора 12 и сумматора 8.

В случае мультипликативного возмущающего воздействия целесообразно использовать систему управления, реализующую алгоритм (3.56). В отличие от рассмотренной выше системы (см. рис.3.6) используется вместо сумматора 6 блок деления, остальные элементы такие же.

Для объектов, не допускающих нанесения случайных управляющих воздействий, целесообразно использовать регулярную стратегию управления. В этом случае среднее значение управляющего воздействия вычисляется непосредственно в управляющем устройстве, а не на объекте управления. На рис.3.7 приведена структурная схема такой системы управления при аддитивном характере возмущающих воздействий, реализующая алгоритм (3.58) при $k=2$. В случае мультипликативного характера возмущающего воздействия необходимо использовать систему управления, реализующую алгоритм (3.59). В этой системе вместо сумматора использован делитель.

3.5. Генерирование импульсов с заданной вероятностью

Как показано выше, использование вероятностных связей при адаптивном управлении процессами требует генерирования случайных сигналов с заданной вероятностью их появления. Методы генерирования случайных величин рассматриваются в [42], однако известные генераторы неуправляемы. Наиболее просто генератор случайных сигналов может быть реализован на основе способа Лемера [43]. На этом принципе может быть реализован управляемый генератор псевдослучайных прямоугольных импульсов с использованием известных элементов.

Такое устройство содержит генераторы треугольных и прямоугольных импульсов. Генератор треугольных импульсов вырабатывает напряжение треугольной формы $u_1(t)$ с периодом следования $T_{\text{тр}}$, а генератор прямоугольных импульсов - сигналы $u_2(t)$ с периодом:

$$T_{\text{пр}} = \xi_r T_{\text{тр}}, \quad (3.65)$$

где $\xi_r = \sqrt{2}, \pi, e, \dots$ - иррациональное число.

$$v^r(t) = \begin{cases} v_{\min}; v_{\min} > M_1; \\ \int_0^t \gamma(t)[y^* - y_2(t)] \operatorname{sgn}[|M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^*] dt \\ 0 \\ v_{\max}; v_{\max} < M_1; \end{cases}$$

$$M_1 = \int_0^t \gamma(t)[y^* - y_2(t)] \operatorname{sgn}[|M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^*] dt$$

$$\operatorname{sgn}[|M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^*] = \begin{cases} 1; |M\{\varepsilon(t)\}| > \varepsilon^* \\ 0; |M\{\varepsilon(t)\}| \leq \varepsilon^* \end{cases}$$

$$t_0 = \begin{cases} 1; U_{g3} > 0 \\ 0; U_{g3} \leq 0 \end{cases};$$

$$\operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_1\} = \begin{cases} 1; t_0 > \tau_1 \\ 0; t_0 \leq \tau_1 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_2\} = \begin{cases} 1; t_0 > \tau_2 \\ 0; t_0 \leq \tau_2 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}\{\sigma_1^2 - \sigma_2^2\} = \begin{cases} 1; \sigma_1^2 - \sigma_2^2 < 0 \\ 0; \sigma_1^2 - \sigma_2^2 \geq 0. \end{cases}$$

Система работает следующим образом. Объект управления 1 может управляться одним из двух регуляторов. Со случайной стратегией управления регулятор состоит из датчика $D1$ выходной координаты, звена сравнения 2, интегратора 3, управляющего устройства УУ, представляющего адаптивный идентификатор с датчиком $D2$ возмущающего воздействия, звена сравнения 4, усилителя 5 и ключа 6.

Второй регулятор реализует стратегию управления с исчезающей во времени обратной связью. Он включает датчик $D1$, звено сравнения 2, усилитель с переменным коэффициентом усиления 7, интегратор 8 и ключ 9, а также известные элементы 10-17 (см. раздел 3).

Система автоматического управления после включения объекта работает в режиме обучения. Это происходит следующим образом. При включении объекта управления в работу сигнал $u_3(t)$ с датчика $D3$ состояния объекта подается на пороговый элемент 18, а с него на вход генераторов импульсов ГИ1, ГИ2 и логического элемента 19 И (напряжение u_{g3}).

центрата, задание которой определяется, исходя из экстремума функции цели.

Тогда система управления будет работать в следующем режиме (при условии, что экстремальное значение зольности изменяется во времени).

5.4. Адаптивное управление с переменной стратегией

В процессе исследований адаптивных систем автоматического управления установлено, что эффективность использования различных стратегий управления зависит от характера и параметров возмущающих воздействий.

В частности, среднеквадратическое отклонение выходной координаты объекта управления при вероятностной стратегии управления составила: при $p^*=0,7$ $\sigma[y_1(t)]=0,9578$, при $p^*=0,5$ $\sigma[y_1(t)]=0,9313$, а при управлении с исчезающей обратной связью соответственно $\sigma[y_1(t)]=0,9835$ и $\sigma[y_1(t)]=0,8728$.

Это свидетельствует о том, что выбор стратегии управления при нестационарных параметрах объектов и возмущающих воздействий представляет достаточно сложную задачу.

Эту задачу можно решить путем адаптивного выбора оптимальной стратегии оперативно в процессе функционирования системы управления.

В качестве критерия эффективности той или иной стратегии может быть использована дисперсия выходной координаты объекта управления, а в качестве информационного признака распознавания ситуации - также упомянутая дисперсия или изменение времени корреляции возмущающего воздействия.

На рис.5.11 приведена функциональная схема адаптивной системы с переменной стратегией управления при контролируемом возмущающем воздействии. В ней реализуется следующий алгоритм:

$$v(t) = \begin{cases} v^s(t)[1 - \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_1\}][1 - \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_2\}] + v^s(t) \operatorname{sgn}\{\sigma_1^2 - \sigma_2^2\} \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_2\} \\ v^r(t)[1 - \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_1\}][1 - \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_2\}] + v^r(t) \operatorname{sgn}\{\sigma_1^2 - \sigma_2^2\} \operatorname{sgn}\{t_0 - \tau_2\} \end{cases} \quad (5.14)$$

где $v^s(t) = p_1 v_1(t) + (1 - p_1) v_2$;

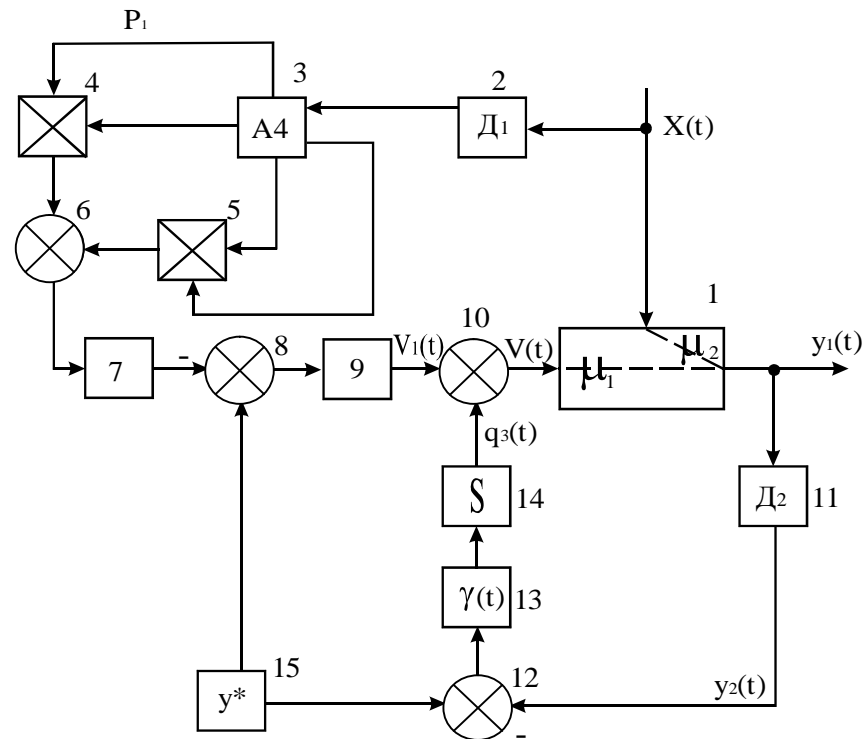


Рис. 3.7. Структурная схема с регулярной стратегией управления

Сигналы $u_1(t)$ подаются в запоминающее устройство (например, интегратор) только в момент следования импульса:

$$u_3(t) = \operatorname{sgn} \frac{du_2(t)}{dt};$$

$$\operatorname{sgn} \frac{du_2(t)}{dt} = \begin{cases} 1; & \frac{du_2}{dt} > 0; \\ 0; & \frac{du_2}{dt} \leq 0. \end{cases} \quad (3.66)$$

На выходе запоминающего устройства при этом напряжение изменяется скачкообразно и, как известно, является псевдослучайным с равномерным законом распределения вероятностей. Эти сигналы сравниваются с заданной величиной вероятности q_1^* и преобразуются по следующему алгоритму:

$$q_1 = \text{sgn}[q_1^* - \alpha(t)];$$

$$\text{sgn}[q_1^* - \alpha(t)] = \begin{cases} 1; q_1^* - \alpha(t) \geq 0; \\ 0; q_1^* - \alpha(t) < 0. \end{cases} \quad (3.67)$$

Вероятность появления единичных сигналов равна q_1 . При этом нетрудно получить также единичные импульсы с вероятностью $(1-q_1)$ путем логического отрицания (элемент НЕ).

Управляемый генератор псевдослучайных прямоугольных импульсов реализован в корпусе прибора МЗТА и программно на микроконтроллерах МИКРОДАТ, РЕМИКОНТ, УНИКОНТ.

3.6. Исследования адаптивных систем дуального управления

Теоретически сходимость адаптивных вероятностных методов доказана в работах [25,44] при различных исходных предположках, а также в работах А.Г.Ивахненко [40,41]. Синтез оптимальных параметров предложенных систем управления аналитическими методами не представляется возможным, поэтому сходимость полученных алгоритмов адаптивного управления доказана числовым моделированием на моделях реальных объектов с использованием ЭВМ. Математическая модель приближенно описывается следующими уравнениями:

$$Y_1(p) = V(p)W_1(p) + X(p)W_2(p), \quad (3.68)$$

где $Y_1(p)$, $V_1(p)$, $X(p)$ - соответственно выходная, входная координаты объекта и возмущающее воздействие в операторной форме;

p - оператор Лапласа;

$W_1(p)$ - передаточная функция объекта (процесс сушки концентрата) по управляющему входу принята в виде (процесс сушки концентрата):

$$W_1(p) = \frac{0,2e^{-960p}}{160p+1}; \quad (3.69)$$

$W_2(p)$ - соответственно передаточная функция по возмущающему входу:

$$W_2(p) = \frac{0,15e^{-480p}}{160p+1}. \quad (3.70)$$

Исследованы пять вариантов алгоритмов: (3.24), (3.25), (3.56), (3.58) и (3.59). Начальные условия и значения параметров для указанных вариантов систем автоматического управления приведены в табл.3.1.

ления процессов углеобогащения по качеству получаемых продуктов не обеспечивают необходимой точности регулирования.

С целью предотвращения нежелательных режимов необходимо отключать канал управления зольностью.

На рис.5.10 приведена функциональная схема такой системы.

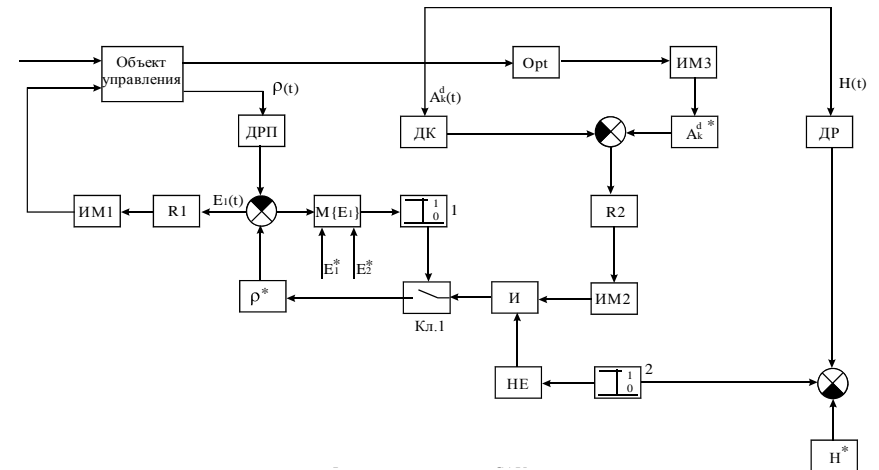


Рис. 5.10. Функциональная САУ процессом обогащения с контролем работоспособности датчика качества продукта и ввода в заданный режим (ДР – датчик работоспособности)

При включении системы в работу функционируют только подсистема стабилизации режимного параметра $\rho(t)$, а на отключение контура стабилизации зольности имеется запрет (ключ Кл1 разомкнут). При достижении $\rho(t)$ такого значения, при котором $\varepsilon_1^* \leq \{\varepsilon(t)\} \leq \varepsilon_2^*$, на выходе порогового элемента 1 появится сигнал, который замкнет ключ Кл1. Если не нарушены условия работоспособности датчика зольности ДК, система переходит в режим стабилизации заданной зольности (задание может получить система от оптимизатора Opt). При нарушении высоты контролируемого слоя Н, измеряемого датчиком ДР, на выходе порогового элемента 2 появится сигнал, который через элемент НЕ запретит регулирование зольности.

При необходимости оптимизации режима работы отдельного процесса обогащения (например, при обогащении антрацита) можно использовать эту же систему автоматической стабилизации зольности кон-

$$A_{k\Sigma}^d = \frac{\sum_{i=1}^3 G_{ki} A_{ki}^d}{\sum_{i=1}^3 G_{ki}} . \quad (5.7)$$

Вычисленное по этой формуле значение ожидаемой зольности сравнивается с заданной зольностью смеси концентратов и приводится к первому процессу:

$$\Delta A_{k1}^d = \frac{A_{k\Sigma}^{d*} - A_{k\Sigma}^d}{q_1^k} , \quad (5.8)$$

$$\text{где } q_1^k = G_{k1} / \sum_{i=1}^3 G_{ki} .$$

Если $A_{k1}^d - A_{k1\max}^d > 0$ или $A_{k1}^d - A_{k1\min}^d < 0$, оставшийся разбаланс первого процесса определяется по формуле

$$\delta A_{k1}^d = A_{k1}^d - A_{k1\min}^d \text{ или } \delta A_{k1}^d = A_{k1}^d - A_{k1\max}^d \quad (5.9)$$

разбаланс зольности смеси - по формуле

$$\delta A_{k\Sigma}^{d'} = \delta A_{k1}^d q_1^k . \quad (5.10)$$

Поправка задания зольности для второго процесса

$$\Delta A_{k2}^d = \frac{\delta A_{k\Sigma}^{d'}}{q_2^k} , \quad (5.11)$$

где q_2^k - определяется аналогично q_1^k .

Аналогично определяется поправка для третьего процесса (если достигается граница допустимого диапазона второго процесса):

$$\delta A_{k\Sigma}^{d''} = \delta A_{k2}^d q_2^k \quad (5.12)$$

$$\Delta A_{k3}^d = \frac{\delta A_{k\Sigma}^{d''}}{q_3^k} \quad (5.13)$$

где q_3^k определяется аналогично q_1^k, q_2^k .

Кроме того, существующие средства контроля зольности требуют определенную минимально допустимую толщину контролируемого слоя концентрата на конвейере.

Если эта толщина меньше допустимого значения, показания прибора имеют недопустимо высокую погрешность.

Таким образом, при нарушении условий работоспособности средств контроля качества продуктов обогащения, например, при временных снижениях нагрузки по исходному углю или низкого процентного содержания контролируемого продукта в исходном (несоответствие диапазона измерения прибора фактическому) известные способы управ-

Таблица 3.1

**Начальные условия и значения параметров
вариантов систем автоматического управления**

Обозначения параметров	Значения параметра				
	Варианты				
	1	2	3	4	5
$y_1(0)$	0	0	0	0	0
$y_2(0)$	0	0	0	0	0
μ_1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
μ_2	0,2	-	-	0,2	-
y^*	7	7	7	7	7
γ_0	8	8	1	1	1
c_0	0,1	0,1	4	4	4
$u_1(0)$	18	18	18	18	18
$u_2(0)$	32	32	32	32	32
$q_1^*(0)$	0	0	0	0	0

На рис.3.8 приведены графики переходных процессов в адаптивной системе автоматического управления со случайной стратегией с использованием вероятностной обратной связи при аддитивном характере возмущающих воздействий. В качестве возмущающего воздействия использована эталонная смесь с параметрами: $u_1=18, u_2=32, \sigma_1=1,8, \sigma_2=2,0, p=0,5$. Анализ полученных результатов моделирования показывает, что оценка среднего значения выходной координаты объекта $M\{y_1(t)\}$ достигает заданную за время $(1,25-1,35)\tau_3$ (τ_3 - время чистого запаздывания в объекте по управляющему входу). При этом текущие вероятности стратегий $v_1(t)$ и $v_2(t)$ сходятся к $p=0,5$ за $(12-13)\tau_3$. В течение такого же времени вероятность q_1^* устанавливается на уровне $q_1^*(t) \approx 0,5$.

В случае вырождения возмущающего воздействия в один класс ($p=1,0$) заданная вероятность $q_1^*=1,0$ и практически почти не изменяется. На рис.3.9 приведены графики переходных процессов в системе с вероятностной обратной связью при мультипликативном характере возмущающего воздействия, когда возмущающее воздействие имеет только один класс с $u_1=18$. Здесь время адаптации составляет также $2,5\tau_3$, а управляющее воздействие $v(t)$ практически не изменяется. Отдельные всплески $v(t)$ объясняются погрешностями в генерировании возмущающего воздействия с заданными параметрами. При этом коэффициент $\gamma(t)$ выбран в соответствии с (3.60) и табл.3.1.

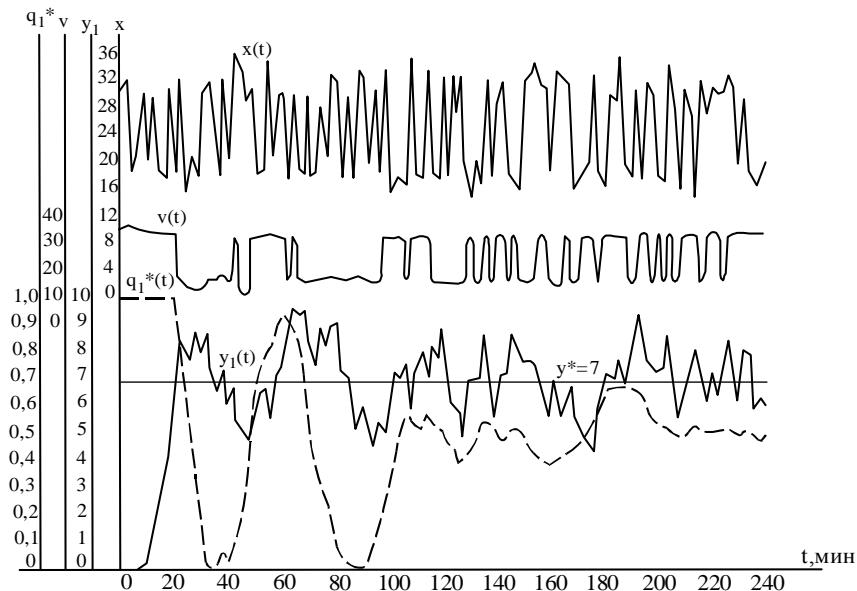


Рис. 3.8. Графики переходных процессов в САУ со случайной стратегией управления при аддитивном характере возмущающих воздействий (эталонная смесь: $u_1=18$; $u_2=32$; $\sigma_1=1,2$; $\sigma_2=2,0$; $p^*=0,5$)

Если принять $\gamma(t)=\gamma_0=\text{const}$, время адаптации увеличивается в 1,5-2 раза, что свидетельствует об ухудшении качества подавления помех.

Аналогичные результаты получены при использовании смешанной стратегии управления. Несколько ухудшаются показатели качества управления при использовании регулярных стратегий.

На рис.3.10 приведены графики переходных процессов в системе со смешанной стратегией управления при мультипликативном характере помех. При этом параметры исчезающей во времени обратной связи значительно отличаются от предыдущих двух случаев (см.табл.3.1), в связи с чем время обучения в этой системе соответственно увеличилось в 5 раз. В системе наблюдается значительное перерегулирование. Таким образом, время адаптации системы управления зависит от параметров исчезающей во времени обратной связи (частоты и амплитуды). Установлено, что период включения обратной связи следует выбирать из условий: $t_0=(0,3-0,6)\tau_3$. С увеличением частоты качество управления до определенного значения улучшается.

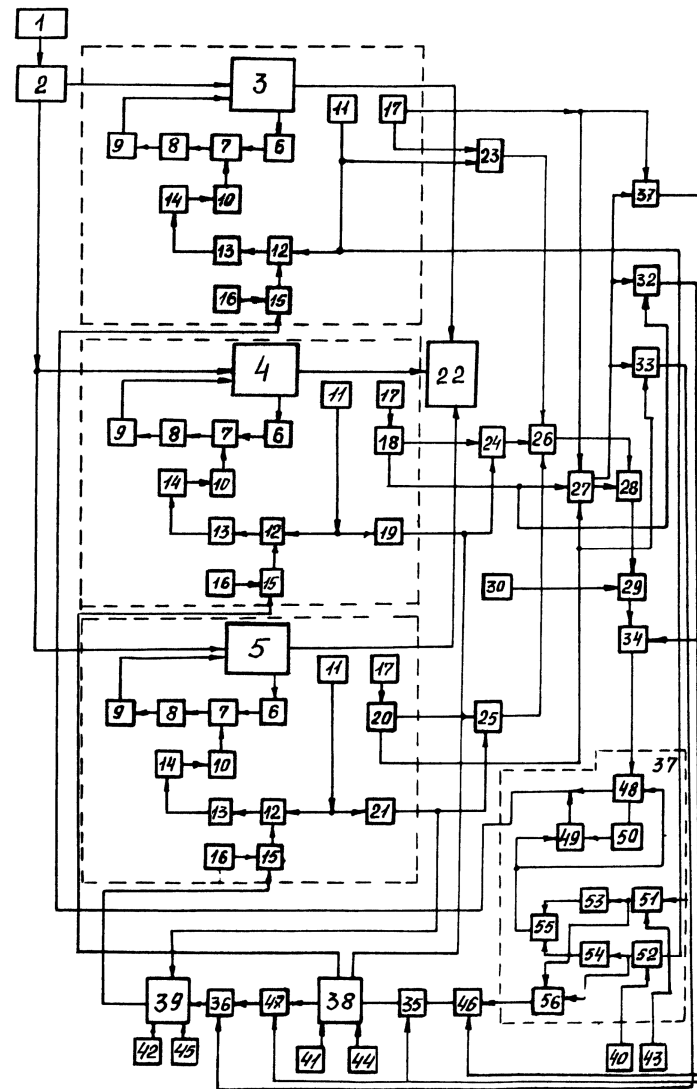


Рис. 5.9. Функциональная схема системы автоматической стабилизации зольности общего концентрата комплекса процессов обогащения с учётом транспортного запаздывания в каналах до точки смешивания концентратов различных машинных классов

центра, 14 – исполнительное устройство, 15 – сумматор, 16 – задатчик зольности концентрата, 17 – датчик количества концентрата, 18-21 – блоки задержки сигналов, 22 – устройство для смешивания концентратов разных машинных классов, 22-25 – перемножители, 26, 27 – сумматоры, 28 – делитель, 29 – элемент сравнения, 30 – задатчик зольности общего концентрата, 31-36 – делители, 37-39 – формирователи сигналов коррекции, 40-42 – задатчики максимальных граничных значений зольностей концентратов соответствующих процессов, 43-45 – задатчики минимальных граничных значений зольностей концентратов, 46, 47 – множители, 48, 49 – ключи, 50 – элемент памяти, 51, 52 – элементы сравнения, 53, 54 – нуль-органы, 55, 56 – элементы ИЛИ, 57-59 – САУ режимов работы соответствующих процессов). Сущность этого метода управления заключается в том, что определяется зольность концентрата каждого процесса с учетом транспортного запаздывания по каждому каналу от точки контроля до точки смешения. По измеренным зольностям и производительностям каждого отделения по концентрату вычисляется с учетом транспортного запаздывания ожидаемая зольность смеси концентрата, начиная с процесса с наименьшим транспортным запаздыванием.

Зольность концентрата этого процесса изменяют на величину, равную частному от величины разбаланса на долевое участие концентрата соответствующего процесса в конечном продукте.

При исчерпании допустимого диапазона изменения зольности первого процесса аналогично изменяют зольность концентрата второго процесса и, при необходимости, третьего.

На выходах датчиков количества и качества двух процессов, имеющих большее транспортное запаздывание от места измерения до точки смешивания концентратов, подключены устройства задержки сигналов, осуществляющие задержку сигналов второго процесса на величину

$$\Delta\tau_1 = \tau_2 - \tau_1 \quad (5.4)$$

где τ_1 – время запаздывания в первом процессе;

τ_2 – время запаздывания во втором процессе.

Задержка сигналов третьего процесса осуществляется на величину

$$\Delta\tau_2 = \tau_3 - \tau_1, \quad (5.5)$$

где τ_3 – время запаздывания в третьем процессе.

При этом выдерживается соотношение

$$\tau_1 < \tau_2; \tau_2 < \tau_3. \quad (5.6)$$

Ожидаемое среднее значение зольности смеси концентратов определяется по формуле

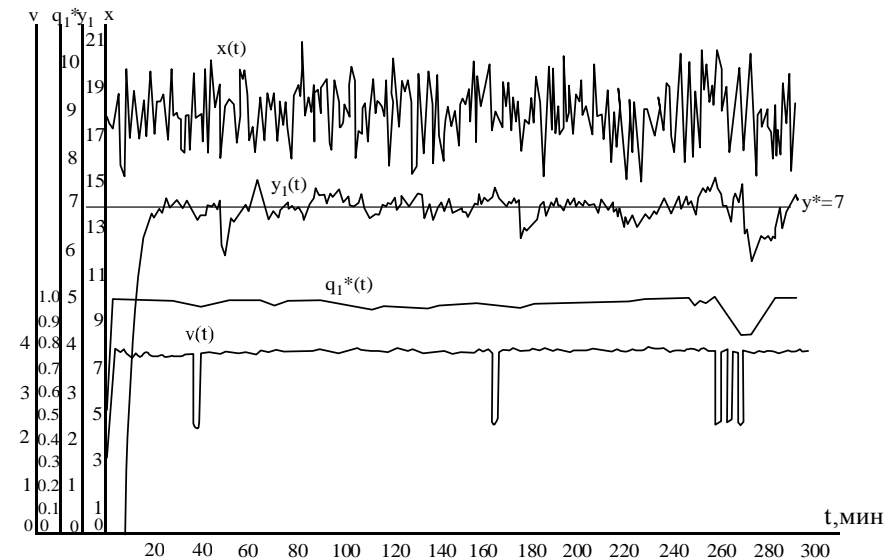


Рис. 3.9. Графики переходных процессов в САУ со случайной стратегией управления при мультипликативном характере возмущающих воздействий (эталонная смесь: $u_1=18$; $u_2=32$; $\sigma_1=1,2$; $\sigma_2=5,8$; $p^*=1,0$)

3.7. Оценка качества вероятностных алгоритмов управления

Поскольку в системах автоматического управления с вероятностной обратной связью регулирование выходной координаты осуществляется по прогнозируемому значению выходной координаты с использованием статической модели объекта управления, постоянное запаздывание не входит в рассматриваемый контур. Поэтому синтез и анализ указанного контура управления может выполняться известными методами, например, изложенными в [1,3].

Вероятностная обратная связь выполняет роль адаптации системы управления к изменяющимся характеристикам возмущающих воздействий и параметров объекта управления. Рассмотрим более детально этот класс систем, как наиболее важных с практической точки зрения. Общих методов аналитических исследований адаптивных алгоритмов дуального управления не существует, поэтому единственным методом решения указанной проблемы является численное моделирование.

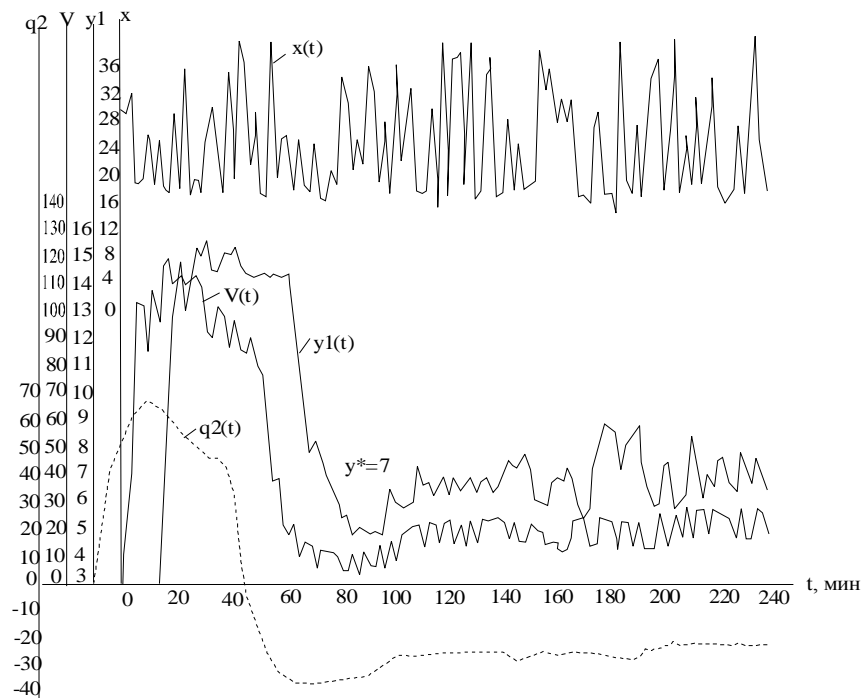


Рис. 3.10. График переходных процессов в системе с регулярной стратегией при мультипликативном характере возмущающих воздействий. Эталонная смесь: $u_1=18$, $u_2=32$, $g_1=1,2$, $g_2=5,8$, $p=0,5$

Этого в принципе достаточно, так как теоретическая сходимость адаптивных вероятностных методов доказана в работах А.Г.Ивахненко и других исследователей. Кроме того, представляет практический интерес выбор параметров системы автоматического управления применительно к конкретным объектам горного производства.

Для оценки качества вероятностных алгоритмов управления можно использовать следующую методику.

Среднее значение выходной координаты объекта управления $M\{y_1(t)\}$ в установившемся режиме по выражению

$$M\{y_1(t)\} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} y_1(t) dt, \quad (3.71)$$

где t_p - время обучения.

Среднее значение статической ошибки в установившемся режиме

Для случая реализации концентрата каждого машинного класса как товарной продукции необходима оптимизация режима разделения с учетом ограничений на зольность концентрата и допустимых потерь полезных компонентов с отходами или стабилизация заданного качества компонента.

В случаях, когда экстремум – максимум функции цели находится за пределами рабочего участка кривой обогатимости, необходима стабилизация зольности на границе этого участка. Как следует из проведенных исследований, в рассматриваемом случае экстремум функции цели процессов обогащения в тяжелых средах и отсадка находится за пределами рабочей зоны справа, поэтому в таких случаях оптимальным режимом для соответствующих процессов является режим стабилизации максимально допустимой зольности.

Таким образом, при оптимизации режима работы отдельных обогатительных процессов имеют место два самостоятельных этапа: определение оптимальных показателей обогащения для каждого из процессов и автоматическое поддержание этих показателей. Первый этап может реализоваться оперативно по данным наблюдений в реальном масштабе времени в процессе функционирования системы управления или на основе расчета ожидаемых результатов обогащения по априорным данным ситового и фракционного составов шихты, исходя из наличия угля соответствующих шахтогрупп; на втором этапе реализуются соответствующие результаты расчета в качестве заданий локальным процессам обогащения, функционирующим в соответствии с заданными алгоритмами.

Поэтому важной задачей исследований на перспективу является совершенствование методов расчета оптимальных показателей обогащения и идентификации характеристик обогащаемого сырья в процессе нормальной эксплуатации по наблюдениям.

При практической реализации системы автоматического управления режимами работы процессов обогащения угля следует учитывать их специфику, в частности, значительное транспортное запаздывание при контроле зольности продуктов обогащения, так как одновременное включение системы управления режимным параметром и зольностью концентрата приведет к аварийной ситуации.

На рис.5.9 приведена функциональная схема такой системы управления (1 – конвейер, 2 – отделение классификации угля, 3, 4, 5 – отделение обогащения угля (тяжелосредное обогащение, отсадка, флотация), 6 – датчик режимного параметра, 7 – элемент сравнения, 8 – регулятор, 9 – исполнительный механизм, 10 – задатчик, 11 – датчик зольности концентрата, 12 – элемент сравнения, 13 – регулятор качест-

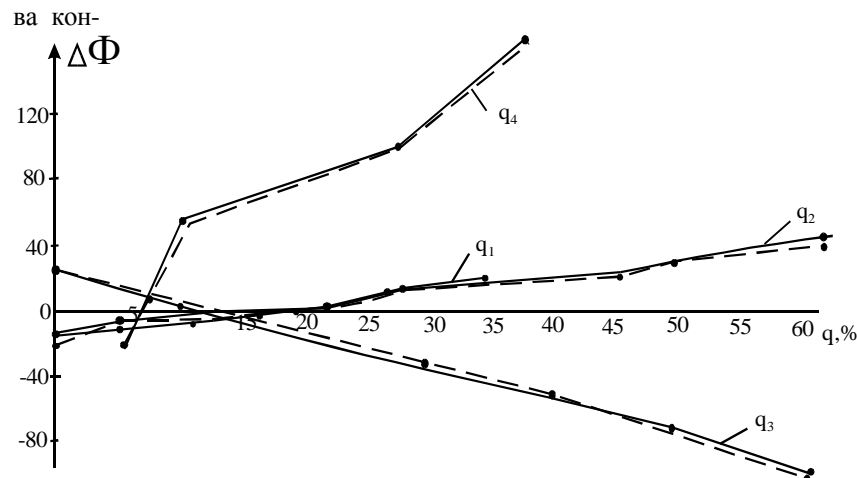


Рис. 5.8. График зависимости критерия эффективности управления комплексом процессов обогащения от долевого участия угля в шихте: q_1 – шахты “Байдаевская”, q_2 – шахты “Распадская”, q_3 – шахты “Пионерка”, q_4 – разреза “Междуреченский” (сплошная линия – оптимальный режим, пунктирная линия – режим при постоянной плотности разделения)

Таким образом, для работы фабрики в области максимума функции цели необходима стабилизация долевых частей углей различных поставщиков в шихте рядовых углей. Поскольку в настоящее время используемые на многих обогатительных фабриках качающиеся питатели имеют значительную погрешность дозирования (15–20%), то для обеспечения требуемого уровня стабилизации необходимо применять автодозаторы, имеющие погрешность дозирования около 1%.

Таким образом, целесообразна следующая стратегия управления процессами обогащения. Для случая обогащения коксующихся углей при работе обогатительных процессов на суммарный концентрат целесообразно определить режимы работы отдельных обогатительных аппаратов, исходя из условий максимизации функции цели, может быть принят максимум выхода концентрата или максимум стоимости товарной продукции при ограничениях на суммарные зольности концентрата и промпродукта, а также потери концентратных фракций. При этом необходима стабилизация зольности концентрата каждого из процессов, участвующем в образовании суммарного концентрата, а также стабилизация

долевого участия каждой из шахтогрупп, участвующей в смеси исходного угля.

$$M\{\varepsilon(t)\} = y^* - M\{y_1(t)\}. \quad (3.72)$$

Среднеквадратическое отклонение выходной координаты $\sigma[y_1(t)]$ в установившемся режиме

$$\sigma[y_1(t)] = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} [y_1(t) - M\{y_1(t)\}]^2 dt}. \quad (3.73)$$

Доверительные интервалы для среднего значения выходной координаты объекта при доверительной вероятности $p=0,95$ определяется по (2.36) [21].

Оценку времени обучения можно получить по величине изменения заданного значения вероятности $q_1^*(t)$ или параметров исчезающей во времени обратной связи в соответствующих алгоритмах, используя аналогично с методами оценки переходного процесса при типовом единичном воздействии. Зная момент пересечения графика изменения заданной вероятности появления стратегии системы управления с линией, соответствующими 5% отклонение от установившегося значения q_1^* , (∞) определяют время обучения системы t_p^* . Аналогично определяют время обучения по изменению $q_2^*(t)$, $q_3^*(t)$.

Использование такого подхода позволяет перенести понятия собственной частоты ω и логарифмического дискремента затухания d_c^* для оценки качества адаптивных алгоритмов дуального управления объектами с возмущениями типа смесей

$$\omega_0^* = \frac{2\pi}{t_0^*}, \quad (3.74)$$

где t_0^* – период собственных колебаний системы,

$$d_c^* = \ln \frac{q_{1i \max}^*}{q_{1(i+1) \max}^*}, \quad (3.75)$$

где $q_{1i \max}^*$, $q_{1(i+1) \max}^*$ – соседние максимумы на графике $q_1^*=f(t)$.

Использование показателей t_p^* , ω_0^* , d_c^* для оценки качества разработанных алгоритмов управления позволяет осуществить синтез величины шага $\gamma(t)$ с учетом динамических характеристик объекта и желаемого качества переходного процесса.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

4.1. Идентификация коэффициента усиления объекта

В большинстве случаев возмущающие воздействия процессов добычи и обогащения угля не поддаются измерению. Коэффициент усиления объекта управления обычно изменяется при наличии возмущающего воздействия мультипликативного характера (изменение крепости разрушаемых пород, количества материала, подаваемого на сушку, когда управление осуществляется регулированием производительности, и т. п.). Поэтому рассмотрим наиболее сложный случай управления объектом при неконтролируемом медленно изменяющемся возмущении мультипликативного характера, когда $\tau_k > \tau_3$ (τ_k - время спада автокорреляционной функции, τ_3 - время чистого запаздывания). В этом случае эффективно могут работать системы управления по отклонению. Но при изменениях коэффициента усиления объекта управления в такой системе могут появиться автоколебания или увеличиться время регулирования. В этом случае желательно идентифицировать коэффициент усиления объекта и корректировать общий коэффициент усиления системы.

Коэффициент усиления можно идентифицировать без непосредственного измерения, используя соотношение в статике:

$$\mu_1 \approx M\{x(t)\} = \frac{M\{y_1(t)\}}{M\{v_1(t)\}} = \frac{y^*}{M\{v_1(t)\}}, \quad (4.1)$$

где μ_1 - коэффициент усиления объекта или среднее значение возмущающего воздействия;

$M\{x(t)\}$ - оценка среднего значения возмущающего воздействия;

$M\{v(t)\}$ - оценка среднего значения управляющего воздействия на входе объекта;

$M\{y_1(t)\}$ - то же выходной координаты.

Это связано с тем, что выходная координата $y_1(t)$ за счет интегрирующего звена в контуре стабилизации в устойчивой системе всегда будет колебаться в области заданного значения y^* .

Оценка $M\{v(t)\} = c_v(t)$ может быть найдена также на основе алгоритма стохастической аппроксимации [14]. Алгоритм оценки среднего значения управляющего воздействия можно записать в виде:

$$dc_v(t)/dt = -\gamma(t)[c_v(t) - v(t)]. \quad (4.2)$$

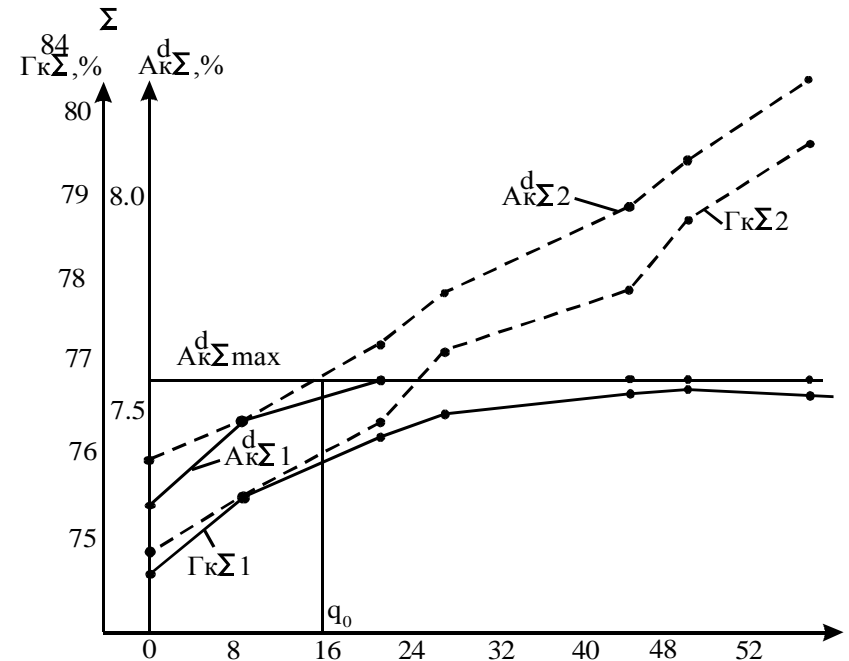


Рис. 5.7. Графики зависимости суммарного выхода и зольности общего концентрата от долевого участия угля шахты "Распадская" в шихте

На рис.5.8 приведен график зависимости критерия эффективности от долевого участия шахт в шихте, откуда следует, что изменение долевого участия угля различных шахтогрупп существенно влияет на стоимость товарной продукции, причем это влияние тем больше, чем легче категории обогатимости угля (см. кривую q_4 на рис.5.8). Однако критерий эффективности при оптимальном значении режимных параметров и при постоянной плотности разделения практически совпадают во всем диапазоне изменения долевого участия угля данной шахтогруппы в шихте, хотя допустимый диапазон для случая стабилизации плотностей разделения существенно ограничен. Отсюда следует, что в процессе работы фабрики на одном варианте шихты нет необходимости из-

менять режимы обогащения на каждом из обогатительных аппаратов вследствие естественного колебания фракционного состава шихты в результате неидеального усреднения смеси углей различных шахтогрупп и марок.

В частности, на рис.5.6 при увеличении долевого участия угля шахты “Байдаевская” от нуля до $q_0=15,1\%$ при постоянной плотности разделения $A_{\kappa\Sigma}^d > A_{\kappa\Sigma}^{d*}$ (брак), а при $q_0 > 15,1\%$ имеет место нормальный режим, при котором $A_{\kappa\Sigma}^d \approx A_{\kappa\Sigma}^{d*}$ и $\Gamma_{\kappa\Sigma}^d > \Gamma_{\kappa\Sigma}^{d*}$. При других сочетаниях шахтогрупп, наоборот, приемлемый режим при постоянной плотности разделения имеет место при $q \leq q_0 = 16\%$, а при $q > q_0$ $A_{\kappa\Sigma}^d > A_{\kappa\Sigma}^{d*} = 7,5\%$, т.е. брак (рис.5.7). В случае изменения долевого участия угля шахты “Пионерка” режим работы с постоянной плотностью разделения (имеющий место при обогащении основного варианта шихты) возможен лишь при $q=10\%$, а при увеличении долевого угля разреза “Междуреченский” (легкой категории обогатимости) допустимы результаты обогащения почти во всем диапазоне изменения q , так как $A_{\kappa\Sigma 1}^d \approx A_{\kappa\Sigma 2}^{d*}$ и $\Gamma_{\kappa\Sigma 1}^d > \Gamma_{\kappa\Sigma 2}^{d*}$. Следовательно, при соблюдении приведенных выше ограничений оптимальный режим по суммарному выходу концентрата мало отличается от режима при постоянной плотности разделения. Однако для окончательного выхода необходимо сопоставить величину критериев эффективности, поскольку здесь не учтен промпродукт, являющийся товарным продуктом, подлежащим реализации.

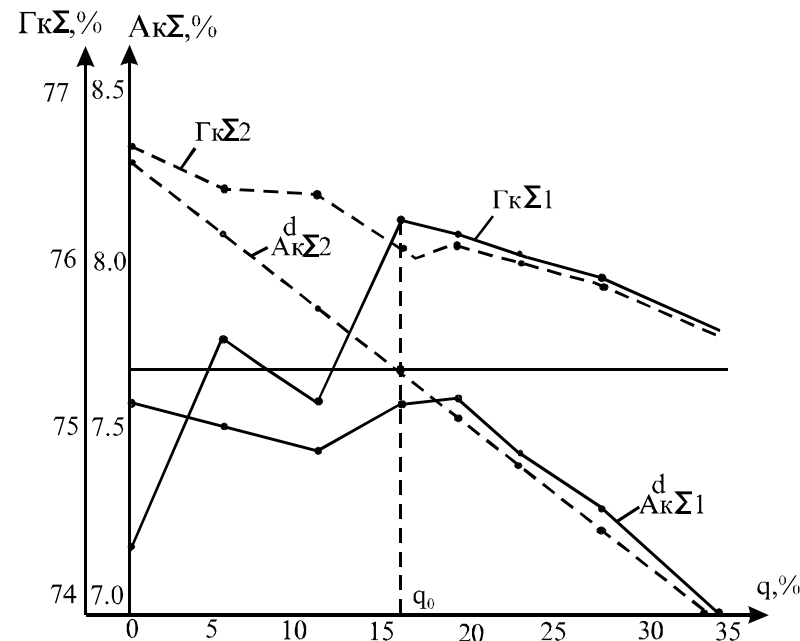


Рис. 5.6. Графики зависимости суммарного выхода концентрата от долевого участия угля шахты “Байдаевская” в шихте

Если шумы измерения отсутствуют или ими можно пренебречь, то в (4.2) можно принять $\gamma(t) = \gamma_0 = \text{const}$.

Тогда из условия устойчивости для разомкнутой системы должно выполняться следующее равенство

$$k_0 = \mu_1 k_p, \quad (4.3)$$

где k_0 - коэффициент усиления разомкнутой системы;

k_p - коэффициент усиления регулятора.

Чтобы k_0 оставался постоянным, коэффициент усиления регулятора должен изменяться следующим образом:

$$k_p = \frac{k_0}{\mu_1} = \frac{k_0}{y_*} c_v(t). \quad (4.4)$$

В рекуррентной форме (4.4) имеет следующий вид:

$$k_p[n] = \frac{k_0}{y_*} \{c_v[n-1] - \gamma[n](c_v[n-1] - v[n])\} \quad (4.5)$$

Этот алгоритм можно назвать алгоритмом изучения (идентификации) возмущения $x(t)$ объекта управления. Задачей системы управления является оперативное определение этого коэффициента и коррекция ко-

эффекта усиления регулятора. Рассмотрим принципы построения таких регуляторов.

4.2. Нелинейные адаптивные регуляторы

Обеспечение требования максимального быстродействия при высокой точности может быть выполнено путем введения в регулятор таких нелинейностей, чтобы при малых отклонениях они не оказывали влияния на его работу, а при больших рассогласованиях коэффициент усиления регулятора увеличивался, что приводило бы к более интенсивному изменению выходной величины регулятора и устранению возмущения. Другими словами, система регулирования должна быть с переменной структурой. Это может достигаться использованием релейного регулятора, охваченного обратной связью апериодическим звеном [1].

Другой более общей разновидностью такого регулятора может быть регулятор с нелинейными элементами. Алгоритм его управления можно представить:

$$v(t) = k_p[\varepsilon + F_1(\varepsilon)] + \frac{1}{T_1} \int_0^t k_p[\varepsilon + F_1(\varepsilon)] dt, \quad (4.6)$$

где ε - величина ошибки регулирования;

$F_1(\varepsilon)$ - нелинейная функция от ε ;

T_1 - постоянная времени интегрирующего звена;

t - текущее время.

При этом на амплитуду выходной координаты регулятора наложено ограничение:

$$v(t) = \begin{cases} v_{\min}; v(t) \leq v_{\min}; \\ v(t); v_{\min} < v(t) < v_{\max}; \\ v_{\max}; v(t) \geq v_{\max}. \end{cases} \quad (4.7)$$

На рис.4.1 приведена схема такого регулятора. Недостатком его является зависимость времени интегрирования от изменения коэффициента усиления регулятора k_p , что может приводить к увеличению времени идентификации возмущения. От этого недостатка свободен регулятор, приведенный на рис.4.2.

Алгоритм работы этого регулятора

$$v(t) = k_p[\varepsilon + F_1(\varepsilon)] + \frac{1}{T_1} \int_0^t [\varepsilon + F_1(\varepsilon)] dt. \quad (4.8)$$

В качестве нелинейности могут использоваться звенья следующего вида:

$$\begin{aligned} F_1(\varepsilon) &= \varepsilon^2 \operatorname{sign} \varepsilon; \\ F_1(\varepsilon) &= \varepsilon^3; \\ F_1(\varepsilon) &= \varepsilon^5 \end{aligned} \quad (4.9)$$

и т.д.

Более точное управление может быть достигнуто при использовании двух нелинейных звеньев. В регуляторе реализуется следующий закон управления (рис.4.3)

$$v(t) = k_p[\varepsilon + F_1(\varepsilon)] + \frac{1}{T_1} \int_0^t [\varepsilon + F_2(\varepsilon)] dt, \quad (4.10)$$

где $F_2(\varepsilon)$ - второй нелинейный элемент регулятора.

При этом также необходимо учесть ограничение (4.7).

На выходе сумматора 8 образуется сигнал (4.10), который через блоки выделения максимального 10 и минимального 11 значения подается на вход объекта регулирования. Следовательно, в регуляторе реализуется нелинейный ПИ-закон регулирования.

Идентификация c_v в соответствии с (4.2) осуществляется в блоке 16, а определение коэффициента μ_1 согласно (4.1) - в блоке деления 17.

Заметим, что при мультипликативном характере возмущающего воздействия

$$M\{y_1(t)\} = M\{v(t)\}M\{x(t)\}, \quad (4.11)$$

стие других шахт в шихте данной марки угля пропорционально изменя-

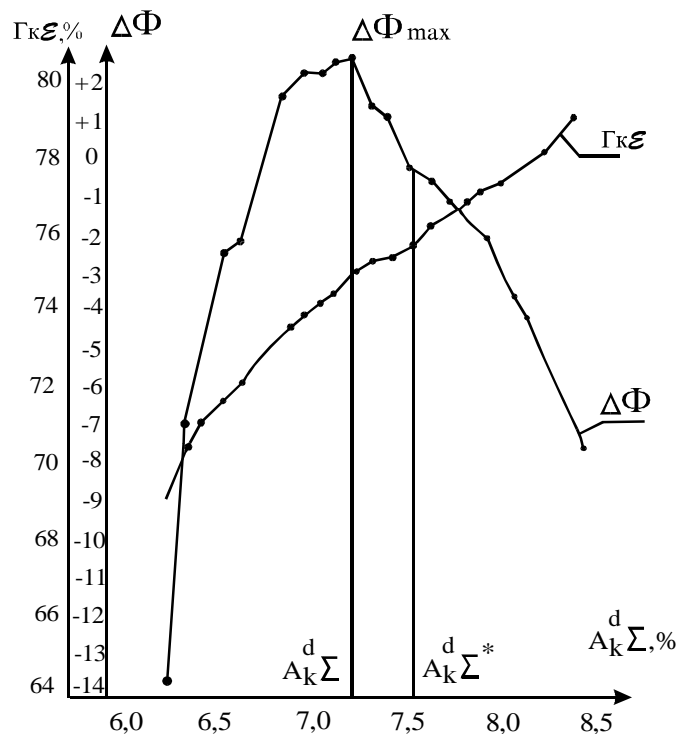


Рис. 5.5. Графики зависимости оптимального выхода общего концентрата и изменения критерия эффективности от зольности суммарного концентрата

Анализ полученных результатов показал, что при ограничениях на зольности общего концентрата и промппродукта, а также на потери концентратных фракций суммарный выход его меньше, чем без указанных ограничений и при обогащении с постоянными плотностями разделения. Однако в этих случаях всегда имеет место брак, так как $A_{k\Sigma}^d > A_{k\Sigma}^{d*} = 7,6\%$, а при $A_{k\Sigma}^d < A_{k\Sigma}^{d*}$ суммарный выход концентрата в режиме оптимизации мало отличается от выхода при постоянных плотностях разделения (рис.5.6).

концентрата $A_{k\Sigma}^d$, а также зависимость этого максимума от долевого участия шахт – поставщиков.

Исследования выполнены по исходным данным ЦОФ “Сибирь” объединения “Кузбассуголеобогащение”. Указанная фабрика обогащает

бинарную смесь коксующихся углей марок “К” (40%) и “Г” (60%) тремя основными процессами (тяжелосредное обогащение – кл. + 13 мм, отсадка – кл. 13-0,5 мм, флотация – кл. 0–0,5 мм). Обогащаемые угли шахт–поставщиков имеют различную обогатимость – от легкой до очень трудной.

В процессе исследований производились расчеты оптимальных показателей обогащения рядовых углей при широком диапазоне изменения долевых участков различных шахтогрупп в шихте. При этом соблюдалось условие, чтобы бинарная смесь углей шихты состояла примерно из 60% марки “Г” и 40% марки “К”. Для каждого варианта шихты определялись также результаты обогащения при постоянных плотностях разделения.

С целью определения зависимости максимума критерия управления от зольности суммарного концентрата выполнены расчеты при различных зольностях концентрата для основного варианта шихты при соблюдении ограничений.

При обработке результатов определялись зависимость оптимального выхода общего концентрата от зольности суммарного концентрата $G_{k\Sigma} = f_1(A_{k\Sigma}^d)$ и зависимость разности максимума критерия оптимальности и этого же критерия при обогащении основного варианта шихты от зольности суммарного концентрата:

$$\Delta\Phi = f_2(A_{k\Sigma}^d), \quad (5.3)$$

где $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0$;

Φ – максимум критерия оптимальности при текущей зольности общего концентрата;

Φ_0 – максимум критерия оптимальности при обогащении основного варианта шихты.

Результаты приведены на рис.5.5. Анализ полученных графиков показывает, что при увеличении зольности общего концентрата его выход также возрастает, а максимум критерия оптимальности имеет глобальный максимум $\Delta\Phi_{\max}$ при оптимальности зольности общего концентрата $A_{k\Sigma}^d = 7,2–7,3\%$. Соответственно изменяются также и режимные параметры отдельных процессов обогащения.

В процессе исследований ставилась задача определить зависимость критерия эффективности и других показателей работы фабрики от долевого участия угля различной категории обогатимости. При изменении долевого участия угля в шихте отдельных поставщиков долевого участка $\mu = M\{x(t)\}$.

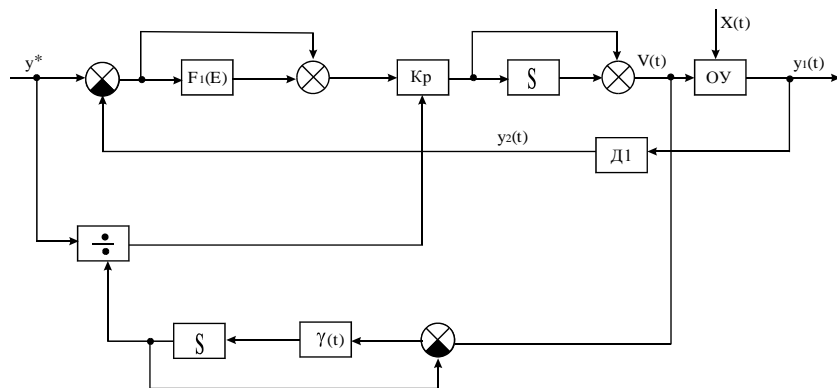


Рис. 4.1. Функциональная схема нелинейного адаптивного регулятора с идентификацией коэффициента усиления объекта

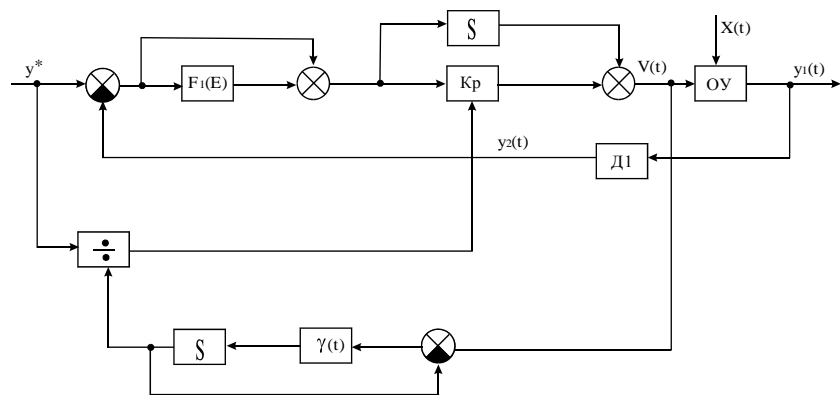


Рис. 4.2. Функциональная схема нелинейного адаптивного регулятора с независимым временем идентификации

Благодаря включению интегратора в разрыв цепи между звеном сравнения 2 и сумматором 8 время интегрирования не зависит от начальных условий, следовательно, время адаптации не зависит от величины сигнала на выходе блока 16 оценки среднего значения в момент $t=0$, равного $M\{x(0)\}$. Это обеспечивает снижение времени адаптации коэффициента усиления.

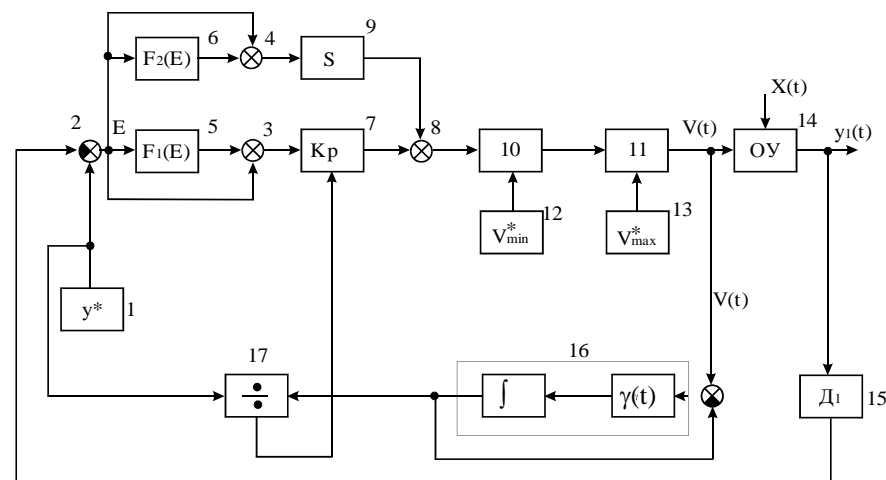


Рис. 4.3. Функциональная схема нелинейного адаптивного регулятора с двумя нелинейными звеньями

Однако такие регуляторы могут применяться только при медленно изменяющихся возмущающих воздействиях. В случаях быстро изменяющейся мультипликативной помехи, как это имеет место, например, при управлении сушильными установками, регулятор не успевает идентифицировать коэффициент усиления объекта, что приводит к снижению точности. На рис.4.4 приведена структурная схема адаптивного регулятора, удовлетворяющего предъявленным требованиям.

В регуляторе реализуется следующий закон управления

$$v(t) = k_p [\varepsilon + F_1(\varepsilon)] + \frac{1}{T_1} \int_0^t [\varepsilon + F_2(\varepsilon)] dt + \frac{y^*}{M\{x(t)\}}, \quad (4.12)$$

где $F_2(\varepsilon)$ - второй нелинейный элемент регулятора;

$$v(t) = \begin{cases} v_{\max}; v(t) \geq v_{\max}; \\ v(t); v_{\min} < v(t) < v_{\max}; \\ v_{\min}; v(t) \leq v_{\min}. \end{cases}$$

Работает регулятор следующим образом. На звене сравнения 2 из сигнала задатчика 1 вычитается выходной сигнал объекта управления. Полученный сигнал поступает на входы сумматоров 3 и 4, а также на выходы нелинейных звеньев 5 и 6, на выходах которых образуются сигналы $F_1(\varepsilon)$ и $F_2(\varepsilon)$.

Если потери полезных компонентов превышают допустимые по фабрике, расчет производится при измененном коэффициенте “k” с учетом того, что при его увеличении потери снижаются и наоборот. В случае невозможности получения заданных значений потерь при варьировании коэффициента “k”, изменяют коэффициент “a”, с увеличением которого потери снижаются.

Экспериментально установлено, что для тяжелосредних сепараторов для породного и промпродуктового отделений коэффициенты “k” равны между собой и изменяются в пределах от 0,004 до 0,009, коэффициент “a” для породного и промпродуктового отделений при условии $\rho_j \leq \rho_p + 100$ изменяются от -1 до -1,5, а при условии $\rho_j > \rho_p + 100$ - от 0,3 до 0,5. Для отсадочных машин для породного отделения при условии $\rho_j < \rho_p + 100$ коэффициент “k” изменяется от 0,004 до 0,009; коэффициент “a” - от 0 до -2, а при условии $\rho_j > \rho_p + 100$ от 0,001 до 0,006, а коэффициент “a” от 0 до 0,5. Для промпродуктового отделения отсадочных машин при условии $\rho_j < \rho_p + 100$ коэффициент “k” изменяется от 0,005 до 0,009, коэффициент “a” - от (-1) до (-2), а для условия $\rho_j > \rho_p + 100$ коэффициент “k” изменяется от 0,0001 до 0,003, а коэффициент “a” - от 0 до 0,3.

6. Алгоритм прогнозирования ожидаемых результатов обогащения используется для поиска оптимальных режимов и значений показателей обогащения. Поиск оптимальных режимов обогащения заключается в нахождении такого сочетания определяющих параметров работы основных процессов обогащения, которое обеспечит получение максимальной прибыли от реализации полученной продукции (концентрата) и промпродукта при заданных ограничениях на зольность суммарного концентрата и промпродукта.

С указанной целью на математической модели технологического процесса ОФ проводятся численные эксперименты в соответствии с матрицей планирования экспериментов. Из полученной совокупности результатов выбирают один вариант по критерию максимума функции цели. Найденная комбинация значений технологических параметров может быть рекомендована для управления технологическими процессами углеобогащения. Конечные результаты задачи расчета рациональных режимных параметров и показателей обогащения используются для выбора и передачи заданий аппаратуре локальной автоматики.

Опыт эксплуатации АСУ ТП на ЦОФ “Сибирь” и ЦОФ “Интинская” показал достаточно высокую эффективность метода прогнозирования результатов обогащения и выбора оптимальных режимов разделения. С использованием указанного метода были исследованы зависимость максимума критерия управления от зольности суммарного

4.Корректировка показателей гранулометрического и фракционного составов шихты углей с учетом дополнительного шламообразования.

Обогащение углей в водной среде сопровождается дополнительным шламообразованием - процессом образования частиц размером менее 0,5 мм из более крупных классов исходного угля, в результате чего каждый машинный класс изменяет свои первоначальные характеристики (выход, зольность, фракционный состав).

Эти изменения учитываются при использовании данных о гранулометрическом и фракционном составе исходного угля для расчета ожидаемых показателей продуктов обогащения. Корректировка ситового и фракционного составов шихты рядовых углей осуществляется, исходя из количества и зольности шлама крупностью <0,5 мм на выходе фабрики и класса <0,5 мм в исходной шихте.

5.Прогнозирование результатов обогащения в обогатительных аппаратах.

Для расчета ожидаемых результатов обогащения угля используются математические модели обогащения в отдельных обогатительных аппаратах, основанные на этропийном методе [46].

Для основных обогатительных аппаратов (отсадочных машин, тяжелосредних сепараторов) определяются нормированные отклонения плотности элементарной функции исходного угля ρ_j , идущего на обогащение в данный обогатительный аппарат, от граничной плотности разделения $\rho_{гр}$:

$$t_j = k(\rho_j - \rho_{гр}) + a \quad (5.2)$$

где параметры “k” и “a” определяют угол прямой нормированных отклонений и характеризуют величину извлечения отдельных фракций исходного угля и продукты обогащения.

Начальные значения коэффициентов четкости разделения (“k” и “a”) определяются по данным фабрики-аналога, обогащающей такие же угли в идентичных типах обогатительных аппаратов.

При заданных начальных значениях “k” и “a” и плотности $\rho_{гр}$ по математической модели обогатительного аппарата рассчитываются потери полезных компонентов с продуктами обогащения:

1) потери концентратных и промпродуктовых фракций угля с породой в породном отделении обогатительного аппарата;

2) потери концентратных фракций с промпродуктом в промпродуктовом отделении обогатительного аппарата.

Рассчитанные значения потерь полезных компонентов сравниваются со значениями этих потерь, установленных на данной обогатительной фабрике.

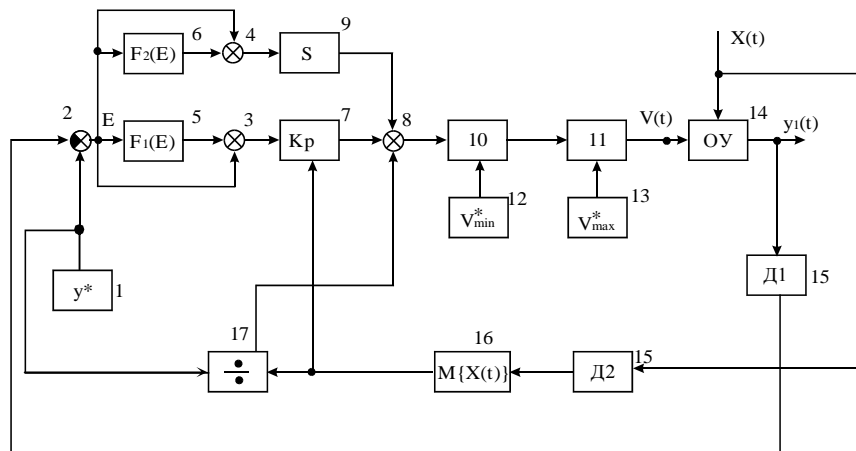


Рис. 4.4. Структурная схема адаптивной системы управления при мультипликативном характере возмущающего воздействия

Выходной сигнал сумматора 3 усиливается управляемым усилителем 7 и подается на сумматор 8. Сигнал с сумматора 4 поступает на вход интегратора 9, с которого также поступает на вход сумматора 8. На выходе сумматора 8 образуется суммарный сигнал, который через блоки выделения максимального 10 и максимального 11 значений подается на вход объекта регулирования. Следовательно, в регуляторе реализуется нелинейный ПИ-закон регулирования.

Коэффициент усиления управляемого усилителя выбирается из условия отсутствия автоколебаний в установившемся режиме, а параметры интегрирующего звена выбирают из условия отсутствия перерегулирования при больших сигналах рассогласования. В процессе работы коэффициент усиления объекта управления изменяется в широких пределах, поэтому необходимо корректировать коэффициент усиления регулятора в зависимости от изменений коэффициента усиления объекта регулирования. Кроме того, при быстро изменяющейся мультипликативной помехе необходимо скомпенсировать выходную координату объекта управления по возмущению.

Для этого датчиком 15 возмущающего воздействия измеряют помеху $x(t)$ и в блоке оценки среднего значения 16 определяют ее среднее значение.

Выходной сигнал с блока оценки среднего значения 16 подается на управляющий вход управляемого усилителя 7 и изменяет коэффици-

ент усиления таким образом, что большему значению коэффициента усиления объекта управления соответствует меньший коэффициент усиления регулятора, т.е. выполняется условие $k_0 = \text{const}$.

Такая коррекция коэффициента усиления регулятора позволяет поддерживать высокую точность работы регулятора при широком диапазоне изменений коэффициента усиления объекта регулирования. Это позволяет избегать автоколебаний в установившемся режиме.

Благодаря включению интегратора в разрыв цепи между звеном сравнения 2 и сумматором 8 время интегрирования не зависит от начальных условий, следовательно, время адаптации не зависит от величины сигнала на выходе блока 16 оценка среднего значения в момент $t=0$, равного $M\{x(0)\}$. Это обеспечивает снижение времени адаптации коэффициента усиления, что ведет к повышению точности регулирования.

Выходной сигнал блока 17 деления, равный

$$u_b = \frac{y^*}{M\{x(0)\}}, \quad (4.13)$$

подается на выход сумматора 8 и соответственно по возмущению изменяет величину $v(t)$ управляющего воздействия.

Таким образом, помеха $x(t)$ компенсируется по возмущению (по прямому каналу) сигналом с выхода блока 17 деления, а по отклонению устраняет влияние шумов и других неконтролируемых изменений в объекте сигналом с выходов интегратора 9 и усилителя 7.

Однако указанный адаптивный регулятор не позволяет управлять объектом в случаях, когда время спада автокорреляционной функции выходной координаты объекта соизмеримо со временем чистого запаздывания. Это связано с тем, что составляющая управляющего воздействия по отклонению

$$v(t) = k_p [\varepsilon + F_1(\varepsilon)]; \varepsilon = y^* - y_1(t), \quad (4.14)$$

где $v(t)$ - составляющая управляющего воздействия по отклонению, будет "раскачивать" в этом случае объект управления, так как составляющая по отклонению будет отслеживать и случайные изменения выходной координаты.

Кроме того, в ряде промышленных процессах измерение выходной координаты объекта осуществляется при наличии шума - помех измерению, который дополнительно приводит к колебаниям выходной координаты объекта. Как правило, вероятностные параметры шумов не известны и могут измениться в зависимости от характера возмущений, действующих на объекты. В этом случае пропорциональная составляющая в законе управления будет также "раскачивать" объект, а это ведет к снижению точности управления.

Поэтому этот способ нецелесообразен.

Другим способом является метод расчета оптимальных результатов обогащения по априорной информации о фракционном и гранулометрическом составах рядового угля.

Согласно поставленной задаче требуется, исходя из характеристик обогащаемого сырья, требований к качеству конечных продуктов обогащения, характеристик обогатительных аппаратов и технологической схемы фабрики, определить значение максимального выхода суммарного концентрата заданной зольности, а также значения зольности концентрата каждому обогатительному процессу, обеспечивающие максимизацию функции цели.

Задача расчета рациональных режимных параметров и показателей обогащения угля состоит из нескольких относительно самостоятельных подзадач.

1. Сначала при изменении текущей зольности производится корректировка ситового и фракционного составов рядовых углей каждой шахты-поставщика. Сущность корректировки заключается в определении количества имеющейся породы в каждом классе и дополнительного количества породы, которое необходимо добавить в каждый класс при уменьшении зольности или исключить из каждого класса при увеличении зольности исходного угля [7].

2. Восстановление гранулометрического состава рядовых углей.

Дробная характеристика гранулометрического состава рядовых углей является исходной информацией для расчета ожидаемых результатов обогащения на различных углеобогатительных машинах и аппаратах. Для восстановления недостающей информации о гранулометрическом составе рядовых углей использованы уравнения Розина-Раммлера. Расчет основан на математическом описании кумулятивных кривых выхода и зольности в суммарных остатках на ситах с различными размерами отверстий [46].

3. Восстановление недостающей информации о фракционном составе каменных углей.

Восстановленный фракционный состав каменных углей по классам крупности является исходной информацией для расчета ожидаемых результатов обогащения в различных обогатительных аппаратах и по фабрике в целом. В алгоритме восстановления фракционного состава угля использован метод его прогнозирования на основании описания кривой всплывших фракций распределением Вейбулла [46].

производительности по концентрату, и, соответственно, приведет к ложному изменению угла наклона искомого участка кривой обогатимости.

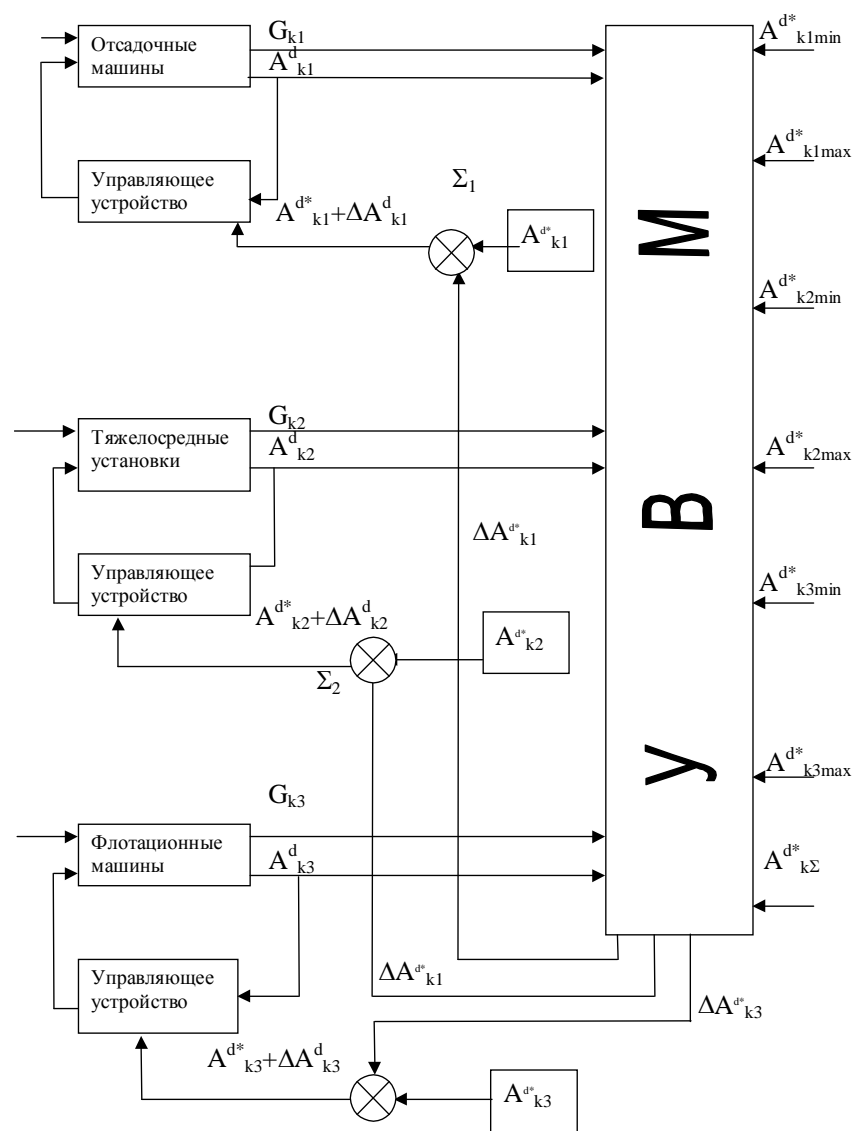


Рис. 5.4. Функциональная схема системы автоматической стабилизации зольности смеси концентратов обогатительной фабрики

На рис.4.5 представлена структурная схема регулятора, обеспечивающего выполнение указанных функций при наличии чистого запаздывания и шумов в каналах измерения [45].

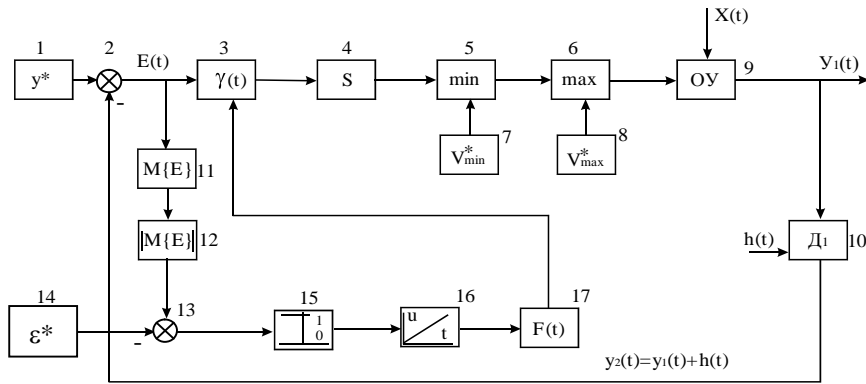


Рис. 4.5. Структурная схема системы автоматического управления с исчезающей во времени обратной связью

В регуляторе реализуется следующий закон управления

$$v(t) = \begin{cases} v_{\min}; v(t) \leq v_{\min} \\ \int_0^t \gamma(t) [y^* - y_2(t)] \operatorname{sgn} [M\{\varepsilon(t)\}] \\ 0 \\ v_{\max}; v(t) \geq v_{\max} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\operatorname{sgn} (|M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^*) = \begin{cases} 1; |M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^* > 0 \\ 0; |M\{\varepsilon(t)\}| - \varepsilon^* \leq 0. \end{cases}$$

где ε^* - заданное значение ошибки регулирования.

На выходе звена сравнения 13 возможны три случая:

$$-\varepsilon^* \leq M\{\varepsilon(t)\} \leq \varepsilon^* \quad (4.16)$$

$$M\{\varepsilon(t)\} > \varepsilon^* \quad (4.17)$$

$$M\{\varepsilon(t)\} < -\varepsilon^* \quad (4.18)$$

Работа регулятора поясняется диаграммой (рис.4.6). При (4.14) с выхода генератора 16 линейно нарастающего напряжения подаётся постоянное напряжение максимальной величины через последовательно включенный нелинейный элемент 17 на управляющий вход усилителя 3, и его коэффициент усиления равен нулю.

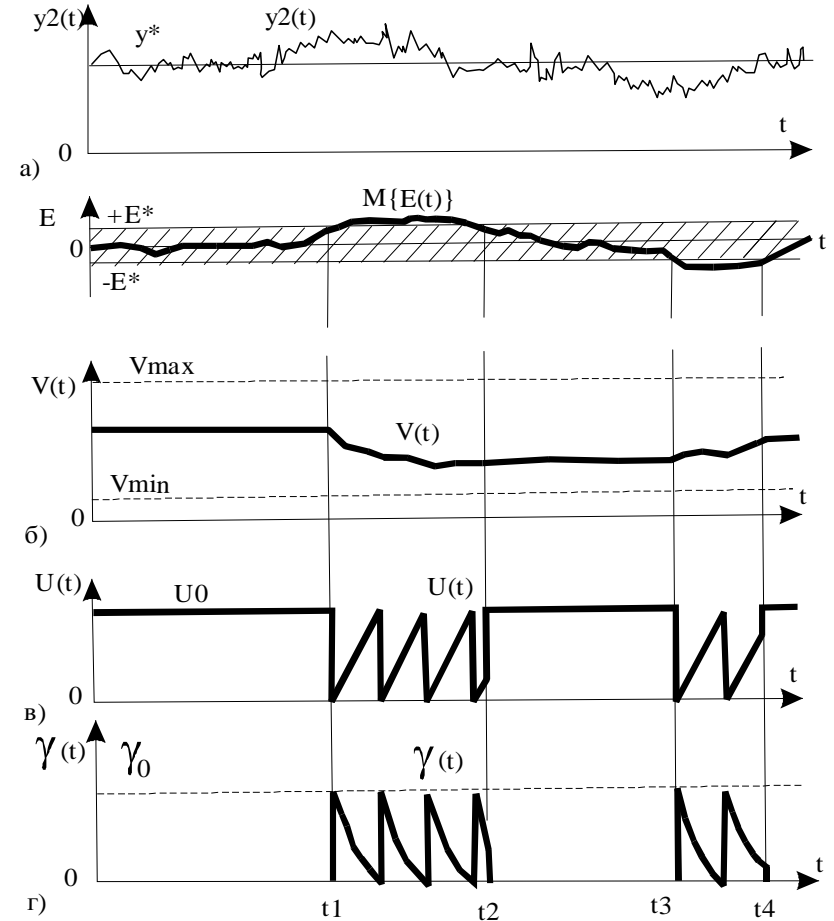


Рис. 4.6. Диаграмма работы нелинейного адаптивного регулятора с исчезающей во времени обратной связью

Нелинейный элемент 17 формирует один из законов (4.9), например,

$$F_1(\varepsilon) = j_1 \varepsilon^3, \quad (4.19)$$

где j_1 - константа.

Это происходит, например, следующим образом (рис.4.7а). На вход транзистора 30 подаётся постоянное напряжение U , открывает его,

уровне функционируют системы автоматического регулирования режимными параметрами, наиболее тесно коррелированными с зольностью концентрата (плотность суспензии, высота породной постели, удельный расход реагентов и др.), а на верхнем уровне путем изменения заданий системы нижнего уровня обеспечивается управление качеством общего концентрата. Функциональная схема системы автоматического управления комплексом процессов приведена на рис.5.4.

При разработке промышленных систем автоматического управления процессами обогащения рекомендуется использовать адаптивные алгоритмы (см. табл.5.1). Еще более сложной задачей является построение системы управления верхним уровнем - комплексом процессов обогащения. При разработке такой системы следует решить следующие задачи:

- 1) оперативное определение оптимальных значений уставок заданий зольности каждого процесса;
- 2) установить целесообразность изменения этих уставок в процессе функционирования системы управления в результате изменений нагрузки на обогатительные аппараты из-за колебаний фракционного и гранулометрического составов обогащаемого угля.

Первую задачу можно принципиально решить двумя способами.

Первый способ. Если оперативно идентифицировать рабочие участки кривой разделения каждого из процессов, то определение оптимальных заданий зольности концентрата сводится к задаче линейного программирования. Однако оперативная идентификация кривых обогащения требует измерения производительностей обогатительного аппарата по входу (рядовой уголь) и выходу (концентрат) и зольности концентрата, что в реальных условиях эксплуатации осуществить в большинстве случаев невозможно.

Если заменить выход концентрата производительностью по концентрату, то можно в принципе идентифицировать рабочий участок кривой разделения по наблюдениям и определять только угол наклона рабочего участка кривой, аппроксимируемой в этой области отрезком прямой линии. Однако в связи со значительными погрешностями измерения зольности концентрата (около 10% отн.) и производительности по концентрату (1% отн.), для получения достоверных результатов следует усреднить большое количество результатов измерений этих параметров. Учитывая, что измерения должны быть независимыми, для этого требуется значительное время, так как время спада автокорреляционных функций концентрата составляет обычно несколько минут. Но за это время может измениться нагрузка по входу, что повлечет изменение

тов различных машинных классов для получения общего продукта необходимо получить максимум выхода готового продукта заданного качества или максимум его стоимости при заданном диапазоне изменения зольности общего концентрата.

Для решения этой задачи обычно осуществляют декомпозицию сложного объекта на более простые. В данном случае целесообразно выделить два уровня управления: нижний образуют локальные системы автоматического управления отдельными процессами (отсадка, флотация, обогащение в минеральных суспензиях), а верхний - система управления комплексом указанных процессов. Причем, верхний уровень управления должен определять стратегию управления каждой из локальных систем таким образом, чтобы максимизировать общий критерий управления. При этом, как нетрудно убедиться, критерий управления каждым из процессов обогащения противоречит общему критерию. Только в частном случае, например, при раздельной реализации продуктов каждого процесса, локальные критерии аддитивны по отношению к общему критерию управления. Это обусловлено наличием жесткого ограничения на зольность общего концентрата, вследствие чего оптимальный режим возможен на границе допустимого интервала. В этом случае задача отыскания экстремума функции цели сводится к задаче программирования.

На основании известной теоремы максимального выхода можно утверждать, что существует единственный режим, при котором достигается глобальный максимум функции цели при определенных значениях выходов и зольности каждого из процессов при заданной зольности общего концентрата, хотя её можно получить при множестве вариантов работы всех процессов, однако выход общего концентрата при этом будет меньше, чем при глобальном максимуме функции цели.

Следовательно, задачей системы управления верхнего уровня является определение оптимальных значений режимных параметров каждого из процессов обогащения, работающих на общий продукт. Практически задача сводится к определению заданий каждому процессу по зольности концентрата. Поэтому основным требованием к функционированию локальной системы управления является необходимость стабилизации заданной зольности концентрата. В связи с рассмотренными в разделе 1 особенностями процессов обогащения как объектов автоматического управления разработка промышленной аппаратуры для них является весьма трудной задачей.

С целью упрощения системы управления и повышения надежности функционирования систему автоматического управления целесообразно строить по двухуровневому иерархическому принципу. На нижнем

в результате чего шунтируется выход усилителя 3, поэтому на выходе усилителя сигнал равен нулю. На входе интегратора 4 сигнал также равен нулю, а на выходе его имеется постоянный сигнал, поступающий через последовательно включенные блоки выделения минимума 5 и максимума 6 управляющего воздействия на вход объекта 9. Таким образом, система регулирования в этом случае оказывается разомкнутой. Функциональная схема генератора линейно нарастающего напряжения приведена на рис.4.7б.

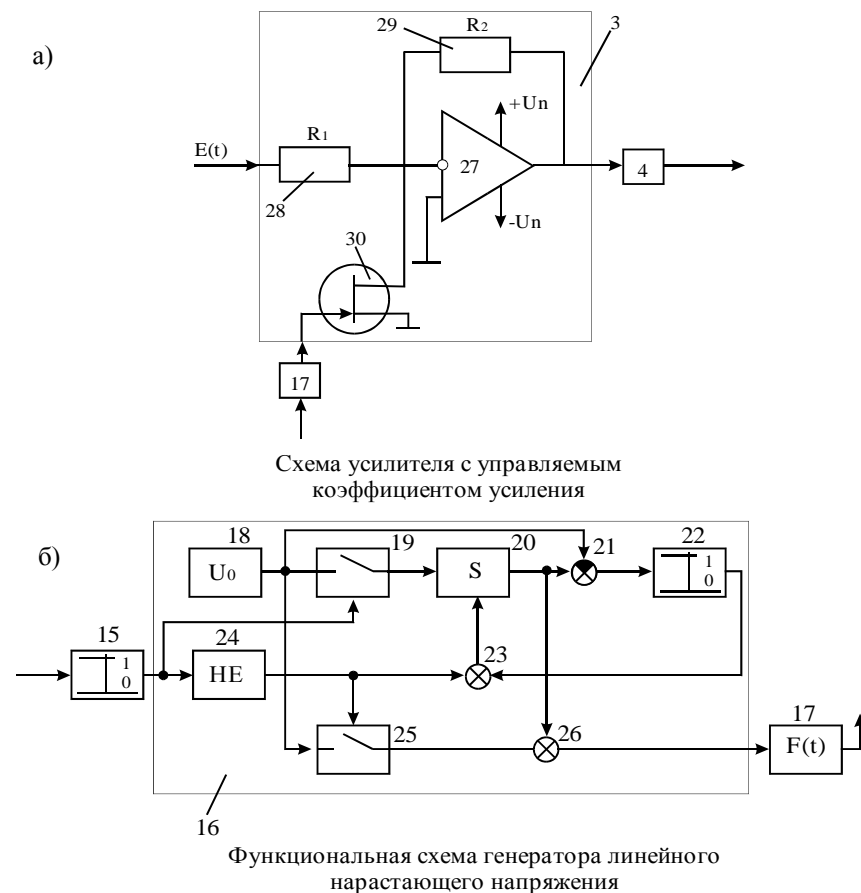


Рис. 4.7. Элементы нелинейного адаптивного регулятора: схема усилителя с управляемым коэффициентом усиления (а), схема генератора линейно нарастающего напряжения (б)

Когда сигнал на выходе порогового элемента 15 равен нулю, ключ 19 разомкнут, а ключ 25 замкнут, так как на выходе 24 НЕ имеется в этом случае сигнал.

Сигнал U от источника опорного напряжения через ключ 25 и сумматор 26 подается на нелинейный элемент 17, запирающий усилитель 3. Одновременно напряжение U подается на вход сумматора 23, с которого попадает на управляющий вход интегратора 20 и обнуляет его. Поэтому на выходе интегратора 20 сигнал равен нулю, что приводит к тому, что сигнал на выходе порогового элемента 22 также равен нулю.

При условии (4.15) на входе нелинейного элемента 17 сигнал исчезает, значит исчезает сигнал и с управляющего входа усилителя 3, что соответствует максимальному коэффициенту усиления (см.рис.4.6г). Он станет равным

$$\gamma_0 = \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.20)$$

где R_1, R_2 - сопротивления резисторов 28, 29 (выбирается из условия отсутствия автоколебаний и перегулирования в начальный момент включения контура подстройки).

Линейно нарастающий сигнал генератора $u(t)$ достигает своего максимального значения u_0 (см.рис.4.6в), и в этот момент коэффициент усиления усилителя 3 $\gamma(t)$ падает до нуля. В тот же момент появляется сигнал на выходе порогового элемента 22 и через сумматор 23 поступает на вход интегратора 20 и обнуляет его. Таким образом, цикл работы генератора повторяется через время (период следования импульсов).

В момент времени $t=t_3$ имеют место условия (4.18). При этом регулятор работает аналогично случаю (4.15) до тех пор, пока в момент времени $t=t_4$ не восстановятся условия (4.16). При этом управляющее воздействие $v(t)=\text{const}$, напряжение $u(t)$ скачком увеличивается до u_0 , а коэффициент усиления до $\gamma(t)=0$, т.е. система управления снова размыкается (см. рис.4.6в, г).

В практике встречаются случаи, когда требования к снижению (увеличению) ошибки регулирования жестче, чем к увеличению (снижению). Например, при регулировании процесса сушки угольного концентрата требование к точности при снижении температуры сушильного агента выше, чем при повышении температуры. Это вызвано тем, что при снижении температуры на незначительную величину наступает режим "точки росы", при котором ранее испаренная влага выпадает в конце сушилки в высушенный продукт в виде конденсата. При регулировании зольности концентрата процессов углеобогащения более жесткие требования предъявляются при увеличении зольности, чем при ее снижении относительно заданной, так как при превышении определенного

Указанная система обеспечивает автоматическое изменение скорости цепи конвейера в зависимости от производительности выемочной машины, отключение цепи конвейера при подходе к машине негабаритных кусков материала, снижение производительности выемочной машины при перегрузке конвейера, остановку подачи комбайна при остановке привода конвейера.

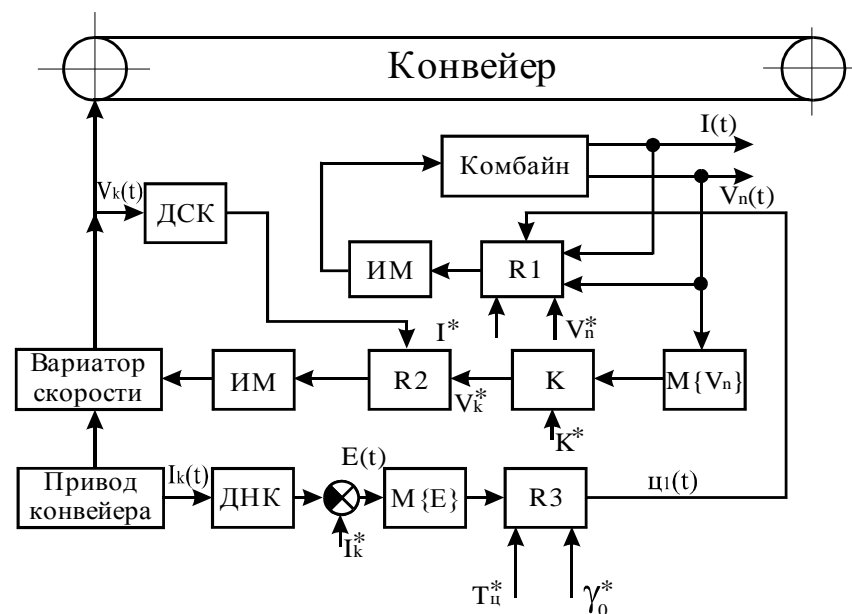


Рис. 5.3. Функциональная схема системы автоматического управления режимом работы очистного комбайна и конвейера с регулируемым приводом

5.3. Управление процессами обогащения угля

Наиболее важными объектами обогатительных фабрик являются процессы разделения угля различных машинных классов. В то же время указанные процессы являются весьма трудными объектами для осуществления автоматического управления. В соответствии с критерием и целью управления (см. раздел 1) комплексом обогатительных процессов в наиболее общем и важном для практики случае смешивания concentra-

тушка электромагнита ЭМ2, что приводит к снижению скорости подачи комбайна. При этом катушка электромагнита ЭМ1 обесточивается, поскольку на входе элемента 4 НЕ появляется сигнал. В случае $J^*-J(t) \approx 0$ $v_n^*-v_n(t) > 0$ регулятор работает в скользящем режиме, так как релейные усилители охвачены отрицательной обратной связью (датчик обратной связи 9 (ДОС), включенный на выходе электромагнита, корректирующее звено 10 и звено сравнения 11).

Если $v_n^*-v_n(t) \leq 0$, в регулятор поступает запрещающий сигнал. Это происходит следующим образом. Скорость подачи комбайна измеряется датчиком скорости 12 (ДС), где примешивается шум $h_v(t)$. В блоке 13 определяется оценка среднего значения скорости и подается на звено сравнения 14, в котором из него вычитается сигнал датчика 14. На выходе звена сравнения 14 сигнал на выходе порогового элемента 5 исчезает и тем самым запрещает прохождение сигнала через элемент 6 И. Регулятор стабилизирует в этом случае $V_n(t) = V_n^*$.

При этом защита двигателя от перегрузок не отключается, так как постоянно подключена катушка ЭМ2 электромагнита. В связи с тем, что текущее значение нагрузки не сглаживается, на выходе звена сравнения 2 постоянно имеют место импульсы, которые приводят к кратковременному срабатыванию релейного усилителя 7, снижая тем самым скорость подачи. Поэтому регулятор фактически стабилизирует заданную скорость подачи v_n^* .

Рассмотренный выше унифицированный регулятор может использоваться при разработке промышленных систем автоматического управления объектов. В частности, управление концентрацией метана в очистном забое целесообразно осуществлять путем изменения скорости подачи очистного комбайна. Естественно, при этом не исключается регулирование концентрации метана изменением расхода воздуха, однако при ступенчатом увеличении расхода свежего воздуха концентрация метана в забое сначала возрастает, а затем начинает снижаться. Это повышает вероятность взрыва газа. Максимум производительности при ограничениях по газовому фактору имеет место при постоянной скорости подачи без циклических остановок. Поэтому желательно поддерживать допустимую концентрацию метана в призабойном пространстве при непрерывной скорости подачи машин.

Аналогично эта идея может быть использована при разработке систем автоматического управления комплексом функционально связанных машин (комбайн-конвейер, комбайн-предохранительная лебедка и др.). В качестве примера на рис.5.3 приведена функциональная схема системы управления очистным комбайном и конвейером с регулируемым приводом.

уровня идет бракованная продукция. Аналогичные требования имеют место при регулировании нагрузки горных машин и т.д. Задача решается при использовании двух задатчиков ошибки (рис.4.8).

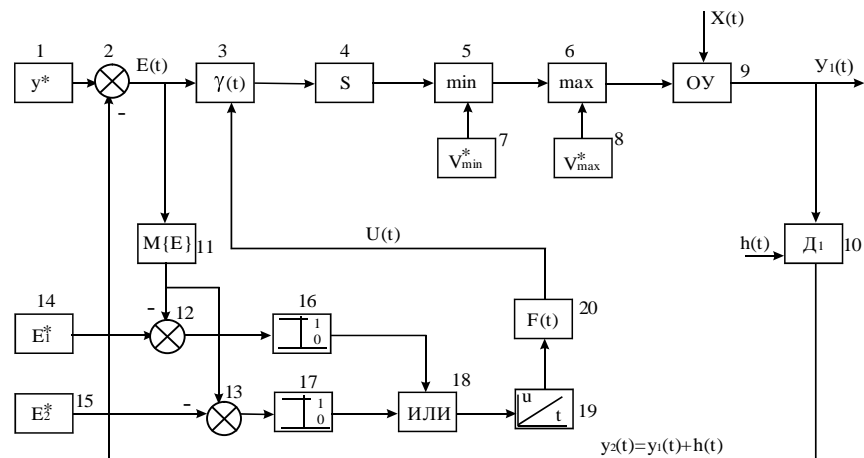


Рис. 4.8. Адаптивная система автоматического управления с исчезающей обратной связью и асимметричным заданием ошибки регулирования

В регуляторе реализуется следующий закон управления:

$$v(t) = \begin{cases} v_{\min}; v(t) \leq v_{\min} \\ \int_0^t \gamma(t) [y^* - y_2(t)] [\text{sgn}(M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) + \text{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{E(t)\})] dt \\ v_{\max}; v(t) \geq v_{\max} \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\text{sgn}(M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) = \begin{cases} 1; (M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) > 0 \\ 0; (M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) = \begin{cases} 1; (\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) > 0 \\ 0; (\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) \leq 0 \end{cases}$$

где ε_1^* , ε_2^* - заданные ошибки регулирования при $M\{E(t)\} > 0$, $M\{E(t)\} < 0$, соответственно.

Здесь выходной сигнал блока оценки математического ожидания $M\{E(t)\}$ ошибки регулирования подаётся на входы звеньев сравнения 12 и 13.

На выходе звена сравнения подключены пороговые элементы 16 и 17, которые через элемент ИЛИ соединены с входом генератора линейно

нарастающего напряжения 19. Остальные блоки такие же, как и в предыдущем регуляторе.

Алгоритм (4.13) является частным случаем алгоритма (4.21) при $\varepsilon_1^* = \varepsilon_2^* = \varepsilon_3^*$.

Рассмотренные выше регуляторы не учитывают состояние управляемого объекта, что влечет увеличение времени обучения при остановках и включениях объекта.

Например, при остановке процесса горения или сушки сыпучего материала выходная координата становится равной или близкой к нулю, поэтому величина рассогласования и модуль его среднего значения будут выводить интегратор в одно из ограничений на управляющее воздействие.

При включении объекта в работу потребуется дополнительное время для обучения регулятора, чтобы вывести ошибку регулирования в заданную область.

Ниже приведен алгоритм функционирования нелинейного адаптивного регулятора, свободного от указанного недостатка.

В регуляторе реализуется следующий закон управления:

$$v(t) = \begin{cases} v_{\min}; v(t) \leq v_{\min} \\ \int_0^t \gamma(t) [y^* - y_2(t)] [\text{sgn}(M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) + \text{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{E(t)\})] \text{sgn } y_3(t) dt \\ v_{\max}; v(t) \geq v_{\max} \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\text{sgn}(M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) = \begin{cases} 1; (M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) > 0 \\ 0; (M\{E(t)\} - \varepsilon_1^*) \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{sgn}(\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) = \begin{cases} 1; (\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) > 0 \\ 0; (\varepsilon_2^* - M\{E(t)\}) \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{sgn } y_3(t) = \begin{cases} 1; y_3(t) > 0 \\ 0; y_3(t) \leq 0 \end{cases}$$

где $y_3(t)$ - выходной сигнал датчика 22 состояния объекта управления.

Структурная схема регулятора приведена на рис.4.9.

По сравнению с предыдущим этот регулятор дополнен датчиком 22 состояния объекта управления, пороговым элементом 23 и элементом И 19. Здесь работа регулятора должна рассматриваться при включенном объекте $y_3(t) > 0$. Если объект управления отключен, сигнал на выходе датчика 22 состояния объекта равен нулю, поэтому на выходе порогового элемента 23 сигнал равен нулю, сигнал на выходе элемента 19 И также равен нулю. При этом сигнал на входе генератора 20 равен нулю, а

базе которого может быть построена любая система управления комплексом машин и оборудования очистного забоя.

На рис.5.2 приведена функциональная схема такого автоматического регулятора. С целью повышения быстродействия в схеме регулятора сигнал с датчика нагрузки не сглаживается, релейная характеристика получена почти идеальной за счёт использования двух релейных усилителей (триггеров), сблокированных так, что когда один из них срабатывает, другой принудительно отключается. Это происходит следующим образом.

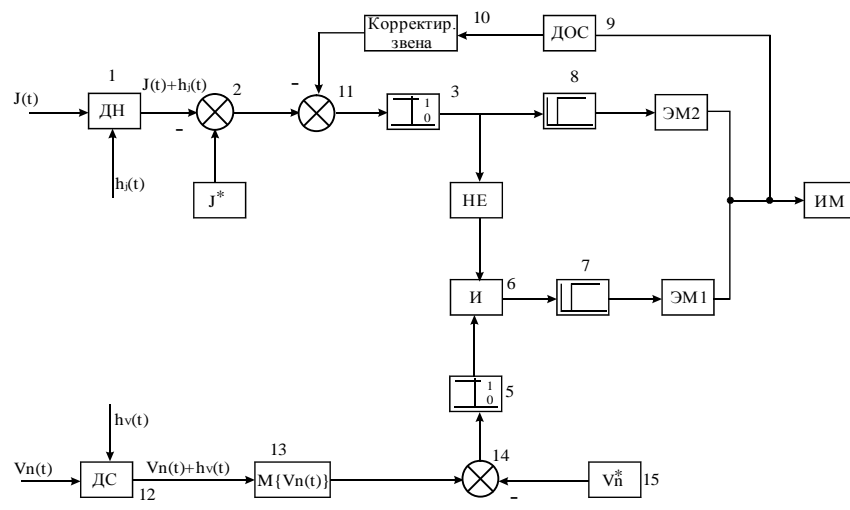


Рис. 5.2. Функциональная схема автоматического регулятора режима работы очистных комбайнов

Сигнал с датчика нагрузки 1 (ДН), где к нему примешивается шум $h_j(t)$, подаётся на вход звена 2 сравнения. Если $J^* - J(t) > 0$, $v_n^* - v_n(t) > 0$, на входе порогового элемента 3 сигнал имеет положительную полярность, следовательно, на его выходе сигнал равен 0, а на выходе элемента 4 НЕ имеется единичный сигнал, который при разрешающем сигнале с порогового элемента 5 через элемент 6 И подаётся на релейный усилитель 7. Сигнал с выхода усилителя 7 подаётся в катушку электромагнита ЭМ1, перемещая золотник в сторону увеличения скорости подачи комбайна.

При $J^* - J(t) < 0$, $v_n^* - v_n(t) > 0$ на входе порогового элемента 3 появляется сигнал отрицательной полярности, поэтому на входе релейного усилителя 8 также появляется сигнал, благодаря чему срабатывает ка-

ограничений автоматически снижается задание скорости подачи автоматического регулятора очистного комбайна, а при наличии резерва по этим факторам система автоматически выводится к одному из наиболее жестких ограничений.

Для этого в системе имеются блоки 1, 2, ..., k, используемые, например, в нелинейных регуляторах с исчезающей обратной связью и в общем случае асимметричным заданием ошибок управления. Задачей системы является определение максимального значения ошибки управления и коррекция скорости подачи в системе автоматического управления комбайном. Максимальное значение ошибки определяется в блоке 4 распознавания ограничений:

$$\sup M\{\varepsilon_i(t)\}; i = 1, 2, \dots, k. \quad (5.1)$$

Блок распознавания ограничений замыкает ключ того блока, в котором имеет место (5.1). При замыкании ключа Кл_i с выхода усилителя с переменным коэффициентом усиления $\gamma(t)$ сигнал подается на вход интегратора 5, выходной сигнал которого алгебраически суммируется в сумматоре 6 с сигналом задатчика 7 скорости подачи комбайна. При изменении установки автоматический регулятор комбайна стабилизирует новую скорость подачи ($v_n^* + \Delta v_n$).

При снижении ошибки регулирования до допустимой области $\varepsilon_{i1} \geq \varepsilon_i(t) \geq \varepsilon_{i2}$ ключ Кл_i размыкается и $\gamma_i(t) = 0$. Если при этом остается превышение допустимой ошибки по другим каналам, блок 4 подключается к интегратору 5 соответствующий канал и т.д. Таким образом, при превышении допустимого ограничения скорость подачи комбайна снижается на Δv_n .

Если система не исчерпала ограничения по всем каналам, то блок 4 выделяет максимальное из них (с учетом знака), т.е. минимальный резерв повышения производительности комбайна, если последний не достиг ограничения по скорости подачи. Тогда уставка скорости подачи увеличивается.

Использование алгоритмов с исчезающей во времени обратной связью обеспечивает устойчивую работу системы без перерегулирования, что особенно важно при выемке угля из газоносных пластов.

Основным узлом таких систем может быть унифицированный регулятор, который должен обеспечивать возможность построения промышленных систем автоматического управления режимами работы. В процессе выемки угля регулируемые параметрами процесса выемки угля является скорость подачи и нагрузка привода. При этом другое оборудование очистного забоя (крепь, конвейер и др.) управляется в тесной зависимости от выемочной машины. Таким образом, регулятор представляет собой законченный в функциональном отношении модуль, на

также $\gamma(t)=0$, т.е. система управления размыкается. На выходе интегратора 4 остается сигнал $v(t)$, имевшийся при отключении объекта.

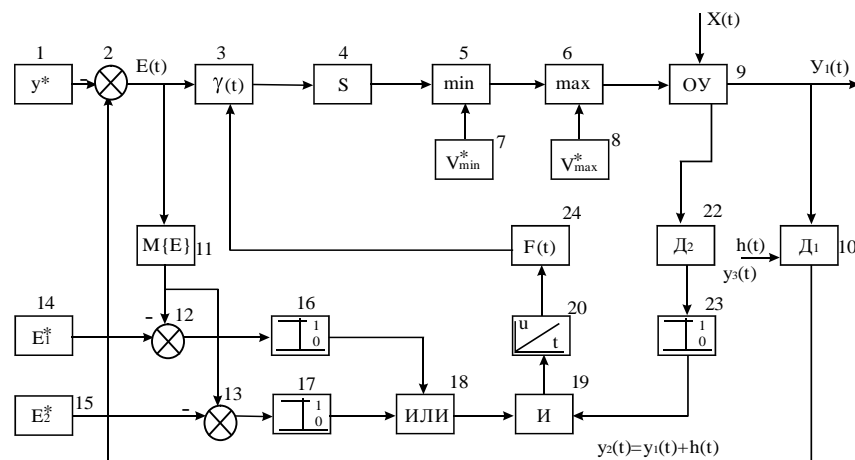


Рис. 4.9. Адаптивная система автоматического управления с исчезающей обратной связью и асимметричным заданием ошибки регулирования

4.3. Синтез нелинейных адаптивных регуляторов

Удовлетворить противоречивые требования высокой точности и быстродействия систем автоматического управления процессами выемки и обогащения угля можно при помощи рассмотренных регуляторов с перестраиваемой структурой. Такими регуляторами могут быть нелинейные адаптивные регуляторы с одной или двумя нелинейными звеньями и релейные регуляторы, в которых релейный элемент охвачен отрицательной обратной связью. Такое построение регуляторов позволяет пренебрегать нелинейными свойствами в случае малой ошибки регулирования и, наоборот, в случае большой ошибки рассматривать их как релейные.

В случае использования релейного регулятора при малых отклонениях регулируемой координаты от задания последний работает в скользящем режиме. Поэтому синтез таких систем автоматического регулирования может выполняться известными методами, например, при

рассмотрении их как линейных - методами оптимального управления, а релейных - методами расчета нелинейных систем.

В силу специфических особенностей рассматриваемых объектов управления, оптимальное управление ими в традиционной постановке не представляется возможным, поэтому речь может идти лишь о квазиоптимальном управлении, которое может рассматриваться как эталон для сравнения реальных систем оценки степени их совершенства.

Как правило, измерению подлежит лишь выходная координата объекта управления, остальные фазовые координаты измерению не доступны. Оптимальное по точности управление использует линейные алгоритмы вида:

$$v(t) = k_p \left(y_1 + h_1 \frac{dy_1}{dt} + h_2 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \dots + h_{n-1} \frac{d^{n-1} y_1}{dt^{n-1}} \right), \quad (4.23)$$

где h_1, h_2, \dots, h_{n-1} – коэффициенты;

n – порядок дифференциального уравнения объекта управления.

В частности, уравнение оптимального регулятора для объекта второго порядка имеет следующий вид [1]:

$$v(t) = -\sqrt{\frac{a}{c_1}} \left(y_1 + h_1 \frac{dy_1}{dt} + h_2 \frac{d^2 y_1}{dt^2} \right), \quad (4.24)$$

где $\sqrt{\frac{a}{c_1}} = k_p$ – коэффициент усиления, определяемый выбором весовых коэффициентов функционала (при перерегулировании около 10%):

$$I(v) = \int_0^\infty (a y_1^2 + c_1 v^2) dt \rightarrow \min. \quad (4.25)$$

Для защиты горных машин от аварийных режимов требуется максимальное быстродействие регулятора. Задача об оптимальном по быстродействию управлении решается с использованием принципа максимума Л.С.Понтрягина. Такое управление реализуется при помощи релейного регулятора.

При автоматическом управлении рассматриваемыми объектами определяющим для защиты от аварийных ситуаций является длительность первого интервала управления, не превышающего половины постоянной времени объекта управления. В частности, алгоритм управления оптимального регулятора при свободном движении системы, описываемой уравнением второго порядка:

$$v' = \dot{y}_1 + F(y_1); v = -\text{sign} v'; F(y_1) = y_1(1 - \xi), \quad (4.26)$$

а функции управления

Продолжение табл. 5.1.

1	2	3
Нелинейный регулятор с идентификацией коэффициента усиления объекта и коррекцией общего коэффициента усиления.	$\tau_3 \gg \tau_k$; $\mu_1 = \text{var}$ Высокое быстродействие и точность управления. Контролируемое основное сравнительно медленно изменяющееся возмущающее воздействие.	Регулирование режимных параметров (нагрузка привода, плотность суспензий, высота породной постели и т.п.).
Нелинейный (релейный) регулятор с корректирующим апериодическим звеном, охватывающим релейный элемент.	$\tau_3 \gg \tau_k$; $\mu_1 = \text{var}$ Высокие быстродействие и точность управления. Неконтролируемое возмущающее воздействие.	Регулирование режимных параметров (скорость подачи, нагрузка и др.).
Нелинейный регулятор с идентификацией коэффициента усиления объекта и коэффициента усиления регулятора и управляющего воздействия.	$\tau_k \gg \tau_3$; $\mu_1 = \text{var}$ Высокое быстродействие и точность. Контролируемое быстроизменяющееся возмущающее воздействие.	Регулирование режимных параметров горных машин и процессов обогащения.
Нелинейный регулятор с исчезающей во времени обратной связью.	$\tau_k \approx \tau_3$; $\mu_1 = \text{var}$ Неконтролируемые возмущающие воздействия.	Регулирование режимов работы горных машин. Стабилизация параметров, ограничивающих возможность регулирования основной координаты объекта.

добычной (проходческой) машиной единый комплекс (см. раздел 1) можно построить соответствующую систему.

На рис.5.1 приведена функциональная схема системы адаптивного управления процессом выемки угля в очистных забоях шахт с учетом рассмотренных в 1 разделе ограничений. При действии любого из “к”

$$v = -\text{sign} \left[T \frac{dy_1}{dt} - y_1(1 - \xi) \right]. \quad (4.27)$$

Реализация системы автоматического управления процессами добычи и обогащения угля желательна с обеспечением квазиоптимальной точности в нормальном режиме эксплуатации и квазиоптимального быстрогодействия при аварийных или экономически невыгодных режимах. Этим требованиям удовлетворяют нелинейные адаптивные регуляторы, обладающие свойством переменной структуры.

В простейшем случае такую систему можно получить, если релейный элемент охватить отрицательной обратной связью звеном с передаточной функцией $W_k(p)$. Тогда $W_k(p) \cdot W_p(p) \gg 1$ ($W_p(p)$ - линеаризованное звено, представленное релейным элементом). Передаточная функция корректирующего звена $W_k(p)$ должна быть обратной передаточной функции объекта управления. Это значит, что можно использовать корректирующее звено, имеющее отрицательную частотно-импульсную характеристику. Релейный элемент системы работает в этом случае в режиме вибрационной линеаризации.

В момент увеличения амплитуды регулируемой координаты сверх допустимого уровня преобладает сигнал главной обратной связи, поэтому система работает как релейная, т.е. с более высоким быстродействием. После снижения управляемой величины до заданного значения преобладающей становится местная обратная связь, в связи с чем система управления приобретает вновь линейные свойства [1].

Как показано в [1], в качестве корректирующих звеньев можно использовать РС-контуры.

Синтез и анализ функционирования предложенных выше нелинейных адаптивных регуляторов могут быть выполнены также на основе разработанных общих подходов, изложенных, например, в [16].

При малых отклонениях ε нелинейные звенья не оказывают влияния на работу регулятора, поэтому при работе регулятора в области установившихся режимов возможно его рассматривать как линейный. Рассмотрим систему автоматического управления объектом с нелинейным ПИ-регулятором. Объект управления, как показано выше, описывается передаточной функцией вида

$$W_0(p) = \frac{\mu_1 e^{-\tau_3}}{T_0 p + 1}. \quad (4.28)$$

Тогда согласно [31] параметры регулятора связаны с параметрами объекта управления следующими зависимостями (сохраняя обозначения оригинала):

$$k_c = \frac{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}{4(3T^2 + 3T + 1)} \quad (4.29)$$

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{T_i} = \frac{6T^2 + 6T + 3}{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}, \quad (4.30)$$

где k_c - коэффициент усиления замкнутой системы;
 $I = T_i$ - постоянная времени интегратора;
 T - относительная постоянная времени:

$$T = \frac{T_0}{T_3}. \quad (4.31)$$

T_0 - постоянная времени объекта.

В качестве примера приняты следующие данные: $T_0 = 120$ с, $\tau_3 = 30$ с. Тогда на основании приведенных выше формул имеем: $k_c = 2,02$; $1/T_i = 0,25$; $T = 4$; $T_i = 4$ с.

Полученные значения параметров регулятора будут справедливы при работе с отклонениями, когда $F_1(\varepsilon) \ll \varepsilon_1^*$, $F_2(\varepsilon) \ll \varepsilon_2^*$ (ε_1^* , ε_2^* - заданные ошибки регулирования).

В качестве нелинейностей примем

$$F_1(\varepsilon) = F_2(\varepsilon) = \varepsilon^3. \quad (4.32)$$

Тогда, используя метод гармонического баланса, преобразуем нелинейную систему к виду, выделив линейную часть и нелинейное звено.

Уравнение нелинейной части

$$F(x) = x + x^3 \quad (4.33)$$

На рис.4.10а показан график нелинейности (6.33), из которого следует, что нелинейность является нечетно-симметричной. Тогда коэффициент гармонической линеаризации равен (рис.4.10б)

$$q(a_H) = 1 + \frac{3}{4} a_H^2, \quad (4.34)$$

где a_H - амплитуда колебаний.

Для определения устойчивости нелинейной системы построим амплитудно-частотную характеристику линейной части системы и годограф гармонически-линеаризованного нелинейного $W_H(a_H)$ звена. Годограф вычисляется по формуле:

$$Z(a_H) = -\frac{1}{W_H(a_H)} = -\frac{1}{1 + \frac{3}{4} a_H^2}. \quad (4.35)$$

Результаты расчетов годографа нелинейного звена и амплитудно-фазовой характеристики представлены на рис.4.11. Как видно из рис.4.11, автоколебания и рассматриваемой системе не возникают, так

Таблица 5.1

Рекомендуемая область применения адаптивных алгоритмов управления

Стратегия управления (закон регулирования)	Характеристика объекта и возмущающих воздействий	Рекомендуемая область применения
1	2	3
Случайная стратегия управления с идентификацией центров классов возмущающих воздействий.	$\tau_3 \approx \tau_k$; $\mu_1 = \text{const}$ Стационарный квазистационарный характер возмущающих воздействий с неизвестными шумами измерения. Невысокое быстродействие.	Стабилизация влажности высушенного угля. Стабилизация зольности концентрата процесса флотации. Регулирование содержания твердой фазы в сливе сгустителей.
Смешанная стратегия управления с идентификацией центров классов возмущающих воздействий и их вероятностей.	$\tau_3 \approx \tau_k$; $\mu_1 = \text{var}$ Квазистационарный характер возмущающих воздействий с неизвестными шумами измерения. Необходимость более оперативной компенсации возмущения. Контроль только основного возмущающего воздействия. Невысокие требования к точности определения коэффициента усиления объекта.	Стабилизация качества продуктов процессов обогащения фабрик. Регулирование концентрации метана.
Регулярная стратегия управления с идентификацией центров классов возмущающих воздействий и их вероятностей.	$\tau_3 \approx \tau_k$; $\mu_1 = \text{var}$ Квазистационарный характер возмущающих воздействий с шумами измерения с неизвестными характеристиками измерения. Недопустимость случайных управляющих воздействий. Контролируемо только основное возмущение.	Процессы обогащения фабрик с инерционными исполнительными механизмами.

Раздел 5.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

5.1. Рекомендации по выбору алгоритмов управления

Разработанные адаптивные алгоритмы обеспечивают возможность автоматического управления любым процессом при добыче и обогащении угля. Выбор того или иного алгоритма зависит от динамических свойств объектов управления, диапазона изменения их параметров, наличия априорной информации об объекте и его возмущающих воздействиях, а также от требований к точности и быстродействию систем.

При возможности измерения основного возмущающего воздействия следует использовать адаптивные алгоритмы с идентификацией их параметров по наблюдениям. В случае значительной величины чистого запаздывания могут использоваться как алгоритмы управления с идентификацией вероятностных параметров смесей возмущающих воздействий, так и алгоритмы с исчезающей во времени обратной связью. Если коэффициент усиления объекта изменяется в значительных пределах, целесообразно использовать адаптивные алгоритмы с компенсацией этих изменений. При автоматическом регулировании режимных параметров процессов (нагрузка привода, плотность, расход пульпы и др.) следует применять нелинейные адаптивные регуляторы с переменной структурой. В табл. 5.1 (τ_k - время спада автокорреляционной функции, τ_3 - время чистого запаздывания) приведены более подробные сведения об области применения адаптивных алгоритмов для конкретных объектов горного производства.

При этом могут иметь место случаи, когда вследствие нестационарности параметров объекта или возмущающего воздействия лучшие результаты в каком-то диапазоне их изменений дает одна стратегия управления, а в другом диапазоне – другая. Тогда целесообразно использовать переменные стратегии, алгоритмы которых рассматриваются ниже.

5.2. Управление системой горных машин при добыче угля

В соответствии с общим алгоритмом и целью управления режимом работы очистного или проходческого комбайна с учетом ограничений, обусловленных наличием других машин, образующих вместе с

как кривые годографа $Z(a_n)$ и амплитудно-фазовая характеристика линейной части не пересекаются, что свидетельствует об устойчивости линеаризованной системы.

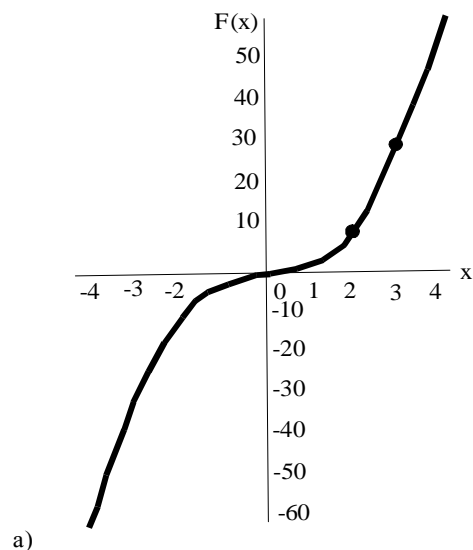


График $F(x) = x + x^3$

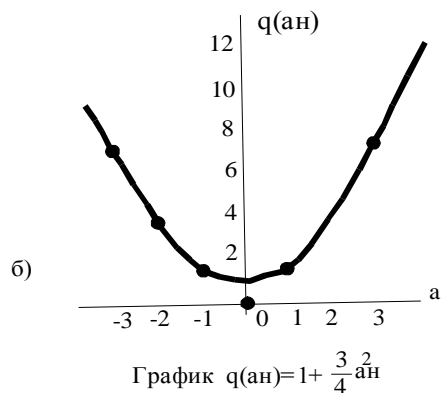


Рис. 4.10. Графики нелинейного звена $F(x) = x + x^3$ (а) и его коэффициента гармонической линеаризации (б)

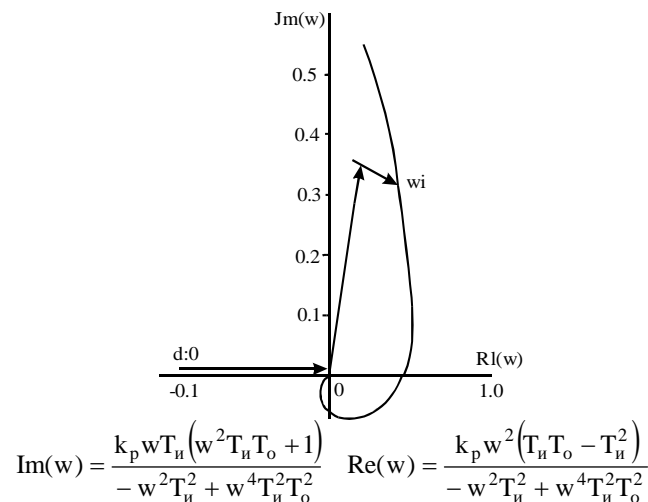


Рис. 4.11. Годограф нелинейного звена и амплитудно-фазовая характеристики

Указанные выше результаты получены при допущении о постоянстве коэффициента усиления объектов управления. В действительности большинство объектов управления добычи и обогащения угля имеют переменные коэффициенты усиления. Эти изменения компенсируются в рассмотренных выше адаптивных регуляторах в соответствии с (4.3).

С целью определения степени влияния переменного коэффициента усиления на показатели качества регулирования и подтверждения устойчивой работы объектов с передаточной функцией вида (4.28) при исследовании адаптивных нелинейных регуляторов на ЭВМ выполнены исследования нелинейных адаптивных регуляторов с одним и с двумя нелинейными звеньями. Объект управления сначала рассматривался без постоянного запаздывания. Регулятор реализует алгоритм (4.6) при нелинейности вида (4.32).

Начальные условия: $y_1(0)=0$; $c_v(0)=7$; $T_0=360$ с; $y^*=7$; $v_{\max}=20$; $c_0=0,1-1000$; $k_p=0,25-0,5$; $\mu_1=0,5-12,0$; $\gamma_0=1$ (c_0 , γ_0 - константа в соответствии с (3.60) исчезающей во времени обратной связи).

На рис.4.12 приведены графики переходных процессов. Выходная координата $y_1(t)$ в этом случае стремится к установившемуся значению y^* , статическая ошибка за счет интегрируемого звена в контуре регули-

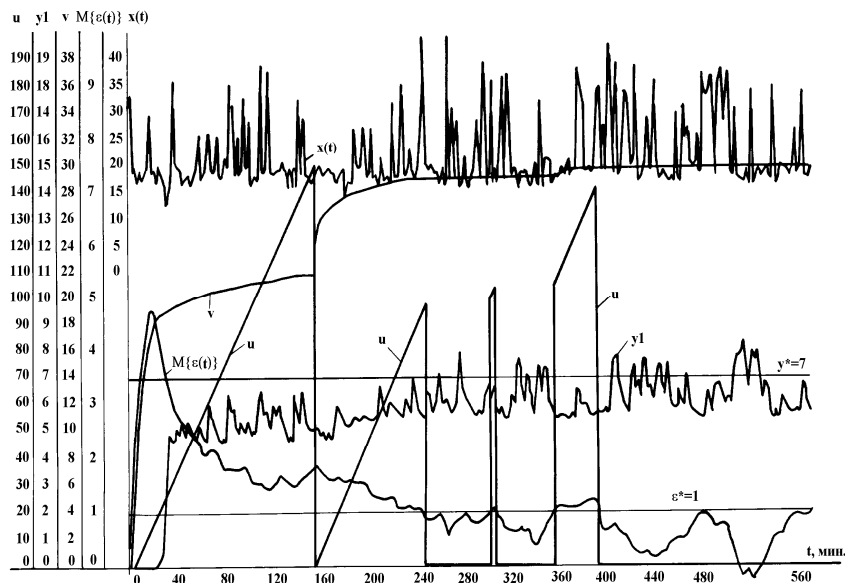


Рис. 4.17. Графики переходных процессов в нелинейной адаптивной САУ при стохастическом возмущающем воздействии

ское размыкание системы управления и автоматическое замыкание ее при $|\varepsilon| > \varepsilon^* = 1$. Период работы генератора составляет $12\tau_3$, поэтому установившееся значение выходной координаты $y_1(t)$ достигается за два цикла его работы.

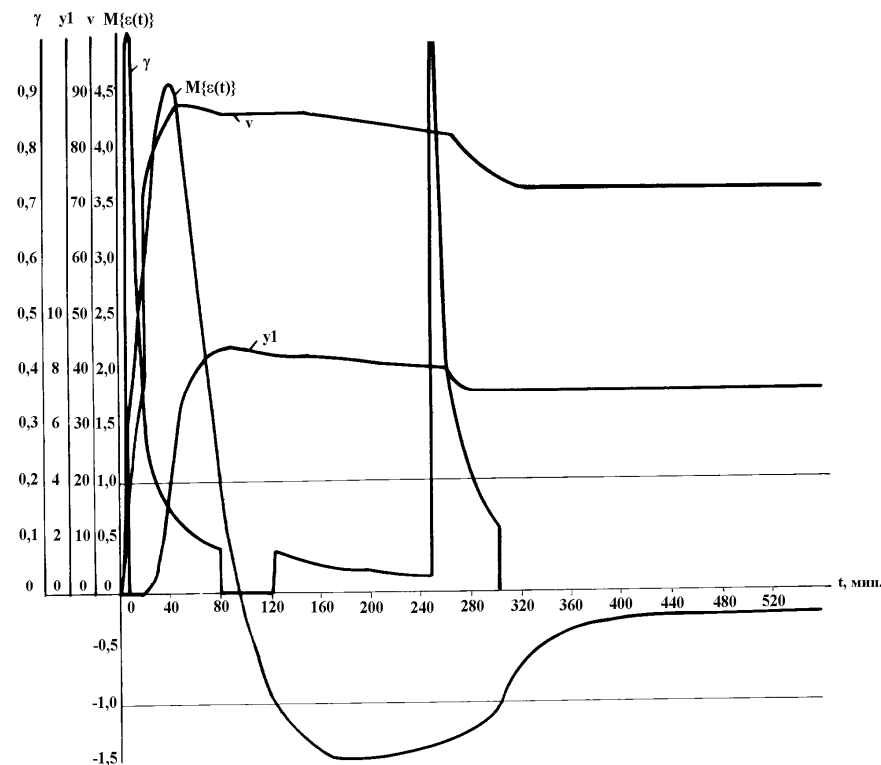


Рис. 4.16. Графики переходных процессов в САУ с нелинейным адаптивным регулятором с исчезающей во времени обратной связью и чистым запаздыванием в объекте управления при ступенчатом изменении задания и отсутствии возмущающих воздействий

При наличии возмущающего воздействия характер переходных процессов в системе изменяется: выходная координата $y_1(t)$ и $M\{\varepsilon(t)\}$ имеют вероятностный характер. Генератор линейно нарастающего напряжения $U(t)$ включается в случайные моменты времени (см. рис.4.17), время регулирования практически не изменяется, перерегулирование в системе управления отсутствует.

рования равна нулю. Управляющее воздействие носит двойственный характер, так как с одной стороны приводит выходную величину $y_1(t)$ к заданному значению y^* , т.е. является управляющим, а с другой - позволяет идентифицировать коэффициент усиления объекта управления, т.е. является "изучающим". Соотношение между изучающей и управляющей составляющими определяется выбором $\gamma(t)$.

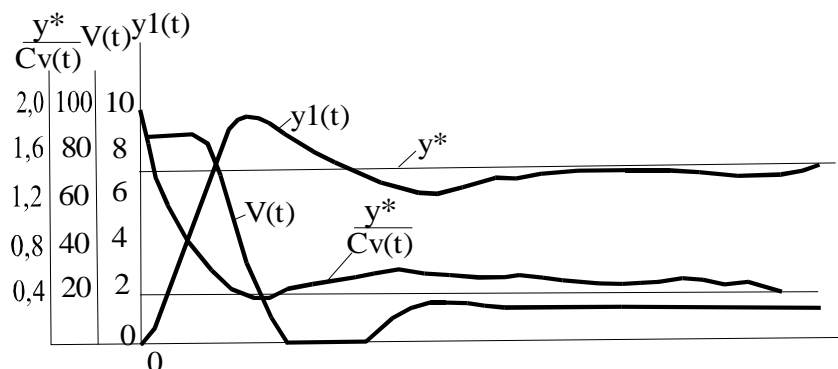


Рис. 4.12. График переходных процессов в нелинейной адаптивной системе управления без постоянного запаздывания в объекте

Графики переходных процессов на рис.4.12 получены при $\mu_1=12$ и $c_0=300$.

Кроме того, на ЭВМ выполнены исследования нелинейного адаптивного регулятора (4.10) с двумя нелинейными звеньями $F_1(\varepsilon)$ и $F_2(\varepsilon)$ с учетом чистого запаздывания в объекте управления. Дифференциальные уравнения системы

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{1}{T_0} (k_0 y_3 - y_1) \quad (4.36)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{1}{\alpha + t} (y_3 - y_2) \quad (4.37)$$

$$y_3 = \begin{cases} u_1, & \text{при } u_{\min} < u_1 < u_{\max} \\ u_{1\max}, & \text{при } u_1 \geq u_{\max} \\ u_{1\min}, & \text{при } u_1 \leq u_{\min} \end{cases} \quad (4.38)$$

$$y_4 = y_1(t - T) \quad (4.39)$$

$$\varepsilon = y^* - y_4 \quad (4.40)$$

$$u_1 = \frac{by_2}{y^*} [\varepsilon + F_1(\varepsilon)] + k_p \int_0^t [\varepsilon + F_2(\varepsilon)] dt \quad (4.41)$$

Нелинейные звенья имеют следующий вид:

$$F_1(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon^3; \gamma_1 < \varepsilon^3 < \gamma_2 \\ k_{01}; \varepsilon^3 \leq \gamma_1 \\ k_{02}; \varepsilon^3 \geq \gamma_2 \end{cases} \quad (4.42)$$

$$F_1(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon^3; \gamma_3 < \varepsilon^3 < \gamma_4 \\ k_{03}; \varepsilon^3 \leq \gamma_3 \\ k_{04}; \varepsilon^3 \geq \gamma_4 \end{cases} \quad (4.43)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, k_{01}, k_{02}, k_{03}, k_{04}$ - константы.

Начальные условия: $\mu_1=0,5$; $k_p=0,25-0,5$; $v_{\max}=90$; $v_{\min}=20$; $y^*=7$; $c_0=1-300$; $\gamma_0=1$; $y_1(0)=0$; $y_4(0)=0$; $\tau_3=20-80$ с; $\gamma_1=-4$; $\gamma_2=4$; $\gamma_3=-3$; $\gamma_4=3$; $c_v(0)=14$.

При этом $y_4(t)=y_1(t-\tau_3)$.

На рис.4.13 приведены графики переходных процессов при $k_p=0,25$, а на рис.4.14 - при $k_p=0,5$. Время переходных процессов в системе приведено с учетом обучения, т.е. идентификации коэффициента усиления объекта и коррекции коэффициента усиления регулятора. Анализ приведенных графиков показывает сходимость исследуемых алгоритмов. При этом с увеличением k_p перерегулирование увеличивается, поскольку процесс идентификации коэффициента усиления не оказывает заметного влияния на качество управления, при синтезе таких регуляторов можно использовать те же методы, что и для синтеза систем с постоянным коэффициентом усиления.

В тех случаях, когда возмущающие воздействия носят мультипликативный характер и они достаточно быстро изменяются по отношению к параметрам объекта, компенсировать их при использовании рассмотренных адаптивных регуляторов не представляется возможным. Если имеется возможность измерить возмущающее воздействие, его можно компенсировать, не вычисляя величину коэффициента усиления объекта, используя алгоритм (4.12) (см.рис.4.4).

При увеличении частого запаздывания в объектах управления при использовании рассмотренных нелинейных адаптивных регуляторов с алгоритмами (4.6), (4.6), (4.10), (4.12) устойчивость процесса управления

разработаны, поэтому целесообразно использовать методы моделирования с использованием ЭВМ.

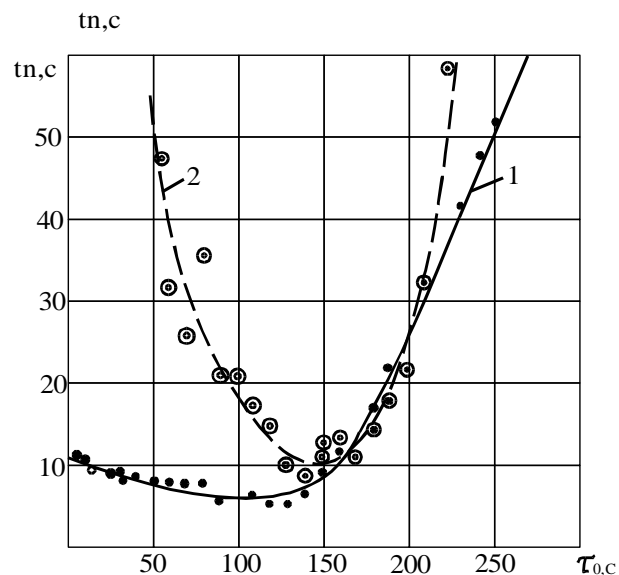


Рис. 4.15. Графики зависимости показателей качества процесса управления от значений параметров объекта управления и его модели:
1 – при изменении времени чистого запаздывания в объекте,
2 – при изменении времени чистого запаздывания в модели объекта

На ЭВМ исследована система управления объектом, аппроксимируемым аperiодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием, с нелинейным адаптивным регулятором с исчезающей во времени обратной связью (3.60). На рис.4.16 приведены графики переходных процессов при свободном движении системы, а на рис.4.17 - при стохастических воздействиях. Объект управления (4.28) исследуется при $\tau_3=120$ с.

Установлено, что процесс сходится тем быстрее, чем больше величина задания погрешности управления. При отсутствии возмущающих воздействий выходная координата $y_1(t)$ достигает установившегося значения $y^*=7$ за $15\tau_3$, а ошибка регулирования снижается до заданного значения $|\varepsilon^*|=1$ за $4\tau_3$, однако из-за перерегулирования в системе управления в течение $9\tau_3$ ошибка $\varepsilon < -1$ (см. рис.4.16). В моменты достижения ошибки регулирования допустимых значений происходит автоматиче-

нарушается, поэтому следует принимать меры к его компенсации или использовать другие алгоритмы, например, (4.15), (4.21) (4.22).

Для выяснения преимуществ алгоритмов (4.15), (4.21), (4.22) перед традиционными методами рассмотрим наиболее предпочтительный вариант динамической компенсации, предложенный В.В.Солодовниковым и А.Б. Филимоновым [45].

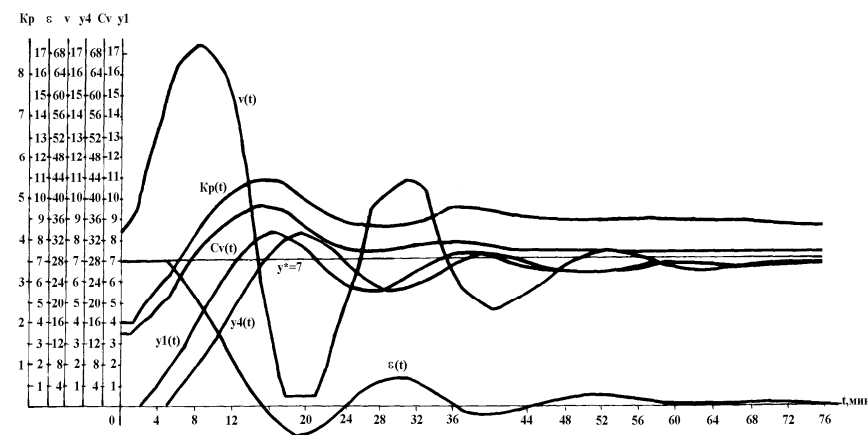


Рис. 4.13. Графики переходных процессов в САУ, содержащей нелинейный адаптивный регулятор с двумя нелинейными звеньями и чистым запаздыванием при $k_p=0,25$

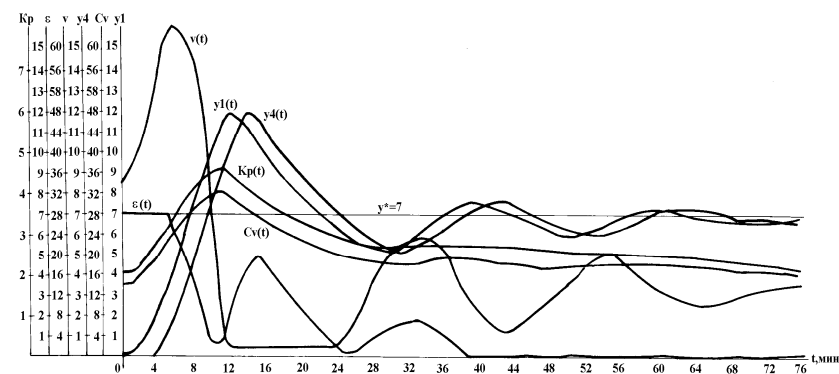


Рис. 4.14. Графики переходных процессов в САУ, содержащей два нелинейных звена при $k_p=0,25$

Использование упределителей Смита и Рейсвика при переменных коэффициенте усиления и постоянной времени объекта нецелесообразно из-за необходимости их идентификации и компенсации с использованием достаточно сложных технических средств, так как идентификация постоянной времени объекта значительно сложнее идентификации коэффициента усиления.

С целью практической проверки эффективности динамической компенсации объектов на ЭВМ исследована модель системы автоматического управления процесса разгрузки породы из отсадочных машин. Объект описывается дифференциальным уравнением второго порядка с запаздыванием. Параметры объекта управления $T_0=135$ с, $\tau_3=150$ с, $\mu_1=0,5$. Для управления использован типовой регулятор ПИ с параметрами настройки $k_p=1$ с⁻¹, $k_i=1$ с⁻¹.

Исследованиями установлено, что динамическая компенсация постоянного запаздывания обеспечивает устойчивую работу объекта управления. Время переходных процессов и перерегулирование в значительной степени зависят от адекватности модели реальному объекту, в частности, от соотношения коэффициентов усиления, постоянных времени и времени запаздывания в модели и объекте.

Показатели качества процесса регулирования линейно зависят от разности $\Delta\tau=\tau_0-\tau_M$; $\Delta T=T_0-T_M$; $\Delta k_0=k_0-k_{0M}$ (где τ_M , T_{0M} , k_{0M} - параметры модели объекта управления) при $\Delta\tau \geq 0$ и практически не зависят при $\Delta\tau < 0$. На рис.4.15 приведены графики $t_n=f(t)$ при изменениях τ_M и τ_0 откуда следует, что система регулирования критична к выбору τ_M . Это ограничивает область применения метода динамической компенсации при управлении объектами горного производства, поскольку последние имеют переменные параметры.

Чистое запаздывание в некоторых объектах углеобогажительных фабрик можно скомпенсировать, как это приведено в работах [92-95], однако эти методы также приводят к статическим системам автоматического управления с небольшим коэффициентом усиления. Переменные параметры объекта и наличие статической ошибки при относительно большом времени чистого запаздывания в объекте не позволяют использовать эти методы для автоматического управления многими процессами добычи и обогащения угля.

При значительном запаздывании сигналов в объекте предпочтительнее использовать предложенные нелинейные адаптивные регуляторы с исчезающей во времени обратной связью.

Аналитические методы синтеза систем автоматического управления с нелинейными алгоритмами управления указанного класса пока не