

**К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ДОБЫЧИ УГЛЯ В ЛАВАХ**

Проведено аналіз основних характеристик і побудовано функціональні схеми підсистем управління процесом видобутку вугілля, визначені передатні функції основних динамічних ланок підсистем і системи в цілому.

**TO MODELING OF CONTROL QUALITY
OF A COAL MINING PROCESS IN LONGWALLS**

The analysis of basic performances is conducted and the functional schemes of control subsystems by process of a coal mining are constructed, the transfer functions of the basic dynamic components of subsystems and system as a whole are determined.

Система управления процессом добычи угля представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов-звеньев различной природы: выемочный комбайн (струг), горный массив, психофизическая и биомеханическая подсистемы человека-горнорабочего (бригадира-диспетчера), пульта и блоки управления элементами очистного комплекса, датчики, каналы связи, передачи информации и пр., функционирующих в условиях влияния случайных внешних возмущающих воздействий: горно-геологические условия (тектонические нарушения, размыв угольного пласта, включения, породные прослои, выделение газа и пр.), факторы аварийности (случайные отказы элементов очистного комплекса, газодинамические явления, загазованность, затопление выработок, обрушения пород и пр.), человеческий фактор (ошибочные действия горнорабочих, физическое и нервное утомление, ошибки руководства, неверные решения и пр.). Важной является задача моделирования показателей качества (устойчивости, быстродействия и точности) работы такой системы при изменяющихся условиях ее функционирования [1]. Для этого необходим анализ основных характеристик, построение функциональных и структурных схем подсистем управления процессом добычи угля и определение передаточных функций подсистем, динамических звеньев и системы в целом.

Так, в системе управления процессом добычи угля можно выделить следующие основные подсистемы: «машинист – выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг) – угольный пласт», «крепильщик – механизированная крепь», «механизированная крепь – горный массив», «звено горнорабочих очистного забоя (ГРОЗ) – очистной комплекс», «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ», «угольная шахта-группа высоконагруженных лав».

Общая типовая функциональная схема системы управления представлена на рис. 1 [1]. Стандартными элементами в такой схеме являются: объект управления, управляющее, сравнивающее, измерительное, усилительно-преобразовательное, исполнительное устройства, управляемая величина $y(t)$, задающее воздействие $g(t)$, рассогласование (ошибка) $x(t) = h(t) - z(t)$, возму-

щающее $f(t)$ и управляющее воздействие $u(t)$.

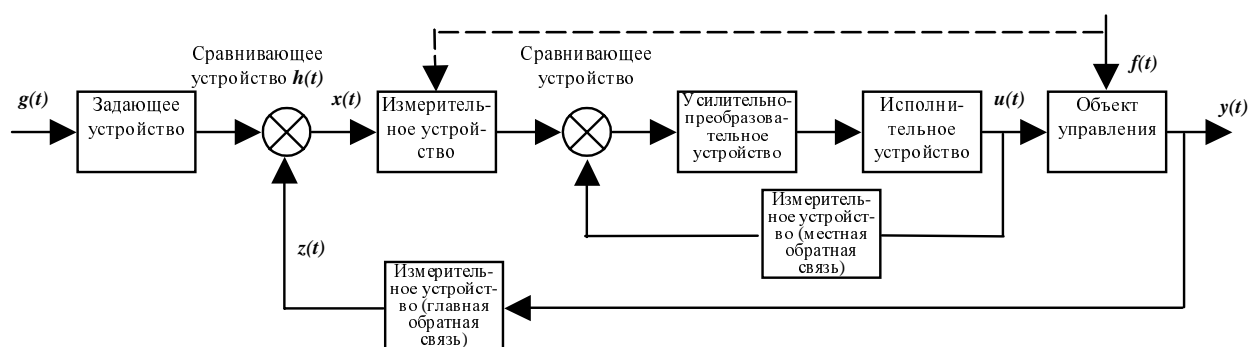


Рис. 1 - Общая типовая функциональная схема системы управления

Характеристики основных типовых элементов подсистем системы управления процессом добычи угля представлены в табл. 1. Процессами управления для подсистем являются управление выемочной машиной, отделение угля от массива (пласта), процесс передвижки крепи, управление кровлей, управление очистным комплексом, управление звеном ГРОЗ, процесс добычи угля высоконагруженными лавами. Основными управляемыми величинами являются - производительность выемочной машины, зольность и крупность угля, скорость крепления, устойчивость кровли, производительность комплекса, подвигание забоя, производительность труда ГРОЗ, уровень травматизма, уровень добычи шахты, себестоимость угля, уровень аварийности. В качестве возмущающих воздействий выступают горно-геологические условия (природные факторы), человеческий фактор, факторы аварийности (аварии). В качестве измерительных устройств для подсистем нижнего уровня («машинист – выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт», «крепильщик – механизированная крепь», «механизированная крепь – горный массив») - датчики диагностики состояния оборудования и узлов, контрольные приборы, сенсорные устройства, для подсистем высокого уровня («звено ГРОЗ – очистной комплекс», «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ», «угольная шахта - группа высоконагруженных лав») - системы контроля, диагностики и мониторинга параметров технологических процессов добычи угля. В качестве сравнительных устройств, определяющих ошибку системы (рассогласование) – для подсистем нижнего уровня – человек, для подсистем высокого уровня – компьютеры, системы поддержки принятия решений. Усилительно-преобразовательными устройствами являются, для подсистем нижнего уровня – блоки и пульта управления, рычаги, гидродомкраты, для подсистем высокого уровня – каналы связи (передачи информации); процессами, реализующими управляющее воздействие – для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепильщик – механизированная крепь» - механические движения человека, для подсистем «выемочный комбайн (струг) – угольный пласт», «механизированная крепь – горный массив» - механическое движение элементов комплекса, для подсистем высокого уровня - процессы передачи-переработки информации.

Таблица 1 – Характеристики основных элементов подсистем управления процессом добычи

Характеристика	Подсистема						
	«Машинист – выемочный комбайн (струг)»	«Выемочный комбайн (струг) - угольный пласт»	«Крепильщик – механизированная крепь»	«Механизированная крепь – горный массив»	«Звено ГРОЗ - очистной комплекс»	«Бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ»	«Угольная шахта-группа высоконагруженных лав»
Процесс управления	Управление выемочной машиной	Отделение угля от массива	Передвижка секций крепи (крепление)	Управление кровлей	Управление очистным комплексом	Управление звеном ГРОЗ	Добыча угля лавами
Объект управления	Выемочный комбайн (струг)	Угольный пласт	Механизированная крепь	Горный массив	Очистной комплекс	Звено ГРОЗ	Высоконагруженные лавы
Основные управляемые величины	Коэффициент готовности, скорость подачи, скорость резания, производительность выемочной машины	Количество горной массы, вынимаемая мощность пласта, зольность угля, выход классов крупности	Коэффициент готовности, время передвижки крепи (скорость крепления)	Устойчивость кровли, допустимая площадь обнажения пород кровли, шаг обрушения, высота вывалов	Коэффициент готовности, производительность комплекса, участвующая себестоимость угля, продвижение забоя	Коэффициент готовности ГРОЗ, производительность труда ГРОЗ, уровень травматизма	Коэффициент готовности лавы, нагрузка на лаву, уровень добычи шахты, себестоимость угля, уровень аварийности
Задающее воздействие	Скорость подачи, скорость перемещения машиниста, скорость резания	Скорость подачи, скорость резания, вынимаемая мощность пласта	Шаг передвижки секции, усилие передвижки	Шаг передвижки, начальный распор, рабочее сопротивление секции	Производительность комплекса, продвижение забоя	Производительность труда ГРОЗ, комплексная норма выработки	Нагрузка на лаву, уровень добычи шахты, себестоимость угля, нормы правил безопасности
Возмущающие воздействия	Горно-геологические условия (тектонические нарушения, размыв угольного пласта, включения, породные прослои, выделение газа), факторы аварийности (отказ выемочной машины), человеческий фактор (ошибочные действия машиниста, физическое нервное утомление)	Горно-геологические условия (тектонические нарушения, размыв угольного пласта, включения, породные прослои), факторы аварийности (отказ выемочной машины)	Горно-геологические условия (смена литологии пород непосредственной кровли, посадка основной кровли, ухудшение кровли, вывалы, обрушения), факторы аварийности (отказ крепи), человеческий фактор (ошибочные действия крепильщика, физическое нервное утомление)	Горно-геологические условия (смена литологии пород непосредственной кровли, посадка основной кровли, ухудшение кровли; заколы, трещиноватость и пр.), факторы аварийности (отказ крепи)	Горно-геологические условия (тектонические нарушения, размыв угольного пласта, включения, породные прослои, ухудшение кровли), факторы аварийности (отказ элементов комплекса), человеческий фактор (ошибочные действия рабочих, неритмичная работа, физическое нервное утомление)	Условия среды; производственные и природные факторы (запыленность, загазованность, шум, температура, влажность), человеческий фактор (ошибочные действия рабочих, неритмичная работа, физическое нервное утомление)	Аварии (эндогенные, экзогенные пожары, взрывы газа и пыли, газодинамические явления, загазованность выработок, затопление выработок, обрушения пород, аварии на поверхности), человеческий фактор (ошибки руководства, неверные решения)
Управляющее устройство	Машинист комбайна (струга)	Комбайн (струг)	Крепильщик	Механизированная крепь	Звено ГРОЗ	Бригадир (диспетчер)	Руководство шахты (директор, гл. инженер, начальники смен)
Измерительное устройство	Датчики диагностики состояния оборудования и узлов, контроллеры, контрольные приборы, сенсорные устройства	Датчики диагностики состояния горного массива (пласта)	Датчики диагностики состояния оборудования и узлов, контроллеры, контрольные приборы, сенсорные устройства	Датчики диагностики состояния горного массива	Датчики диагностики состояния оборудования и узлов, контрольные приборы, сенсорные устройства	Системы контроля, диагностики и мониторинга, человек (визуальные наблюдения, звуковая сигнализация)	Системы контроля, диагностики и мониторинга
Сравнительное устройство (чувствительный элемент)	Компьютеры (микропроцессоры), человек, средства сигнализации	Компьютеры (микропроцессоры)	Компьютеры (микропроцессоры), человек	Компьютеры (микропроцессоры)	Человек (коллектив людей)	Компьютеры (микропроцессоры), человек, алгоритмы и программное обеспечение поддержки принятия решений	Компьютеры (микропроцессоры), человек, автоматизированная система поддержки принятия решений

Продолжение Табл. 1

Усилительно-преобразовательное устройство	Панель управления	Механизмы передачи, шестерни	Блок управления секциями, пульты управления	Рычаги, гидродомкраты,	Панели, пульты управления	Каналы связи (передачи информации), дисплеи, терминалы	Каналы связи (передачи информации), дисплеи, терминалы, системы предупредительной сигнализации
Исполнительные устройства	Биомеханическая система человека	Исполнительный орган комбайна (струга)	Биомеханическая система человека	Стойки, верхняя, перекрытия, консоли	Биомеханическая система человека ГРОЗ, пульты и блоки управления элементами комплекса	Психофизическая система человека, каналы связи (передачи информации), пульт горного диспетчера	Каналы связи (передачи информации), системы противоаварийного контроля и предупреждения аварий
Управляющее воздействие (реализующий процесс)	Механическое движение человека	Механическое движение	Механическое движение человека	Механическое движение	Информация (команда, приказ, распоряжения). Процесс приема-передачи информации	Информация (команда, приказ, распоряжения, инструкции, предупреждающая информация). Процесс приема-передачи информации	Информация (команда, приказ, распоряжения, инструкции). Процесс приема-передачи информации

Классификация подсистем системы управления процессом добычи угля по основным признакам приведена в табл. 2.

Таблица 2 – Основные признаки подсистем системы управления процессом добычи угля

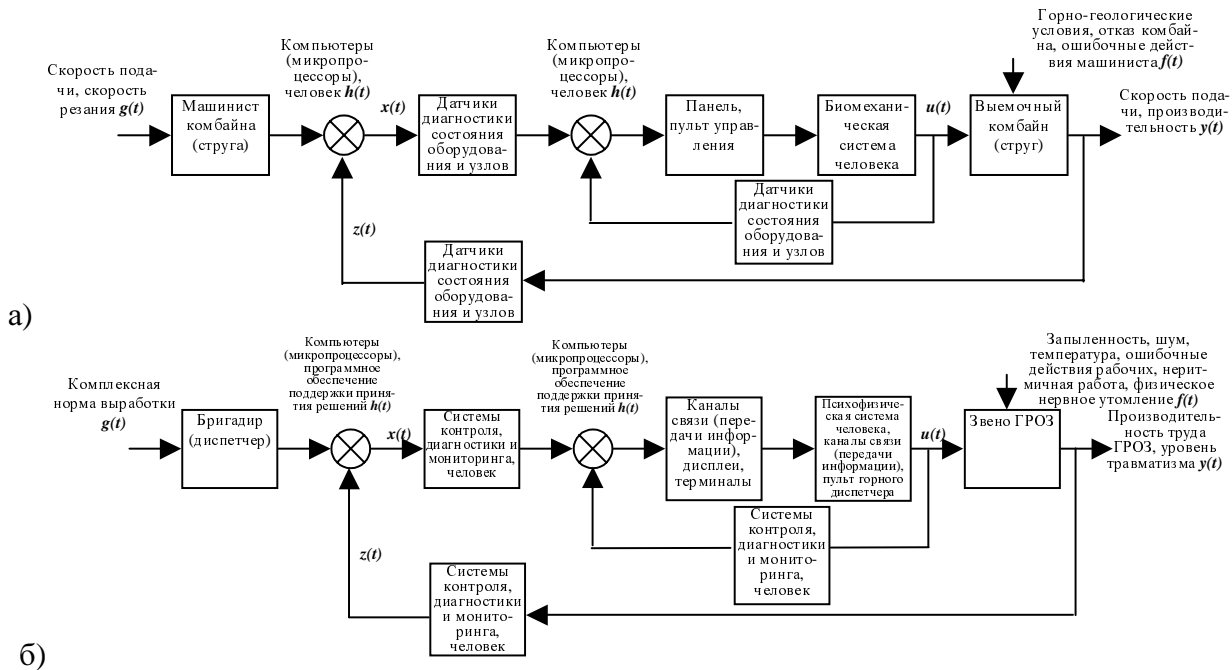
Признак	Подсистема						
	«Машинист – выемочный комбайн (струг)»	«Выемочный комбайн (струг) - угольный пласт»	«Крепильщик – механизированная крепь»	«Механизированная крепь – горный массив»	«Звено ГРОЗ - очистной комплекс»	«Бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ»	«Угольная шахта-группа высоконагруженных лав»
Наличие главной (местной) обратной связи	Замкнутая	Разомкнутая	Замкнутая	Разомкнутая	Замкнутая (местные обратные связи)	Замкнутая	Замкнутая
Главный принцип управления	По отклонению	Пропорциональное (по заданному воздействию)	По отклонению	Пропорциональное (по заданному воздействию)	По отклонению	Комбинированное (по отклонению, по внешним воздействиям)	Комбинированное (по отклонению, по внешним воздействиям)
Основные задачи управления	Стабилизация, программное управление, самонастройка	Программное управление, стабилизация	Стабилизация, программное управление	Программное управление, стабилизация	Стабилизация, программное управление	Слежение, программное управление	Экстремальное управление (поиск оптимального решения)
Преобладающий характер внутренних динамических процессов в звеньях системы	Непрерывного действия. Нелинейные, линейные с переменными параметрами, распределенными параметрами, с запаздыванием	Непрерывного действия. Линейные с переменными параметрами	Непрерывного действия. Нелинейные, линейные с переменными параметрами, распределенными параметрами, с запаздыванием	Непрерывного действия. Линейные с переменными параметрами	Непрерывного действия. Нелинейные, линейные с переменными параметрами, распределенными параметрами, с запаздыванием	Непрерывного действия. Существенно нелинейные	Непрерывного действия. Существенно нелинейные
Основная программа управления	Параметрическая (в текущих координатах)	Временная (во времени)	Параметрическая (в текущих координатах)	Временная (во времени)	Параметрическая (в текущих координатах)	Параметрическая (в текущих координатах)	Временная, параметрическая
Алгоритм управления	Линейный (пропорциональное)	Линейный (пропорциональное)	Линейный (пропорциональное)	Линейный (пропорциональное)	Линейный (пропорциональное)	Линейный (интегральное, по производным, изотропное).	Линейный (интегральное). Нелинейный (логический, оптимизирующий)

Анализ данных таблицы 2 показывает следующее: подсистемы «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт» и «механизованная крепь – горный массив» являются разомкнутыми, для них характерно отсутствие обратной связи, остальные подсистемы являются замкнутыми и их работа зависит от результата воздействия на управляемый объект. В целом для системы управления процессом добычи угля свойственно повсеместное присутствие обратных связей и характерна полная взаимозависимость работы всех звеньев друг от друга. Для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепыльщик – механизированная крепь» и «звено ГРОЗ - очистной комплекс» основным принципом управления является управление по отклонению, т.е. при управлении используется информация об управляемой величине и задающем воздействии. Для подсистем «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт» и «механизованная крепь – горный массив» характерен принцип управления по заданному воздействию («жесткое» управление), поскольку в них отсутствуют обратные связи. Для подсистем высокого уровня «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ» и «угольная шахта - группа высоконагруженных лав» характерно комбинированное управление на основе информации о возмущающих, задающих воздействиях и отклонениях управляемой величины. Основной задачей управления для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепыльщик – механизированная крепь» и «звено ГРОЗ - очистной комплекс» является поддержание постоянного значения управляемой величины (скорости подачи, резания, производительности комплекса) согласно установленным нормативам и выданным/полученным нарядам. Для подсистем «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт» и «механизованная крепь – горный массив» главной задачей является управление по заранее заданной программе (программное управление). Основной задачей управления для подсистемы «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ» является слежение, т.е. воспроизведение управляемой величиной задающего воздействия. Для подсистемы «угольная шахта - группа высоконагруженных лав» характерно экстремальное управление – поиск наиболее выгодного (оптимального) режима работы. Все рассматриваемые подсистемы являются непрерывными. Для подсистем «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт» и «механизованная крепь – горный массив» характерна временная основная программа управления (задаваемая по времени), для остальных подсистем – параметрическая (задаваемая в текущих координатах). Реализуемые на практике алгоритмы управления для большинства подсистем являются линейными – пропорциональными, лишь для подсистемы «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ» характерно линейное интегрально-дифференциальное и изодромное управление, а для подсистемы «угольная шахта - группа высоконагруженных лав» - нелинейное (логическое), оптимизирующее – наилучшее с учетом ограничений, накладываемых на величину управляющего воздействия.

В целом систему управления процессом добычи угля можно охарактеризовать как многомерную, замкнутую, с комбинированным принципом управления, с присутствием существенно нелинейных звеньев и подсистем, с нели-

нейным алгоритмом управления.

Функциональные схемы подсистем управления «машинист – выемочный комбайн (струг)» и «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ», построенные на основе анализа основных характеристики и классификации подсистем системы управления процессом добычи угля по основным признакам, представлены на рис. 2.



а) «машинист – выемочный комбайн (струг)»; б) «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ»
 Рис. 2 - Функциональные схемы подсистем управления процессом добычи угля

Обобщенная структурная схема, отражающая взаимодействия основных элементов-звеньев подсистем системы управления процессом добычи угля, основанная на анализе и синтезе основных характеристик и функциональных схем, представлена на рис. 3. На основе обобщенной структурной схемы определим передаточные функции основных подсистем и системы управления процессом добычи угля.

Общая передаточная функция подсистемы «машинист-выемочный комбайн (струг)», определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью (сигнал на выходе звена контура обратной связи вычитается из сигнала на входе звена машиниста выемочной машины):

$$W_{M-BK} = \frac{W_M W_{BM} W_{ПУ}}{1 - W_M W_{BM} W_{ПУ} W_{ДД}}, \quad (1)$$

где W_M , W_{BM} , $W_{ПУ}$, $W_{ДД}$ - передаточные функции соответственно машиниста, выемочной машины (комбайна/струга), пульта управления выемочной машиной и датчиков диагностики состояния оборудования и узлов выемочной ма-

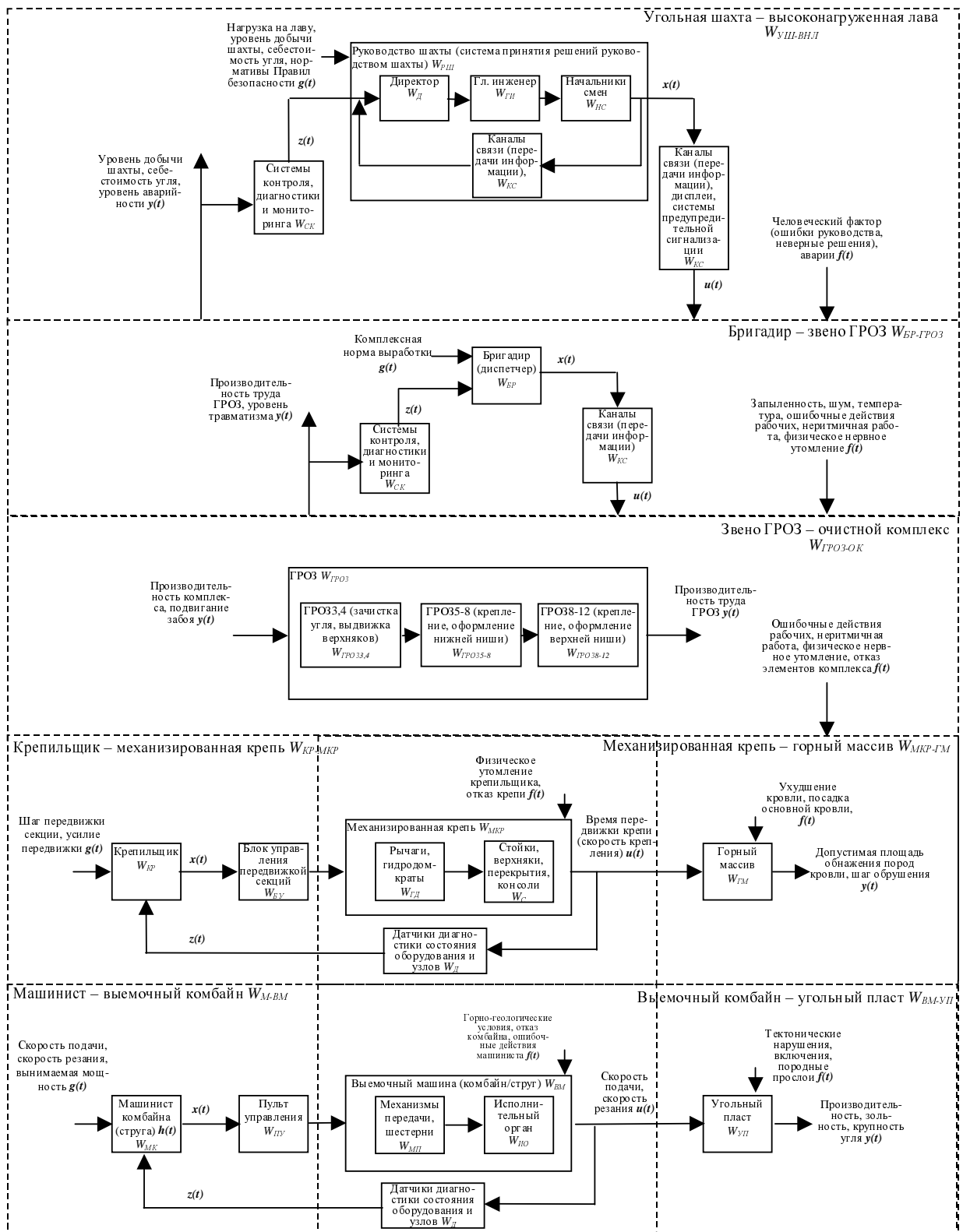


Рис. 3 - Обобщенная структурная схема взаимодействия основных элементов-звеньев подсистем системы управления процессом добычи угля

Передаточная функция выемочной машины, как системы, состоящей из

последовательно соединенных элементов, равна:

$$W_{BM} = W_{МП} W_{ИО}, \quad (2)$$

где $W_{МП}$, $W_{ИО}$ - передаточные функции соответственно механизма передачи и исполнительного органа.

Передаточная функция подсистемы «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт», как разомкнутой системы, равна:

$$W_{BM-ВП} = W_{BM} W_{ВП}, \quad (3)$$

где $W_{ВК}$, $W_{ВП}$ - передаточные функции соответственно выемочной машины и угольного пласта.

Подсистемы «крепильщик-механизированная крепь», определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью (сигнал на выходе звена контура обратной связи вычитается из сигнала на входе звена крепильщика):

$$W_{КР-МКР} = \frac{W_{КР} W_{МКР} W_{БУ}}{1 - W_{КР} W_{МКР} W_{БУ} W_{ДД}}, \quad (4)$$

где $W_{КР}$, $W_{МКР}$, $W_{БУ}$, $W_{ДД}$ - передаточные функции соответственно крепильщика, механизированной крепи, блока управления передвижкой секций и датчиков диагностики состояния оборудования и узлов крепи.

Передаточная функция механизированной крепи, как системы состоящей из последовательно соединенных элементов, равна:

$$W_{МКР} = W_{ГД} W_{П}, \quad (5)$$

где $W_{ГД}$, $W_{П}$ - передаточные функции соответственно гидродомкратов передвижки и стоек, верхняков, перекрытий.

Подсистемы «механизированная крепь - горный массив», как разомкнутой системы равна:

$$W_{МКР-ГМ} = W_{МКР} W_{ГМ}, \quad (6)$$

где $W_{МКР}$, $W_{ГМ}$ - передаточные функции соответственно механизированной крепи и горного массива.

Учитывая тот факт, что подсистемы «машинист-выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг)-угольный пласт» и «крепильщик-механизированная крепь», «механизированная крепь-горный массив» имеют общие элементы-звенья запишем передаточные функции подсистем «маши-

нист-выемочный комбайн (струг)-угольный пласт»:

$$W_{M-BK-УП} = \frac{W_M W_{МП} W_{ИО} W_{ПУ}}{1 - W_M W_{МП} W_{ИО} W_{ПУ} W_{ДД}} W_{УП}, \quad (7)$$

и «крепильщик-механизированная крепь-горный массив»:

$$W_{КР-МКР-ГМ} = \frac{W_{КР} W_{ГД} W_{П} W_{БУ}}{1 - W_{КР} W_{ГД} W_{П} W_{БУ} W_{ДД}} W_{ГМ}. \quad (8)$$

Подсистемы «звено ГРОЗ – очистной комплекс», как разомкнутой системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, имеющих местные обратные связи:

$$W_{ГРОЗ-ОК} = W_{M-BK-УП} W_{КР-МКР-ГМ} \prod_{i=1}^n W_{ГРОЗ_i}, \quad (9)$$

где $W_{ГРОЗ_i}$ - передаточные функции горнорабочих очистного забоя, занятых на зачистке угля, выдвигке верхняков, креплении и оформлении ниш; n - число горнорабочих комплексной бригады, занятых на зачистке угля, выдвигке верхняков, креплении и оформлении ниш.

Подсистемы «бригадир (диспетчер)-звено ГРОЗ», определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью (сигнал на выходе звена контура обратной связи вычитается из сигнала на входе звена бригадира(диспетчера):

$$W_{БР-ГРОЗ} = \frac{W_{ГРОЗ-ОК} W_{БР} W_{КС}}{1 - W_{ГРОЗ-ОК} W_{БР} W_{КС} W_{СК}}, \quad (10)$$

где $W_{БР}$, $W_{КС}$, $W_{СК}$ - передаточные функции соответственно бригадира (диспетчера), каналов связи (передачи информации от бригадира (диспетчера) к звену ГРОЗ) и системы контроля, диагностики и мониторинга параметров подсистемы «звено ГРОЗ – очистной комплекс».

Подсистемы «угольная шахта - группа высоконагруженных лав», определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью (сигнал на выходе звена контура обратной связи вычитается из сигнала на входе звена руководства шахты):

$$W_{УШ-ВНЛ} = \frac{\sum_{i=1}^q W_{ГРОЗ-БР_i} W_{РШ} W_{КС}}{1 - \sum_{i=1}^q W_{ГРОЗ-БР_i} W_{РШ} W_{КС} W_{СК}}, \quad (11)$$

где $W_{рш}$, $W_{кс}$, $W_{ск}$ - передаточные функции, соответственно, системы принятия решений руководством шахты, каналов связи (передачи информации от руководства шахты к бригадирам (диспетчерам) и системы контроля, диагностики и мониторинга параметров подсистем «бригадир(диспетчер) - звено ГРОЗ»; q - число высоконагруженных лав шахты (подсистем «бригадир(диспетчер) - звено ГРОЗ», функционирующих как параллельно соединенные звенья).

Передаточная функция системы принятия решений руководством шахты определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью (сигнал на выходе звена контура обратной связи вычитается из сигнала на входе звена директора шахты):

$$W_{рш} = \frac{W_{д} W_{ги} W_{нс}}{1 - W_{д} W_{ги} W_{нс} W_{кс}}, \quad (12)$$

где $W_{нс}$, $W_{ги}$, $W_{д}$, $W_{кс}$ - передаточные функции, соответственно, начальника смены; главного инженера, директора, каналов связи (передачи информации внутри системы принятия решений руководством шахты).

Общая передаточная функция системы управления процессом добычи угля будет определяться выражением (11) с учетом передаточных функций подсистем (1)-(10), (12).

Определим передаточные функции отдельных динамических элементов-звеньев подсистем системы управления процессом добычи угля.

Из-за сложности описания и принятия единой модели человека для различных условий его деятельности (необходимость учета процессов адаптации человека, ограниченность полосы пропускания, одноканальность, недостаточная точность работы, нестабильность коэффициента усиления, внесение помех, существенно нелинейное поведение в экстремальных условиях и т.п.) на практике зачастую используют упрощенные модели. Так, согласно [2] человек может быть представлен в виде линейной модели, состоящей из трех последовательно соединенных звеньев: усилительного звена с запаздыванием, осуществляющего прием сигналов, информации (передаточная функция $W_1 = k_1 e^{T_1 p}$), усилительного, осуществляющего формирование и принятие решений при достаточной тренировке, отсутствии возмущающих воздействий и минимальной психофизиологической напряженности человека (передаточная функция $W_2 = k_2$), и инерционного, отвечающего за исполнение человеком принятого решения (передаточная функция $W_3 = k_3 / (T_2 p + 1)$). Передаточная функция человека в данном случае имеет вид:

$$W(p) = W_1 W_2 W_3 = k_1 e^{T_1 p} \times k_2 \times \frac{k_3}{T_2 p + 1}, \quad (13)$$

где $k = k_1 k_2 k_3$ - коэффициент усиления человека; T_1 - время реакции человека; T_2 - постоянная времени, характеризующая инерцию в образовании исполнительного действия (психофизический параметр). Согласно [2,3] параметры могут быть приняты $T_1 = 0,2$ с, T_2 - примерно 0,125 с.

С приобретением опыта горнорабочий при принятии решения и формировании исполнительского действия (перемещении рукояток, рычагов, гидродомкратов, нажатии кнопок на пульте управления и пр.) учитывает не только величину, но и скорость изменения ошибки [4]. В модели (13) вместо пропорционального звена добавляется дифференцирующее, имеющее передаточную функцию:

$$W_2 = k_2 p. \quad (14)$$

При имеющихся место физических нагрузках, характерных для всех ГРОЗ (за исключением машиниста струга и его помощника при струговой выемке угля) добавляется четвертое звено – инерционное первого порядка, характеризующее нервно-мускульную систему человека (передаточная функция $W_4 = k_4 / (T_3 p + 1)$) [3]. Звенья, характеризующие инерцию в исполнении решения можно рассматривать как единое апериодическое звено второго порядка с передаточной функцией

$$W_3 = \frac{k_3 k_4}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (15)$$

где T_3 - постоянная времени, характеризующая инерцию в образовании исполнительного действия (биомеханический параметр). Согласно [3] параметр T_3 - имеет нижний предел примерно 0,1 с.

Таким образом, передаточная функция крепильщика, ГРОЗ, занятых на зачистке угля, креплении и оформлении ниш, будет определяться выражением (13) с учетом выражения (15). Машиниста комбайна – наиболее опытного горнорабочего выражением (13) с учетом (14) и (15). Машиниста струга – (13) с учетом (14).

Если человек является высококвалифицированным работником-интеллектуалом, то он учитывает как отклонение регулируемой величины, так и интеграл, скорость и ускорение ее изменения, т.е. выполняет функцию пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, а его передаточная функция имеет вид [5]:

$$W(p) = k \left(1 + \frac{1}{T_1 p} + T_2 p \right), \quad (16)$$

где k - коэффициент передачи; T_1, T_2 - постоянные времени, соответственно,

интегрирования (степень ввода интеграла в закон регулирования – время изодрома) и дифференцирования (время предварения регулятора).

Человек, дающий интегральную оценку параметрам системы управления, может быть представлен в виде пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, с передаточной функцией, определяемой выражением [6]:

$$W(p) = k \left(1 + \frac{1}{T_1 p} \right). \quad (17)$$

Передаточная функция бригадира-диспетчера, как высококвалифицированного опытного оператора-интеллектуала, будет определяться выражением (16), руководящего персонала шахты начальника смены, главного инженера и директора – выражением (17):

Каналы связи можно представить в виде звена с запаздыванием с передаточной функцией равной [7]:

$$W(p) = e^{-Tp}, \quad (18)$$

где T - время запаздывания.

Таким образом, передаточная функция каналов связи, передачи информации между подсистемами и внутри них будет определяться выражением (18).

К устройствам, имеющим инерционные свойства, можно отнести рычаги, гидродомкраты, стойки, верхняки, перекрытия механизированной крепи. Передаточная функция таких звеньев будет определяться выражением:

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp}. \quad (19)$$

К звеньям, для которых выходная величина в любой момент времени пропорциональна входной (безинерционным) следует отнести датчики, системы контроля диагностики и мониторинга, блоки и пульты управления, механизмы передачи, шестерни, исполнительный орган выемочной машины, а также угольный пласт и горный массив – как элементы технологии угледобычи. Передаточная функция для таких звеньев будет определяться выражением:

$$W(p) = k, \quad (20)$$

где k - коэффициент передачи звена.

Таким образом, передаточная функция системы управления процессом добычи угля задается выражениями (1)-(12) с учетом передаточных функций отдельных динамических звеньев (13)-(20).

Алгоритм моделирования и исследования качества функционирования системы управления процессом добычи угля заключается в последовательном

определении показателей быстродействия, точности и устойчивости подсистем: «машинист – выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг) – угольный пласт», «крепильщик – механизированная крепь», «механизированная крепь – горный массив», «звено ГРОЗ – очистной комплекс», «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ», «угольная шахта-группа высоконагруженных лав», задаваемых передаточными функциями (7)-(11).

Выводы.

1. Проведенный анализ основных характеристик элементов подсистем системы управления процессом добычи угля показал:

– основными процессами управления для подсистем являются: управление выемочной машиной, отделение угля от массива, процесс передвижки крепи, управление кровлей, управление очистным комплексом, управление звеном ГРОЗ, процесс добычи угля высоконагруженными лавами;

– в качестве измерительных устройств для подсистем нижнего уровня («машинист – выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт», «крепильщик – механизированная крепь», «механизированная крепь – горный массив») выступают датчики диагностики состояния оборудования и узлов, контрольные приборы, сенсорные устройства, для подсистем высокого уровня («звено ГРОЗ – очистной комплекс», «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ», «угольная шахта - группа высоконагруженных лав») - системы контроля, диагностики и мониторинга параметров технологических процессов добычи угля;

– усилительно-преобразовательными устройствами являются, для подсистем нижнего уровня – блоки и пульта управления, рычаги, гидродомкраты, для подсистем высокого уровня – каналы связи (передачи информации), процессами, реализующими управляющее воздействие – для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепильщик – механизированная крепь» - механические движения человека, для подсистем «выемочный комбайн (струг) – угольный пласт», «механизированная крепь – горный массив» - механическое движение элементов комплекса, для подсистем высокого уровня - процессы передачи-переработки информации.

2. Проведенная классификация подсистем управления процессом добычи угля по основным признакам показала:

– подсистемы «выемочный комбайн (струг)-угольный пласт» и «механизированная крепь – горный массив» являются разомкнутыми, прочие подсистемы являются замкнутыми и их работа зависит от результата воздействия на управляемый объект. Для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепильщик – механизированная крепь» и «звено ГРОЗ - очистной комплекс» основным принципом управления является управление по отклонению; для подсистем «выемочный комбайн (струг) - угольный пласт» и «механизированная крепь – горный массив» характерно «жесткое» управление - по заданному воздействию; для подсистем высокого уровня «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ» и «угольная шахта - группа высоконагруженных лав» характерно комбинированное управление на основе информации о возму-

щающих, задающих воздействиях и отклонениях управляемой величины;

– основной задачей управления для подсистем «машинист – выемочный комбайн (струг)», «крепильщик – механизированная крепь» и «звено ГРОЗ - очистной комплекс» является поддержание постоянного значения управляемой величины (скорости подачи, резания, производительности комплекса) в соответствии с установленным нормативам и выданными нарядами; для подсистем «выемочный комбайн (струг)-угольный пласт» и «механизированная крепь – горный массив» главной задачей является управление по заранее заданной программе (программное управление); основной задачей управления для подсистемы «бригадир (диспетчер) - звено ГРОЗ» является слежение, т.е. воспроизведение управляемой величиной задающего воздействия; для подсистемы «угольная шахта - группа высоконагруженных лав» характерно экстремальное управление – поиск наиболее выгодного (оптимального) режима работы;

– система управления процессом добычи угля в целом является многомерной, замкнутой, с комбинированным принципом управления, с присутствием существенно нелинейных звеньев и подсистем, с нелинейным алгоритмом управления.

3. Определены передаточные функции подсистем, основных динамических звеньев и системы управления в целом:

– передаточная функция подсистемы «угольная шахта - группа высоконагруженных лав», определяется как передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью с учетом передаточных функций системы принятия решений руководством шахты, каналов связи (передачи информации от руководства шахты к бригадирам (диспетчерам) и системы контроля, диагностики и мониторинга параметров подсистем «бригадир(диспетчер) - звено ГРОЗ», передаточных функций подсистем «бригадир(диспетчер) - звено ГРОЗ», функционирующих как параллельно соединенные звенья;

– передаточная функция крепильщика, ГРОЗ, занятых на зачистке угля, креплении и оформлении ниш, определяется производением передаточных функций усилительного звена с запаздыванием, усилительного и апериодического второго порядка; машиниста комбайна – наиболее опытного и квалифицированного горнорабочего, как производение передаточных функций усилительного звена с запаздыванием, реального дифференцирующего и апериодического второго порядка; машиниста струга – усилительного звена с запаздыванием, реального дифференцирующего и апериодического первого порядка;

– передаточная функция бригадира-диспетчера высококвалифицированного опытного оператора-интеллектуала, учитывающего как отклонение регулируемой величины, так его интеграл и ускорение, задается функцией пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора; руководящего персонала шахты начальника смены, главного инженера и директора – функцией пропорционально-интегрального регулятора;

– передаточная функция каналов связи, передачи информации в системе

управления процессом добычи угля будет определяться функцией звена с запаздыванием. Передаточная функция звеньев, имеющих инерционные свойства: рычагов и гидродомкратов, стоек, верхняков, перекрытий механизированной крепи будет определяться функцией апериодического звена первого порядка. К безинерционным звеньям следует отнести датчики, системы контроля диагностики и мониторинга, блоки и пульта управления, механизмы передачи, шестерни, исполнительный орган выемочной машины, угольный пласт, горный массив; передаточная функция таких звеньев является функцией пропорционального звена.

4. Алгоритм моделирования качества функционирования системы управления процессом выемки угля заключается в последовательном определении показателей быстродействия, точности и устойчивости подсистем: «машина – выемочный комбайн (струг)», «выемочный комбайн (струг) – угольный пласт», «крепильщик – механизированная крепь», «механизированная крепь – горный массив», «звено ГРОЗ – очистной комплекс», «бригадир (диспетчер) – звено ГРОЗ», «угольная шахта-группа высоконагруженных лав» с учетом их передаточных функций и передаточных функций отдельных динамических звеньев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.
2. Душков Б. А. Основы инженерной психологии / Душков Б. А., Ломов Б. Ф., Рубахин В. Ю.; под ред. Б.Ф. Ломова. – М.: Высш. школа, 1986. – 448 с.
3. Справочник проектировщика АСУ ТП / [Смилянский Г.Л., Амлинский Л.З., Баранов В.Я. и др.]; под ред. Г.Л. Смилянского. - М.: Машиностроение, 1983. – 527 с.
4. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования.— К.: Вища школа, 1975.— 423 с.
5. Ротач В.Я. К расчету оптимальных параметров ПИД регуляторов по экспертным критериям / В.Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. - № 11. - С. 5-9.
6. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов / [Гольдфарб Л.С., Балтрушевич А.В., Нетушил А.В. и др.]; под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высш. школа, 1976. - 400 с.
7. Теория автоматического управления: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / [Брюханов В.Н., Косов М.Г., Протопопов С.П. и др.]; под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Высш. школа, 2000. – 268 с.