

к.т.н. Шевченко В.Г.
(ІГТМ НАН України, г. Дніпропетровськ,
Україна, e-mail: vgshevchenko@ua.fm)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СХЕМЫ
НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ «РУКОВОДСТВО
ШАХТЫ – ДИСПЕТЧЕР – ЗВЕНО ГРОЗ» В АВАРИЯХ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ**

Визначено показники якості процесу регулювання в системі «керівництво шахти – диспетчер – ланка ГРОВ» при подачі на вход типових випадкових впливів. Здійснено вибір оптимальної схеми і параметрів нелінійного регулювання ланки ГРОВ в аварійній ситуації при впливі випадкових впливів-перешкод у комбайновій і струговій лавах.

Ключові слова: виймка вугілля, випадковий вплив, нелінійне регулювання, аварійна ситуація.

Определены показатели качества процесса регулирования в системе «руководство шахты – диспетчер – звено ГРОЗ» при подаче на вход типовых случайных воздействий. Осуществлен выбор оптимальной схемы и параметров нелинейного регулирования звена ГРОЗ в аварийной ситуации при воздействии случайных помех в комбайновой и струговой лавах.

Ключевые слова: выемка угля, случайное воздействие, нелинейное регулирование, аварийная ситуация.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Система управления процессом добычи угля в комбайновой и струговой лавах носит вероятностный характер и функционирует в условиях влияния случайных внутренних и внешних возмущений: горно-геологические условия (тектонические нарушения, размыв угольного пласта, включения, породные прослои, выделение газа и пр.), факторы аварийности (газодинамические явления, загазованность, затопление выработок, обрушения пород и пр.), человеческий фактор (ошибочные действия горнорабочих, физическое нервное утомление, ошибки руководства, неверные решения и пр.). Актуальной является проблема улучшения показателей качества системы управления процессом добычи угля, что требует совершенствования научно-прикладных методов, позволяющих учитывать влияние всего комплекса случайных воздействи-

вий в процессе добычи и выбирать наиболее оптимальную схему регулирования при возникновении аварийной ситуации.

Анализ исследований и публикаций. Исследованию систем управления процессом добычи угля, в том числе при предотвращении аварийных ситуаций с учетом надежности ее элементов, посвящены работы [1-3 и пр.]. Однако работы в данной области не раскрывают в полной мере вопроса исследования и оптимизации параметров нелинейного управления в системе «руководство шахты – бригадир (диспетчер) – звено горнорабочих (ГРОЗ)» при возникновении и развитии аварийных ситуаций с учетом влияния случайных возмущений-помех.

Постановка задачи. Определить оптимальные параметры и осуществить выбор наиболее рациональной схемы регулирования звена горнорабочих в аварийной ситуации при воздействии случайных возмущений.

Изложение материала и его результаты. На рисунке 1 представлена схема нелинейного регулирования звена горнорабочих в комбайновой/струговой лаве (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) пропорционально-интегрального (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов; $k_{MK}, k_{MC}, k_{GROZ_i}$ - коэффициенты усиления; $T_{1MK}, T_{1MC}, T_{1GROZ_i}$ - время реакции, с; $T_{2MK}, T_{2MC}, T_{2GROZ_i}$ - постоянные времени, характеризующие инерцию в образовании исполнительного действия, психофизический параметр, с, соответственно машиниста комбайна, машиниста струга, горнорабочего; T_{3MK}, T_{3MC} - постоянные времени, характеризующие инерцию в образовании исполнительного действия, биомеханический параметр, с, соответственно машиниста комбайна и горнорабочего).

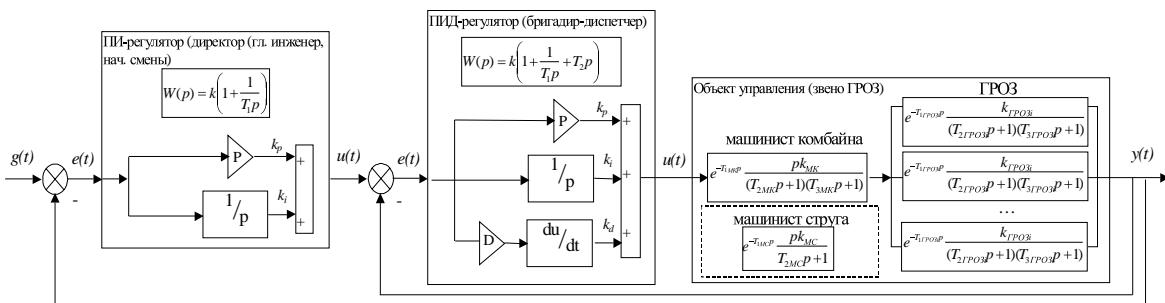


Рисунок 1 - Схема нелинейного управления работой звена горнорабочих в комбайновой/струговой лаве

Оптимальные параметры регуляторов по интегральному линейному критерию ($k/T_1 \rightarrow \max$) [4,5] при воздействии единичного скачка, имитирующего мгновенное возникновение и развитие нештатной (аварийной) ситуации, для средних значений параметров передаточных функций систем «машинист комбайна (струга) – звено ГРОЗ» ($k_{MK} = k_{MC} = k_{GROZ_i} = 1,3$; $T_{1MK} = T_{1MC} = T_{1GROZ_i} = 0,2$ с; $T_{2MK} = T_{2MC} = T_{2GROZ_i} = 0,125$ с; $T_{3MK} = T_{3GROZ_i} = 0,1$ с) (рисунок 1) [6-10], что соответствует средней быстроте реагирования на поступающую информацию, скорости ее переработке, принятия и реализации решений, которые определяются квалификацией, опытом, мотивированностью, физическим состоянием горнорабочих, составили для комбайновой лавы для ПИ–регулятора (руководства шахты) $k_p = 0,0653$, $k_i = 2,0415$, для ПИД–регулятора (бригадира-диспетчера) $k_p = 0,1098$, $k_i = 0,7902$, $k_d = 0,0284$; для струговой лавы $k_p = 0,7200$, $k_i = 1,4029$ и $k_p = 0,0810$, $k_i = 0,6451$, $k_d = 0,0128$, соответственно.

Передаточная функция системы «руководство шахты – бригадир (диспетчер) – звено ГРОЗ» для комбайновой лавы равна

$$W = \frac{77,55p^3 + 2983p^2 + 1,745e004p + 1,399e - 011}{p^6 + 36p^5 + 484p^4 + 4145p^3 + 1,793e004p^2 + 1,745e004p - 7,849e - 011}, \quad (1)$$

для струговой лавы

$$W = \frac{63,08p^3 + 625,3p^2 + 978,9p - 1,99e - 012}{p^5 + 26p^4 + 374,7p^3 + 1963p^2 + 978,9p - 1,154e - 012}. \quad (2)$$

Характеристические уравнения таких систем представляют собой полиномы шестой и пятой степени, соответственно (1), (2). Основные качественные характеристики систем представлены на рисунке 2.

Анализ данных показывает, что при установленных оптимальных параметрах регуляторов переходная функция полностью воссоздает единичный скачек, имитирующий возникновение и развитие аварийной ситуации; обе системы устойчивы, однако система для комбайновой лавы обладает большим запасом устойчивости, чем для струговой.

При подаче на вход случайного сигнала, подчиненного нормальному закону распределения (таким процессам подчинено большинство вероятностных характеристик, изменяющихся при добыче угля) с математическим ожиданием входной величины равным -0,0431 и среднеквадратическим отклонением (σ) равным 0,9435 (центрированный процесс), для выход-

ного сигнала мат. ожидание для комбайновой лавы равно $-0,0438$, для струговой равно $-0,0437$; σ выходного сигнала для комбайновой лавы равно $0,6932$, для струговой $0,5795$. При экспоненциальном законе распределения входящего сигнала (такой процесс имитирует отказы элементов комплекса, лав в целом, поступление заявок на ремонт оборудования, т.е. описывает наработку на отказ и восстановление элементов процесса добычи) с мат. ожиданием равным $0,9994$ и σ равным $0,9854$, для комбайновой лавы мат. ожидание выходного сигнала равно $0,9959$, для струговой $0,9954$, σ выходного сигнала для комбайновой лавы равно $0,7237$, для струговой $0,6030$. Результаты указывают, что σ выходной величины меньше чем у входной для обеих систем, система регулирования в струговой лаве обеспечивает меньшее среднеквадратическое отклонение, чем в комбайновой.

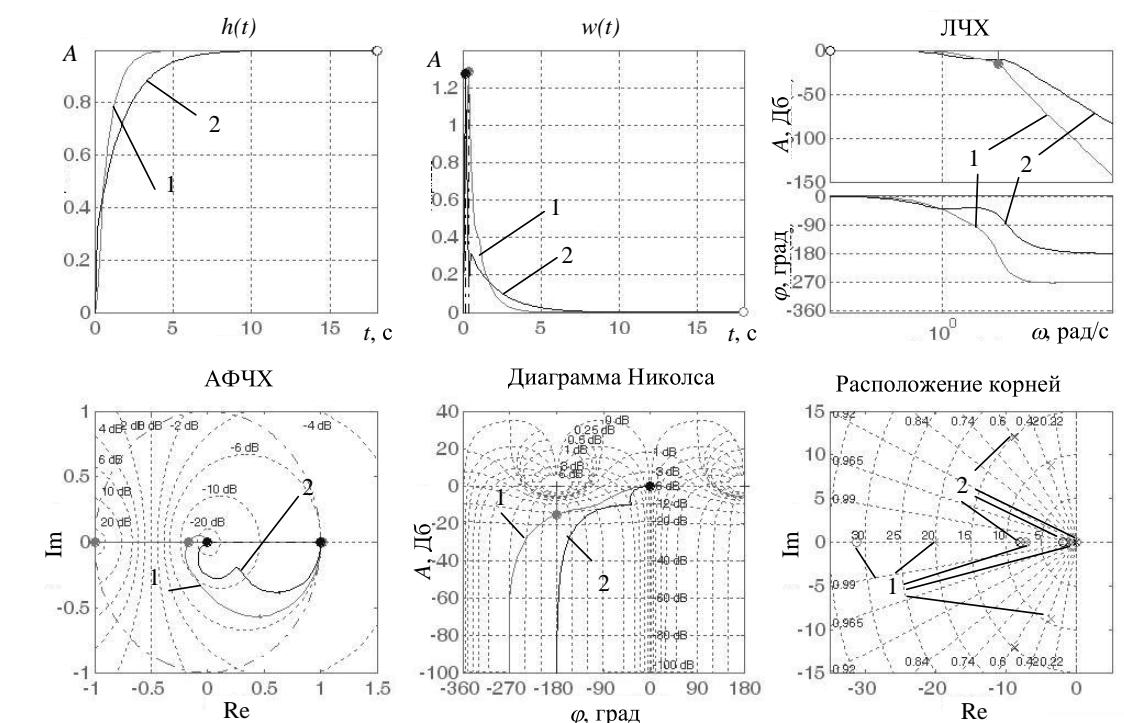


Рисунок 2 - Временные, частотные характеристики, расположение корней на комплексной плоскости систем регулирования звена ГРОЗ в комбайновой (1) и струговой (2) лавах

Графики корреляционных функций (r) и спектральных плотностей (S) входного, выходного сигналов и взаимной корреляционной функции представлены на рисунке 3. При нормальном законе распределения входного случайного сигнала корреляционные функции убывают практически мгновенно, что указывает на преобладание высоких частот в случайном процессе. При экспоненциальном законе спектр процессов состоит из единственного пика типа импульсной функции, расположенной в начале координат, следовательно, вся мощность процессов сосре-

доточена на нулевой частоте. Анализ данных указывает на несущественное различие в характере прохождения случайного сигнала через указанные системы. Системы регулирования с использованием каскадной схемы с двумя регуляторами делают процесс прохождения случайного сигнала инвариантным к применяемой технологии (комбайновая/струговая выемка).

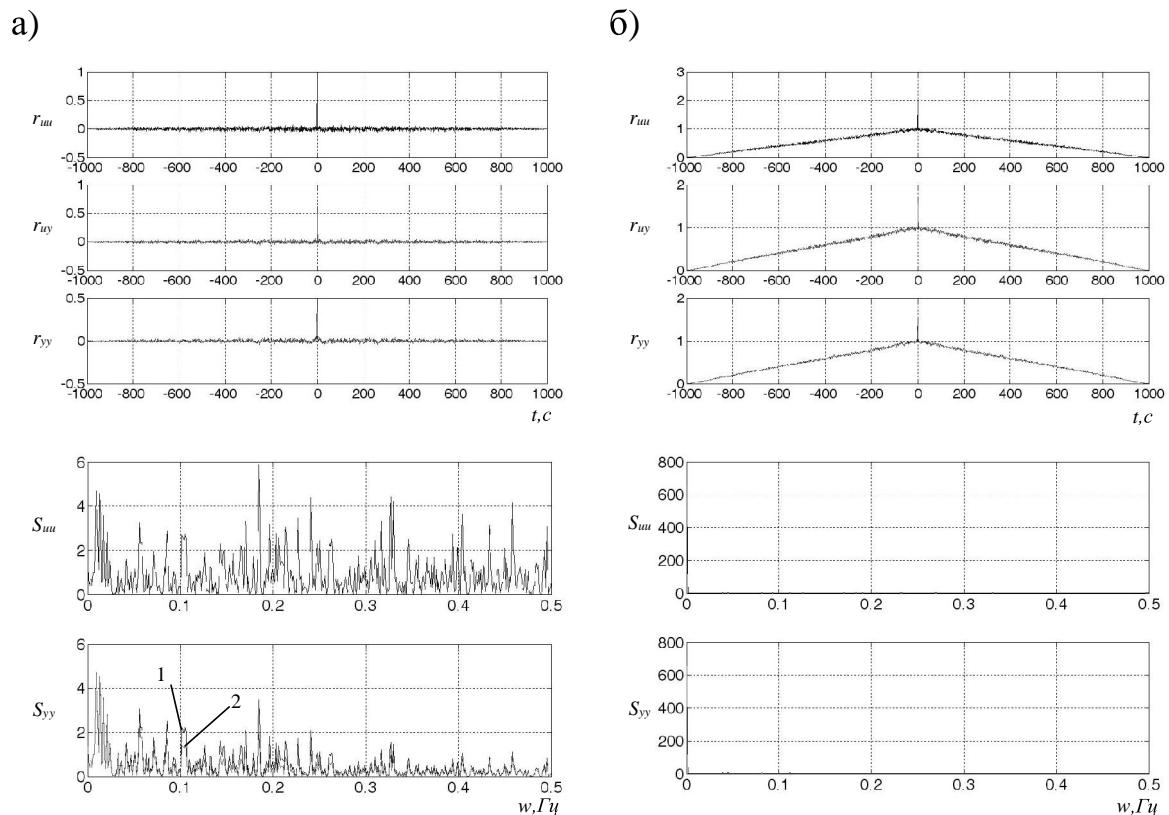


Рисунок 3 - Графики корреляционных функций и спектральных плотностей для комбайновой (1) и струговой лавы (2) при
а) нормальном и б) экспоненциальном законе
распределения входного сигнала

Влияние всех случайных возмущений-помех, действующих на систему, можно заменить одним эквивалентным возмущением, подведенным к выходу объекта. Воздействие случайной помехи, независимой от входного воздействия, принято имитировать сигналом типа «белый шум». Качество функционирования систем регулирования принято оценивать математическим ожиданием отклонения регулируемой величины и среднеквадратическим ее значением. Критерием качества является минимум среднеквадратического отклонения регулируемой величины $\sigma(y) = \min$. Поиск точки в пространстве параметров регулятора следует

начинать с точки, соответствующей минимуму линейного интегрально-го критерия (максимуму соотношения $k/T_1 = \max$) [4].

Типовыми схемами регулирования при воздействии случайных возмущений-помех являются: схема с информацией о модели объекта, подключенной параллельно объекту, с добавочной переменной состояния, с компенсацией возмущения (рисунок 4) [4].

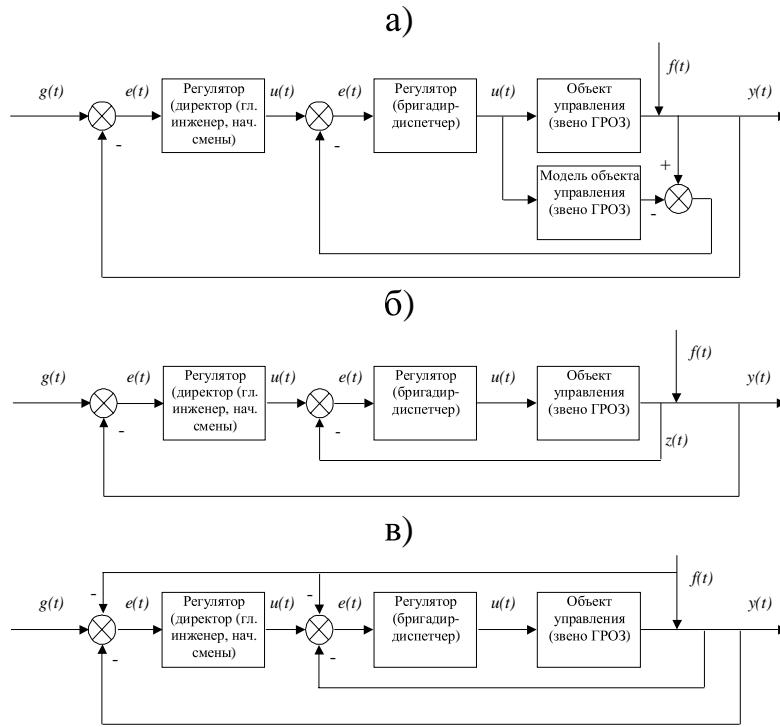


Рисунок 4 - Типовые схемы регулирования при воздействии случайных возмущений-помех а) с информацией о модели объекта; б) с добавочной переменной состояния; в) с компенсацией возмущения

Проведены исследования процесса регулирования звена ГРОЗ в комбайновой и струговой лавах при воздействии случайных помех. Со-вокупность помех, действующих на объект управления, имитировалась сигналом типа «белый шум» с ограниченной полосой пропускания, подведенным к выходу объекта. В процессе расчетов варьировались мощность N и время возникновения T помехи, определяющие ее среднеквадратическое отклонение $\sigma(f)$.

В таблице 1 приведены рассчитанные значения критерия опти-мальной настройки регуляторов $\sigma(y) = \min$ для типовых схем регулиро-вания в комбайновой и струговой лавах при различных значениях па-раметров помех.

Анализ данных свидетельствует, что схема с информацией о пе-ременной состояния обеспечивает наименьшее значение критерия $\sigma(y)$.

Таблица 1 – Значения критерия оптимальной настройки регуляторов для различных типовых схем при воздействии случайных помех

		Значения $\sigma(y)$ для схемы регулирования в комбайновой / струговой лавах		
		С моделью объекта	С переменной состояния	С компенсацией возмущения
Параметры помехи $N = 0,001; T = 1; \sigma(f) = 0,0346$				
Без помех	0,3855 / 0,3853	0,372 / 0,3431	0,34 / 0,3767	
С помехами	0,3189 / 0,3225	0,3573 / 0,3391	0,3082 / 0,3271	
Параметры помехи $N = 0,1; T = 1; \sigma(f) = 0,3464$				
Без помех	0,3815 / 0,3936	0,3313 / 0,2925	0,398 / 0,3746	
С помехами	0,713 / 0,5333	0,473 / 0,4985	0,9024 / 1,1089	
Параметры помехи $N = 0,1; T = 0,1; \sigma(f) = 1,0412$				
Без помех	0,3815 / 0,3906	0,3665 / 0,3814	0,3727 / 0,3033	
С помехами	2,5978 / 1,1879	1,1939 / 1,1743	4,3393 / 1,3960	
Параметры помехи $N = 1; T = 0,1; \sigma(f) = 3,2927$				
Без помех	0,4519 / 0,4021	0,3645 / 0,3334	0,3819 / 0,3467	
С помехами	6,8620 / 8,9853	3,6561 / 4,5275	7,6966 / 21,6336	

Если при минимальном значении $\sigma(f) = 0,0346$ критерий $\sigma(y)$ мало отличается для рассматриваемых схем, то при возрастании $\sigma(f)$ до 3,2927 такая схема обеспечивает значение $\sigma(y)$ в 2-4 раза меньше, чем схемы с информацией о модели объекта и с компенсацией возмущения.

Для комбайновой лавы для схемы с информацией о переменной состояния после регулирования, к примеру, при максимальном значении $\sigma(f)$ оптимальные параметры составили $k_p = 0,0653$, $k_i = 2,0415$ для ПИ-регулятора и $k_p = 0,1098$, $k_i = 0,7902$, $k_d = 0,0284$ для ПИД-регулятора. Т.е. они не существенно отличаются от установленных изначальных оптимальных параметров. Таким образом, наименьшее значение $\sigma(y)$ обеспечивается за счет структуры такой схемы.

Практическая реализация такой схемы комбинированного управления потребует получения информации о переменной состояния - реальном параметре (параметрах) системы до воздействия помех, что потребует передачи оперативной информации о состоянии забоя, горнорабочих, получаемой за минимально короткие интервалы времени. В качестве такой переменной может выступать время формирования и реализации решения ГРОЗ в обычных условиях, характерные для штатного режима работы, полученное в результате тестирования ГРОЗ [6-9].

В случае же требуемого большего снижения $\sigma(y)$ либо обеспечения полной инвариантности к помехам необходимо дальнейшее совершенствование схемы регулирования и более точная ее настройка с применением, например, нечетких регуляторов с использованием информации качественного характера, которая трудно поддается формализации [11].

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Определены передаточные функции систем «руководство шахты – бригадир (диспетчер) – звено ГРОЗ» в комбайновой и струговой лавах; характеристические уравнения таких систем представляют собой полиномы шестой и пятой степени, соответственно. Анализ качественных характеристик систем показал: при установленных оптимальных параметрах регуляторов переходная функция воссоздает единичный скачек, имитирующий возникновение и развитие аварийной ситуации; обе системы устойчивы, однако система для комбайновой лавы обладает несколько большим запасом устойчивости, чем для струговой лавы.

2. При случайном сигнале на входе системы, подчиненном нормальному и экспоненциальному закону, среднеквадратическое отклонение выходной величины меньше чем у входной, система регулирования в струговой лаве обеспечивает меньшее среднеквадратическое отклонение, чем в комбайновой. Корреляционные функции убывают практически мгновенно, что указывает на преобладание высоких частот в случайном процессе. При экспоненциальном законе случайного сигнала спектр процессов состоит из единственного пика типа импульсной функции, расположенной в начале координат, а вся мощность процессов сосредоточена на нулевой частоте. Системы нелинейного регулирования с использованием каскадной схемы с двумя последовательными ПИ- и ПИД-регуляторами делают процесс прохождения случайного сигнала инвариантным к применяемой технологии.

3. Расчет параметров типовых схем регулирования при воздействии случайных возмущений-помех показал: наименьшее значение среднеквадратического отклонения выходной величины $\sigma(y)$ наблюда-

ется для схемы с использованием информации о переменной состояния, как для комбайновой, так и струговой лавы. При существенном среднеквадратическом отклонении помехи такая схема обеспечивает в 2-4 раза меньшее значение критерия $\sigma(y)$, чем схемы с информацией о модели объекта и с компенсацией возмущений.

4. При возникновении аварийной ситуации и воздействии случайных помех при существенном среднеквадратическом отклонении помехи целесообразно использовать схему с информацией о переменной состояния. В качестве такой переменной может выступать время формирования и реализации решения ГРОЗ в обычных условиях, характерные для штатного режима работы, полученное в результате тестирования. Для обеспечения полной инвариантности к помехам необходимо дальнейшее совершенствование схемы регулирования и более точная ее настройка с применением нечетких регуляторов с использованием информации качественного характера.

Библиографический список

1. Сургай М.С. Надійність функціонування вугільних шахт / Сургай М.С. – Дніпропетровськ, 1998. - 192 с.
2. Информационные технологии – основа стратегии развития безопасной угледобычи / [Е.Д. Дубов, П.Е. Мухин, В.П. Коптиков и др.] // Уголь Украины. – 2001. – № 1. С. 30-33.
3. Кононенко Н.А. Методология предупреждения аварий при работе в экстремальных условиях / Н.А. Кононенко // Уголь Украины. – 1997. - № 12. – С. 37.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учеб. для вузов / В.Я. Ротач– М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
5. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.
6. Ломов Б.Ф. Человек и техника / Б.Ф. Ломов– М.: Сов. радио, 1966. - 464 с.
7. Душков Б. А. Основы инженерной психологии / Б.А. Душков, Б.Ф. Ломов, В.Ю. Рубахин; под ред. Б.Ф. Ломова. – М.: Высш. школа, 1986. – 448 с.
8. Приснякова Л.М. Нестационарная психология / Л.М. Приснякова – К.: Дніпро, 2002. – 255 с.
9. Приснякова Л.М. Системный синтез психофизических процессов: монография / Л.М. Приснякова– Днепропетровск-Киев, 2008. – 357 с.

10. Шевченко В.Г. К моделированию качества управления процессом добычи угля в лавах / В.Г. Шевченко // Геотехническая механика. – 2008. - Вып. 77. – С. 227-241.

11. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин - Тюмень: Тюменский государственный университет, 2000. - 352 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Фрумкиным Р.А.