

Проектирование закона управления системой регулирования подачи топлива парового котла с учетом требований экономии энергоресурсов при управлении.

Журавлев А.А., Шит М.Л., Попонова О.Б., Шит Б.М.

Control law design for the fuel consumption system of steam drum boiler taking into consideration the economy of energy resources.

The cascade control system is examined. Main features of the system are the PI-controller in the external control loop with introducing the functional component of the error signal of the external control loop with the negative feedback of the error signal between the prescribed value of steam flowrate and the signal of the steam flowrate in the exit of the boiler in the internal control loop.

Proiectarea legii de dirijare a sistemului de alimentare cu combustibil al cazanului de abur din contul cerințelor economisirii resurselor energetice în procesul de dirijare.

Este examinat sistemul de tip cascad cu PI-regulator în conturul extern cu introducerea componentei funcționale a semnalului de eroare între conturul extern și bucla negativă a semnalului de eroare între sarcina de debit a aburului și semnalul debitului de abur la ieșire din cazan în conturul intern.

Проектирование закона управления системой регулирования подачи топлива парового котла с учетом требований экономии энергоресурсов при управлении.

Рассмотрена каскадная система с ПИ-регулятором во внешнем контуре, с введением функциональной составляющей сигнала рассогласования внешнего контура и отрицательной обратной связью по сигналу рассогласования между заданием по расходу пара и сигналом расхода пара на выходе котла во внутреннем контуре.

1.Объект исследования.

Автоматические системы регулирования топлива предназначены для обеспечения потребителя требуемым количеством пара заданного качества (давления). Нарушение теплового баланса котла происходит за счет внутренних и внешних возмущений. К внутренним относятся возмущения, связанные с самопроизвольными изменениями характеристик топлива (теплоты сгорания) и его расхода, связанных с колебаниями давления газа, изменением характеристик регулирующей трубопроводной арматуры (гистерезис, «залипание» штока регулирующего клапана, люфты). К внешним возмущениям относятся возмущения, связанные с количеством потребляемого пара. В этом случае паропроизводительность котла не будет соответствовать количеству потребляемого пара. Показателем этого несоответствия является изменение давления пара в какой-либо точке парового тракта. Таким образом, САУ (система автоматического регулирования) топлива должна выполнять две функции: компенсировать внутренние и внешние возмущения с помощью одного управляющего воздействия – расхода топлива.

Структурная схема котла как объекта управления давлением пара в паровой магистрали имеет следующий вид (рис.1).

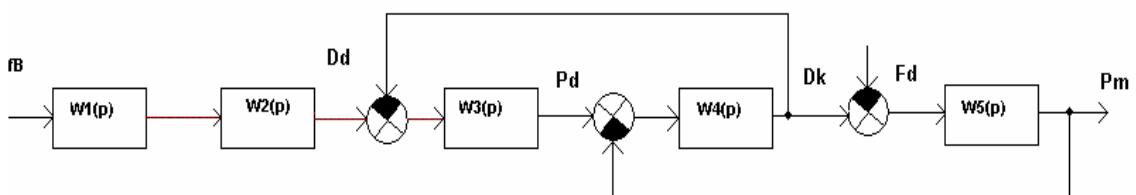


Рис.1.

На этом рисунке f_b – расход газа; D_k – расход потребляемого пара; f_D – изменение нагрузки потребителя (потребляемого пара); D_d – количество генерируемого пара; $W_1(p)$ – передаточная функция, характеризующая инерционность топки; $W_2(p)$ – передаточная функция, характеризующая количество генерируемого пара с тепловосприятием топки; P_d – давление в барабане котла; P_m – давление в паровой магистрали (все переменные рассматриваются в приращениях относительно номинального (установившегося) режима).

Передаточная функция $W1(p)$ характеризует инерционность топки. Она имеет вид инерционного звена с запаздыванием.

$$W1(p) = \frac{e^{-p\tau} k1}{T1p + 1}; \quad (1)$$

Значение запаздывания, принятого при моделировании составляет 10с., а постоянная времени топки – 15 с, что соответствует литературным данным об инерционности топок газомазутных котлов.

Звено с передаточной функцией $W2(p)$ характеризует количество генерируемого пара в зависимости от тепловосприятия топки. Это звено имеет вид инерционного звена первого порядка.

Звено с передаточной функцией $W3(p)$ характеризует аккумуляцию тепла в котле, связанную с изменением давления [13].

$$W3(p) = \frac{1}{T3p}; \quad (2)$$

Падение давления в пароперегревателе и на участке от пароперегревателя до стопорного клапана турбины выражено в виде передаточной функции $W4(p) = k4$.

Участок «давление в магистрали – расход топлива» описывается передаточной функцией следующего вида:

$$W5(p) = \frac{k5}{T5p + 1}; \quad (3)$$

Согласно [13] САР топлива должна обеспечить:

устойчивую работу системы (отсутствие автоколебаний) и ограниченную частоту включения регулирующего органа, которая при постоянной нагрузке не должна превышать шести включений в минуту;

поддержание в регулирующем режиме работы котла давления пара перед турбиной или в главной паровой магистрали с отклонением не более $\pm 2\%$ номинального;

поддержание в базовом режиме работы котла расхода пара с отклонением не более $\pm 3\%$ заданного.

2. Критерий качества работы подсистемы расхода топлива.

Критерий оптимизации.

Статическая оптимизация. Для подавляющего большинства случаев статическая оптимизация процесса горения может быть выражена следующей целевой функцией:

$$J_1 = \sum_{j=1}^n Q_{ni} \rightarrow \min, \quad (4)$$

и ограничениями

$$\theta_L \leq \theta \leq \theta_H; \alpha > \alpha_{\min}; \sum \frac{c_j}{c_{jperm}} \leq 1, \quad (5)$$

где Q_{ni} – тепловые потери (потери, вследствие механического Q_M и химического Q_H недожога топлива и потери, связанные с уходящими дымовыми газами Q_{FG}), сопровождающие любой процесс горения, θ_L, θ_H – соответственно нижнее и верхнее значения температуры горения, которые определяются требованиями, предъявляемыми к нормальному процессу горения с целью избежать эндотермических реакций, связанных с поглощением тепла; α_{\min} – минимальное значение коэффициента расхода воздуха, ниже которого осуществить горение невозможно ($\alpha_{\min} < 1$); c_j, c_{jperm} – концентрация и допустимая концентрация j -ой вредной компоненты в дымовых газах, соответственно. Будем называть (4) критерием тепловых потерь.

Динамическая по расходу топлива оптимизация процессов горения реализует критерий

$$J = \int |F_G(t)| dt \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничении

$$|F_G(t)| \leq M, \quad (7)$$

Для управления режимом работы котла необходимо согласовать, так называемую «тепловую нагрузку», представляющую собой отношение теплоты, затраченной на нагрев пароводяной смеси, скорость изменения давления пара в паропроводе и расход пара в паропроводе. Тепловая нагрузка котла характеризует тепловосприятие испарительных поверхностей котла в единицу времени, кг/с. Классической схемой регулирования тепловой нагрузки и давления пара в магистрали котла является схема, при которой стабилизируется давление в паровой магистрали и тепловая нагрузка котла приводится в соответствие с расходом пара на турбину.

3. Построение структурной схемы подсистемы.

Обычно, система регулирования строится по каскадной схеме со стабилизирующим (внутренним) и корректирующим (внешним) регуляторами. В каскадных САР контур стабилизации предназначен для подавления внутренних возмущений, путем воздействия на задание стабилизирующего регулятора. Корректирующий регулятор предназначен для подавления внешних возмущений путем воздействия на задание стабилизирующего регулятора. В этом случае в САР топлива осуществляется принцип регулирования по нагрузке. Классическим решением для управления подсистемой расхода топлива для газомазутных котлов является каскадная система, в которой расход топлива задается в соответствии с требуемым расходом пара и корректируется по давлению пара в барабане в паровой магистрали для котлов работающих на общую паровую магистраль и по давлению пара перед турбиной в блочных станциях [14]. Аналогичные решения применяются и за рубежом. Так, фирма Vambeck systems inc. (США) предлагает для оптимизации горения следующее решение: так называемый, “Fuel controller” задает положение регулирующего клапана расхода топлива, в зависимости от заданного расхода топлива. В системе управления имеется “Plantmaster controller”, который получает информацию о давлении пара в общем паропроводе и посылает сигнал на “Boilermaster controller”, который стоит на каждом котле. Входной сигнал этого контроллера поступает на “Fuel controller” в качестве сигнала задания по нагрузке котла. Этот сигнал, является входом для ПИ-регулятора в “Fuel controller”. “Plantmaster controller” имеет ПИД – блок управления, который использует давление пара в качестве управляемой величины. В

данной работе не рассматривается подсистема расхода воздуха. Эта подсистема является предметом отдельного анализа.

Рассмотрим структурную схему системы, где внутренний контур системы представляет собой САР стабилизации расхода газа, а наружный – осуществляет задание по расходу пара с коррекцией по производной от давления пара. Эта схема регулирования работы котла в так называемом регулирующем режиме. На схеме введены следующие обозначения: W_{p1} – передаточная функция внешнего (корректирующего) регулятора; W_p – передаточная функция внутреннего регулятора; W_{tr} – передаточная функция участка трубопровода от регулирующей заслонки до сужающего устройства; W_{p0} – передаточная функция регулирующей заслонки с электроприводом; W_{uy} – передаточная функция измерительного узла (сужающее устройство – датчик расхода топлива).

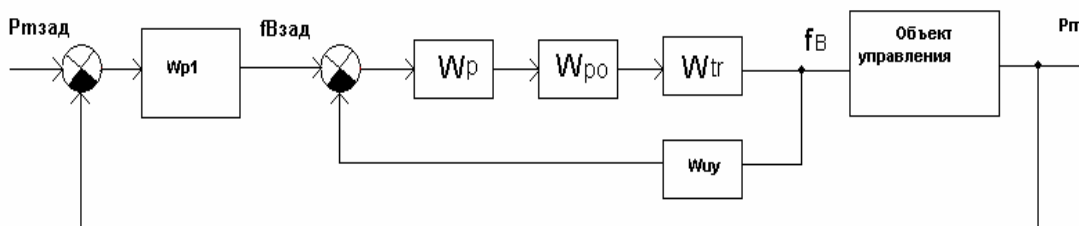


Рис.2.

Участок трубопровода от регулирующей заслонки до сужающего устройства описывается передаточной функцией звена первого порядка. (Исходные данные: длина трубопровода и его диаметр взяты для ТЭЦ-1 г. Кишинева).

$$\frac{F_{out}(p)}{F_{in}(p)} = W_{tr}(p) = \frac{e^{-p\tau_1}}{T_F p + 1}, \quad T_F = \frac{2900\eta L_f^2}{P d_f^2}; \quad \tau_1 = \frac{\pi d_f^2 L_f}{4F_g}; [14] \quad (11)$$

Для Кишиневской ТЭЦ-1 - $L_f = 25\text{ м}; d_f = 0,2\text{ м}; F_g = 1\text{ м}^3/\text{ с}$. Для рассматриваемого случая значение величины запаздывания не более одной секунды при условии, что значение величины постоянной времени объекта управления находится в диапазоне 130-160с. В связи с этим, влиянием этого запаздывания можно пренебречь.

Качество работы всех систем сравнивалось по следующим показателям:

- расход газа за время переходного процесса;
- установившееся значение расхода газа после окончания переходного процесса;
- статическая ошибка контура по показателю «расход пара»;
- избытки пара за время переходного процесса;
- путь, пройденный регулирующим органом за время переходного процесса.

Предварительно определялось качество работы внутреннего контура по таким показателям как точность и количество включений привода регулирующей заслонки при ступенчатом задании расхода газа.

В качестве базового был принят дискретный ПИ- регулятор во внутреннем контуре системы [18] и стандартный ПИ-регулятор в наружном контуре системы. При разработке закона управления в каскадной системе с запаздыванием были использованы идеи, предложенные в работах [19,20]. В работе [19] получен оптимальный по точности изодромный закон управления объектом первого порядка, который имеет вид:

$$u(t) = K_1 e(t) + K_2 \mu(t) + \int_{-\tau}^0 K_3(t) u(t+s) ds, \quad (12)$$

где первые две составляющие выражения (1.12) представляют собой соответственно пропорциональную и интегральную составляющие сигнала управления, а $\int_{-\tau}^0 K_3(t) u(t+s) ds$, соответственно функциональная составляющая, обусловленная запаздыванием. В качестве критерия оптимальности принят интегральный квадратичный критерий

$$J(u) = \int_0^{\infty} [q_1 e^2(t) + q_2 \mu^2(t) + u^2(t)] dt \quad (13)$$

где q_1, q_2 – коэффициенты штрафа. Практическая реализация оптимального по точности алгоритма при использовании трех запаздывающих сигналов выразится следующим образом:

$$u(t) = K_1 e(t) + K_2 \mu(t) + D_1 u(t) + D_2 u(t - \tau/3) + D_3 u(t - 2\tau/3) + D_4 u(t - \tau) \quad (14)$$

Значения коэффициентов для рассматриваемого случая, поскольку объект управления представляет собой звено, как минимум четвертого порядка (см. рис.1, рис.2) весьма сложны для вычисления, поэтому для определения их оптимальных значений был использован метод поиска значений с использованием полного факторного эксперимента с элементами перебора вариантов и отсеивания неудачных вариантов. Для повышения точности работы в систему была введена отрицательная обратная связь, по разности сигналов задания расхода пара на турбину для данного котла и расхода пара после котла. Сигнал этой обратной связи подается на вход внутреннего контура.

4. Исследование работы систем управления при детерминированных возмущениях.

Рассмотрим работу каскадной системы при возмущении расходом пара равном 3,6 т/час для различных законов управления контуром подачи топлива (рис.3).

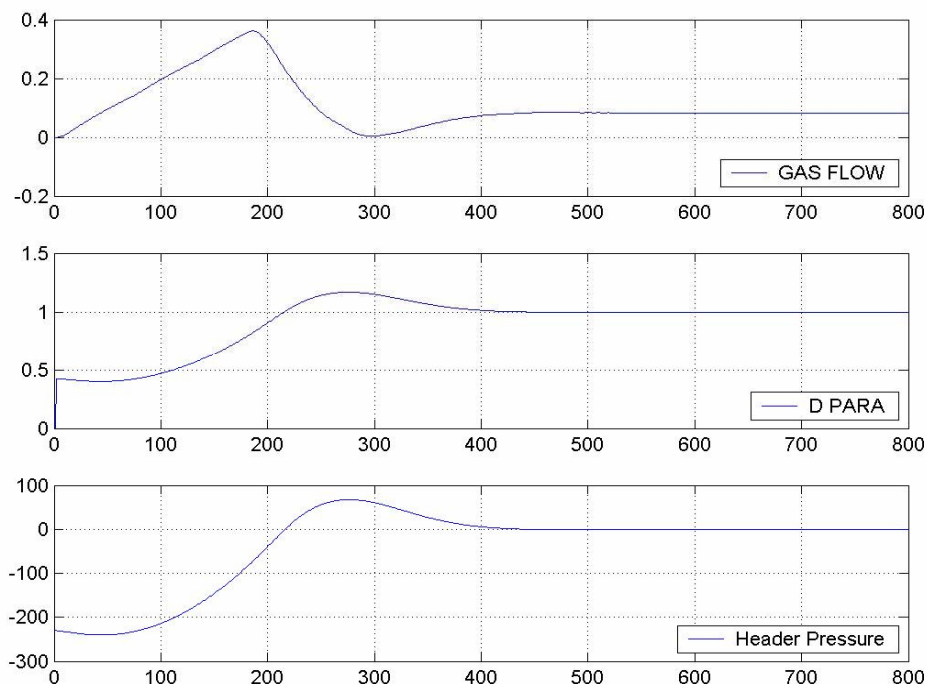


Рис.3

На этом рисунке верхний график – это кривая изменения расхода газа, второй сверху график иллюстрирует расход пара, а нижний график иллюстрирует изменение давления в паровой магистрали. Переходный процесс расхода пара в зависимости от времени имеет перерегулирование приблизительно 15%, время переходного процесса 360 с, остальные показатели работы системы приведены в таблице. Время дискретизации составляет 0,85 с. и выбрано из условия, чтобы оно было, как минимум, в 10 раз меньше наименьшей постоянной времени того инерционного звена в системе, которое имеет наименьшую постоянную времени. В исследуемой системе наименьшая постоянная времени составляет 20 с. Этой величиной является постоянная времени инерционного звена, включенного в обратную связь нелинейного элемента регулятора (рис.2). Величина скачка расхода пара составляет 3,6 т/ч. Это значение величины расхода пара выбрано исходя из наблюдений за реальными изменениями задания по пару на ТЭЦ-1.

Рассмотрим работу «классического регулятора» при учете введения обратной связи по расходу пара и оптимизирующего контура при исходных настройках. Структурная схема регулятора приведена на рис.4.

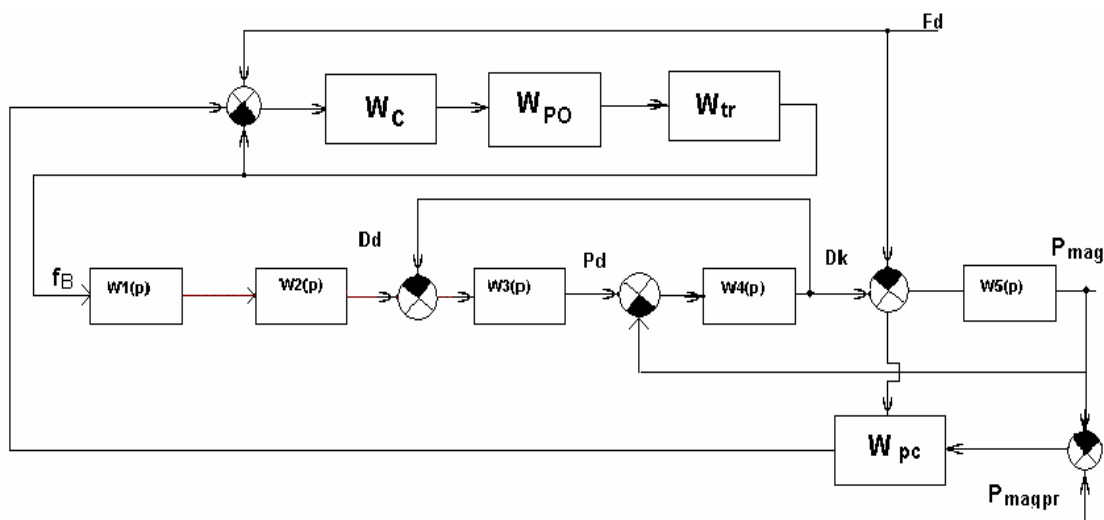


Рис.4.

Как видно из рис.3 вид переходных процессов не отличается переходных процессов при работе классического регулятора. Время переходного процесса не превышает 13,4 минут. Перерегулирование по давлению не превышает 50 кПа. Процесс заканчивается за одно колебание. Экономия расхода газа E составляет благодаря применению этого закона величину:

$$E = (0,826 - 0,770) \text{ м}^3 / \text{с} * 3600 \text{ с} * 24 = 4838,4 \text{ м}^3 / \text{сутки}.$$

Здесь числа в скобках - средние значения установившегося расхода газа у «классического» и рассматриваемого в этом разделе закона регулирования. Экономия газа за один переходный процесс (Θ) составляет:

$$\Theta = 86,8933 - 77,5601 = 9,3332 \text{ м}^3.$$

При снижении задания относительно установившегося режима коэффициент при сигнале по расходу газа должен изменить знак. При этом значение величины расхода газа, установившегося по окончании переходного процесса практически не отличается от того, какое имеет место при работе классического регулятора. В принципе, достаточно применить переменную структуру регулятора, когда при перемене знака возмущения по нагрузке используется классический регулятор, однако, это может оказаться нецелесообразным из-за того, что полный ход регулирующего органа при работе нового регулятора на 9-10% меньше, чем у классического. Таким образом, применение нового регулятора позволит снизить износ регулирующей трубопроводной арматуры.

Заключение

Проведен синтез и анализ законов управления системой регулирования подачи топлива газомазутного парового котла с учетом требований экономии энергоресурсов при управлении. Принят критерий качества управления в виде минимума интеграла от расхода газа при переходе от одного режима нагрузки к другому. В качестве базы для сравнения использована каскадная система управления с внутренним контуром стабилизации расхода газа на дискретном ПИ-регуляторе и внешнем контуре на базе ПИ-регулятора. Данный регулятор широко используется на газомазутных паровых котлах.

Предложена и исследована система с ПИ-регулятором во внешнем контуре с добавлением функциональной составляющей сигнала рассогласования внешнего контура и с переключением коэффициента сигнала интегральной составляющей в зависимости от уменьшения или увеличения нагрузки и отрицательной обратной связью по сигналу рассогласования между заданием по расходу пара и сигналом расхода пара на выходе котла.

Отличительной особенностью новой системы является наличие нового математического обеспечения, заключающегося в обеспечении минимизации заданного критерия качества.

Система исследовалась при детерминированных и случайных возмущениях. Система показала устойчивую работу. Точность поддержания давления в магистральном паропроводе находится в пределах ± 15 кПа (при допустимой величине ± 600 кПа). Точность выдачи заданного количества пара - не ниже 2%. Указанные величины значительно лучше нормативных показателей.

При использовании разработанного регулятора в системе подачи топлива газомазутного барабанного котла экономия топлива составляет 8-10% на каждый переходный процесс. При этом снижение износа регулирующей трубопроводной арматуры составляет 2-8%.

Список использованных источников.

1. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982.-311с.
2. Astrom K.D., R.D. Bell "Drum-boiler dynamics". Automatica, 36(2000) 363-378.
3. Шумская Л.С. Изменение уровня в барабанных котлах при нестационарных режимах. Теплоэнергетика, №6, 1954, с.35-39.
4. Шумская Л.С. Номограммы для определения постоянных времени по давлению и уровню в барабанных котлах при нестационарных режимах. «Автоматическое регулирование и управление энергетических установок». Труды ЦКТИ, вып.147, Л. 1977, с.45-69.
5. Шумская Л.С. О влиянии циркуляции жидкости и пара на изменение давления и уровня в барабанном котле при нестационарном режиме. Автоматическое регулирование. Под общ. Ред. А.Л.Канаева. Труды ЦКТИ, книга 19, вып.2. 1951 г., с.95-122.
6. Сенькин В.И., Поборчий В.С. Анализ уравнений динамики барабанного парового котла с естественной циркуляцией. Автоматическое регулирование. Труды ЦКТИ., книга 36. Машгиз, М.-Л., 1960, с.11-46.
7. Руцинский В.М. Математическая модель барабанного котлоагрегата. Труды ЦНИИКА, выпуск 16. Энергия, М., 1967, с.32-64.
8. Хутский Г.И. Приспосабливающиеся системы автоматического управления для тепловых электрических станций. Наука и Техника», Минск, 1968, 184 с .
9. Пивень В.Д., Богданов В.К., Ганжерли Э.И., Заманский А.М. Автоматизация энергетических блоков. Энергия, М.-Л., 1965.351 с.
10. Александрова Н.Д., Давыдов Н.И. Динамическая модель циркуляционного контура барабанного котла. Теплоэнергетика, №2, 1993, с.14-18.
11. Бабенко Ю.А. и др. Передаточные функции барабанных парогенераторов ТП-170 и ТП-220 как объектов регулирования уровня. Известия ВУЗов «Энергетика», №7, 1973, с.74-77.
12. Model-Free Adaptive Control of Steam Drum Level, <http://www.cybosoft.com/cybozap2.pdf>

13. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 280с.
14. Ключев А.С., Товарнов А.Т. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. М., Энергия, 1970, 270с.
15. Наплатаров К.Х. Оптимизация управления процессами горения в промышленных установках. Автоматика и телемеханика, №1, 2000 г., с.177-186.
16. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968.
17. Наплатаров К.Х. Экономия энергии при управлении технологическими процессами. София, 1984.
18. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие/ А.С. Ключев и др. Под ред. А.С.Ключева.- 2 изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.- 368с.
19. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Мазуров В.М., Саломыков В.И. Аналитический синтез законов оптимального управления химико-технологическими процессами с запаздыванием. Доклады Академии Наук СССР, 1981. Том 260, №3, с.687...690.
20. В.П. Мешалкин, Мазуров В.М., Чумаков А.В. Анализ эффективности оптимального по точности алгоритма управления химико-технологическими процессами с запаздыванием. Приборы и системы управления, 1993, №11, с.22...25.
21. Ротач В.Я., Фьонг Н.З. К расчету каскадных систем автоматического регулирования. Теплоэнергетика, №10, 1999, с.10-16.
22. Мань Н.В. Оптимальный синтез робастной каскадной системы автоматического управления. Теплоэнергетика, №9, 2000, с.22-28.
23. Ротач В.Я. Расчет каскадных систем автоматического регулирования. Теплоэнергетика, №10, 1997, с.16-23.

Журавлев А.А., к.т.н, заведующий лабораторией микропроцессорных систем управления Института энергетики АНМ, область научных интересов: применение современных методов разработки и исследования микропроцессорных систем управления технологических процессов, автоматизированный учет и распределение энергоресурсов, автор 72 научных публикаций, в том числе двух монографий и 10 авторских свидетельств.
e-mail: ieasm@cc.acad.md.

Шит М.Л. – к.т.н, ведущий научный сотрудник лаборатории микропроцессорных систем управления Института энергетики АНМ, область научных интересов: синтез систем управления по критерию экономии энергоресурсов, системы управления в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве, системы управления мобильными объектами, автор 45 научных публикаций и 15 авторских свидетельств., e-mail: ieasm@cc.acad.md.

Попонова О.М. - научный сотрудник лаборатории микропроцессорных систем управления Института энергетики АНМ, область научных интересов: автоматизация технологических процессов, преобразовательная техника. Автор 20 научных публикаций и 1 авторского свидетельства, e-mail: ieasm@cc.acad.md

Шит Б.М. – программист лаборатории микропроцессорных систем управления Института энергетики АНМ, соискатель Института Проблем Управления (ИПУ РАН, г. Москва), область научных интересов: проектирование систем управления в экономических и технических системах, сетевое программирование, автор 9 научных публикаций, e-mail: ieasm@cc.acad.md,

