

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧЬЮ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ВЫСОКООКТАНОВЫХ БЕНЗИНОВ

Запропоновано математичну модель трубчатої печі установки каталітичного риформінгу бензинів та на її підставі розроблено цифрову систему управління піччю. Ця система управління синтезує оптимальне адаптивне управління піччю в умовах впливу різних зовнішніх збуджень. Наведено результати тестового дослідження запропонованої цифрової системи управління.

Предложена математическая модель трубчатой печи установки каталитического риформинга бензинов и на ее основе разработана цифровая система управления печью, синтезирующая оптимальное адаптивное управление печью в условиях воздействия различных внешних возмущений. Приведены результаты тестового исследования цифровой системы управления.

A mathematical model of a tubular furnace installation of catalytic reforming of gasoline and, at its base, is developed digital control system oven. Digital control system synthesizes the optimal adaptive control of the furnace under the influence of external excitations. The results of a test study of digital control systems are presented.

Качественные показатели процесса каталитического риформинга высокооктановых бензинов в значительной степени зависят от точности регулирования температуры движущейся газопродуктовой смеси на выходах трубчатых печей многостадийной установки в переходных и установившихся режимах. При этом к системе управления первой печью установки предъявляются повышенные требования, поскольку на вход этой печи прикладываются такие возмущения, как изменения температуры, расхода и химического состава поступающего продукта. Воздействие этих возмущений сказывается на точности регулирования температуры продукта на выходе первой печи и, соответственно, в последующих аппаратах. Кроме того, калорийность топливного газа и мазута, используемых для нагрева продукта, достаточно часто изменяются по случайному закону.

При изменении калорийности топлива требуется изменять ограничения на его расход и перестраивать коэффициенты системы управления. Поэтому для управления первой печью установки каталитического риформинга бензинов целесообразно использовать оптимальную систему, инвариантную к возмущающим возмущениям и обладающую свойствами адаптации параметров регулятора (устройства управления) при изменении калорийности топлива и химического состава поступающего продукта. Высокая степень стабилизации температуры движущегося продукта на выходе первой печи позволяет использовать простые системы аналогового регулирования по выходу на второй и третьей печках установки.

Процесс передачи тепла от теплоносителя к движущемуся продукту можно описать системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial T(t, z)}{\partial t} = -v \frac{\partial T(t, z)}{\partial z} - \frac{1}{\tau} [T_{CT}(t) - T(t, z)] \\ \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_1} [T_T(t) - T_{CT}(t)] - \frac{1}{\tau_2} [T_{CT}(t) - T(t, z)], \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{\pi D_B h_B}{S_{CT} \rho_{CT} C_{CT}}; \quad \frac{1}{\tau_2} = \frac{\pi D h}{S_{CT} \rho_{CT} C_{CT}}; \quad \frac{1}{\tau} = \frac{\pi D h}{S \rho C};$$

$$T(t, 0) = T_{BX}; \quad T(t, z_k) = T_b,$$

$$T(0, z) = T_T^H + (T_{BX} - T_T^H) \cdot e^{-\frac{z_k}{v(1+\tau_1/\tau_2)}}, \quad (2)$$

где $T(t, z)$ – температура движущегося продукта в сечении аппарата с координатой z в момент времени t ; v – скорость движения продукта (или теплоносителя); $T_{CT}(t)$ – температура стенки труб печи; $T_T(t)$ – температура в камере теплоносителя; D_B, D – соответственно, внешний и внутренний диаметры труб печи; h_B, h – коэффициенты теплоотдачи соответственно от теплоносителя к материалу труб и от материала труб к движущемуся продукту; S_{CT}, S – площади поперечных сечений труб печи и потока движущегося продукта; ρ_{CT}, ρ – плотности материала труб печи и движущегося продукта; T_{BX} – температура продукта на входе печи; T_b – заданная температура продукта на выходе печи; T_T^H – температура в камере теплоносителя в начальный момент времени; z_k – длина труб печи.

Расход $G_T(t)$ (управляющее воздействие) связан с температурой в камере теплоносителя $T_T(t)$ следующим соотношением:

$$G_T(t) = a_0 + a_1 T_T(t). \quad (3)$$

На расход топлива наложены ограничения по уровню:

$$G_T^H[\Theta(t)] \leq G(t) \leq G_T^H[\Theta(t)], \quad (4)$$

которые зависят от калорийности топлива $\Theta(t)$, изменяющейся во времени.

Цель управления трубчатой печью – минимизация суммарного (за период переходного процесса) квадратичного отклонения температуры движущегося продукта на выходе аппарата от заданной температуры, являющейся функцией времени.

Рассмотрим задачу синтеза цифровой системы управления (ЦСУ) классом теплообменных процессов с распределенными параметрами, описываемыми уравнениями (1)

– (4). Цифровая система управления синтезируется как оптимальная, в смысле рассмотренной ранее цели управления, а также инвариантной по отношению к действующим на объект возмущениям и изменениям технологических параметров процесса с учетом изменяющихся во времени ограничений по уровню на управляющее воздействие (4).

Введя замены

$$\lambda = \frac{h\pi D t}{\rho C_p S};$$

$$l = \frac{h\kappa D z}{\rho C_p S v};$$

$$T_T(t) = T_{CT}(t); \quad (5)$$

$$\begin{cases} X(l, \lambda) = [T(l, \lambda) - T_k(l)] / (T_T^k - T_{BX}), \\ U(\lambda) = [T_T(\lambda) - T_T^k] / (T_T^k - T_{BX}), \end{cases} \quad (6)$$

представим выражения (1) – (3) в виде

$$\frac{\partial X(l, \lambda)}{\partial \lambda} = -\frac{\partial X(l, \lambda)}{\partial l} + U(\lambda) - X(l, \lambda);$$

$$X(l, 0) = U(0) [1 - e^{-l}];$$

$$X(0, \lambda) = 0, \quad (7)$$

где $T_T^k = (T_b - T_{BX} C) / (1 - C)$; $C = e^{-\frac{z_k}{v(1+\tau_1/\tau_2)}}$ – конечное установившееся значение температуры в камере теплоносителя,

$T_k(l) = T_T^k + (T_{BX} - T_T^k) e^{-\frac{z_k}{v(1+\tau_1/\tau_2)}}$ – температурный профиль движущейся жидкости для конечного установившегося состояния. Вводя разностную сетку

$$\varpi_{\Delta\lambda, \Delta l} = \left. \begin{cases} \lambda_m = m\Delta\lambda; \\ m = \overline{0, M}; \\ \Delta\lambda = \lambda_k / M; \\ l_n = n\Delta l; \\ n = \overline{0, N}; \\ \Delta l = l_k / N \end{cases} \right\},$$

аппроксимируем систему уравнений (7) явной условно устойчивой конечно разностной схемой [1]. В результате этого получим систему разностных уравнений вида

$$\mathbf{X}(m+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(m) + \mathbf{B}\mathbf{U}(m),$$

где $\mathbf{X}(m) = [X_1(m) \dots X_N(m)]^T$ (здесь и далее в аналогичных случаях T – знак транспонирования),

$$\mathbf{X}(0) = [1 - e^{-\Delta t} \quad 1 - e^{-2\Delta t} \quad \dots \quad 1 - e^{-N\Delta t}] \times \mathbf{U}(0);$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ c & a & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & c & a & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c & a \end{bmatrix};$$

$$a = 1 - \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta t}\right) - \Delta\lambda;$$

$$c = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t}; \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = [\Delta\lambda, \Delta\lambda, \dots, \Delta\lambda]^T.$$

Синтез системы управления. Введем критерий минимума суммарного квадратичного отклонения (за время переходного процесса) в конечном числе точек наблюдения, равномерно распределенных по длине аппарата (печи):

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{1}{2} \Delta t \Delta\lambda \sum_{m=0}^{m_{k_i}-1} \left[\mathbf{X}_i^T(m) \mathbf{S} \mathbf{X}_i(m) + \mathbf{R}_i \mathbf{U}_i^2(m) \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I m_{k_i} = m_k,$$

где I – количество временных интервалов, в каждом из которых ограничения (4) можно считать постоянными во времени;

\mathbf{S} – положительно определенная матрица размерности $N \times N$; m_k – конечная пространственная точка движения системы.

В [2] показано, что использование критерия вида (9) не противоречит сформулированной выше задаче управления. Для решения сформулированной задачи используем метод, основанный на применении вычислительной процедуры принципа максимума Понтрягина. Решение в этом случае имеет вид

$$U_i(m) = -\mathbf{K}_i(m) \mathbf{X}_i(m); \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{K}_i(m) &= \frac{\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-T}}{\Delta t \Delta\lambda R_i} [\mathbf{E}_i(m) - \Delta t \Delta\lambda \mathbf{S}]; \\ \mathbf{E}_i(m) &= \Delta t \Delta\lambda \mathbf{S} + \mathbf{A}^T \mathbf{E}(m+1) \times \\ &\times \left[\mathbf{I} + \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}^T}{\Delta t \Delta\lambda R_i} \mathbf{E}_i(m+1) \right]^{-1} \mathbf{A}; \\ \mathbf{E}(m_k) &= \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_i &= \begin{cases} R_H^i, & R_H^i < R_B^i; \\ R_B^i, & R_H^i \geq R_B^i; \end{cases} \\ R_H^i &= \mathbf{K}_i(m) \frac{\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-T} [\mathbf{E}_i(m) - \Delta t \Delta\lambda \mathbf{S}] \mathbf{X}_B}{\Delta t \Delta\lambda (U_B^i - U_H^i | \varepsilon_H^i + U_H^i)}; \\ R_B^i &= \mathbf{K}_i(m) \frac{\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-T} [\mathbf{E}_i(m) - \Delta t \Delta\lambda \mathbf{S}] \mathbf{X}_B}{\Delta t \Delta\lambda (U_B^i - U_H^i | \varepsilon_B^i + U_B^i)}, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где $\boldsymbol{\omega}$ – непустая матрица.

Учитывая замены (5), оптимальную управляющую последовательность (10) представим в исходных величинах:

$$T_T^*(m) = T_T^k - \sum_{j=0}^N K_i^j(m) [T(m, z_i) - T_k(z_i)], \quad (13)$$

где

$$T_k(z_i) = \frac{T_b - CT_{BX}}{1 - C} + \left(T_{BX} - \frac{T_b - T_{BX} C}{1 - C} \right) e^{-\frac{z_k}{\tau v(1+\tau_1/\tau_2)}};$$

K_i^j ($j = 0, \dots, N$); ($i = 1, \dots, I$) – коэффициенты цифрового регулятора.

Для достижения инвариантности оптимальной системы управления к изменению скорости движения продукта предлагается функция компаундирования

$$\Delta T_T(v) = \frac{(T_{BX} - T_T^k)}{1 - e^{-\frac{z_k}{\tau v^*}}} \left(e^{-\frac{z_k}{\tau v(m)}} - e^{-\frac{z_k}{\tau v^*}} \right), \quad (14)$$

где $\Delta T_T(v)$ – приращение температуры теплоносителя, необходимое для компенсации влияния от изменения его скорости на выходе аппарата; $v(m)$ – мгновенное измеряемое значение скорости жидкости; v^* – заданное значение скорости движения продукта.

При реализации закона регулирования по отклонению (13) совместно с законом регулирования по возмущению (14) с учетом (4) получим комбинированную систему, вырабатывающую суммарный сигнал управления

$$T_T(t) = T_T^*(m) + \Delta T_T(v) = T_T^k - \sum_{i=1}^N K_i(m) \times [T(z_i, m) - T_k(z_i)] + \frac{(T_{BX} - T_T^k)(C - C_S)}{1 - C_S}, \quad (15)$$

где C_S – значение коэффициента, вычисленное для поперечного сечения аппарата.

Аппаратурная реализация. Оптимальное управляющее устройство, описываемое

соотношениями (4) и (15), совместно с объектом образуют основной контур управления. Кроме основного контура, система управления содержит контур адаптации параметров оптимального дискретного регулятора. Этот контур состоит из блока синтеза оптимального цифрового регулятора $K_i(m)$ (соотношения (11)) и блока расчета параметра штрафа на управление R_i (соотношения (12)).

Структурная схема системы цифрового управления трубчатой печью представлена на рис.1. Для предложенной структурной схемы все блоки устройства управления (регулятора) реализованы программно в ПЭВМ

(соотношения (4), (5), (10) – (12), (15)).

При прохождении сырья через печь измеряются его расход датчиком 2 (измерение расхода выполняется для определения скорости движения продукта) и температура на входе T_{BX} , в средней точке T_{CP} и на выходе T_k датчиками соответственно 3, 4, 5. Требуемая температура продукта на выходе печи задается датчиком 6.

Сохранена и традиционная схема аналогового регулирования объектом, состоящая из датчика измерения температуры дымовых газов 1 на перевале печи ($T_{пер}$), пневматических блоков 7, 8, 9, исполнительного механизма (ИМ) и клапана 10. Эта система позволяет устанавливать $T_{пер}$, которая однозначно определяет $T_T(t)$.

Система оптимального адаптивного управления, описываемая соотношениями (4), (5), (10) – (12), (15), как было отмечено выше, программно реализована на ПЭВМ. С ее выхода сигнал $T_T(t) = T_T^* + \Delta T_T(v)$ подается в качестве задания на сумматор ПФ1.1 системы аналогового регулирования.

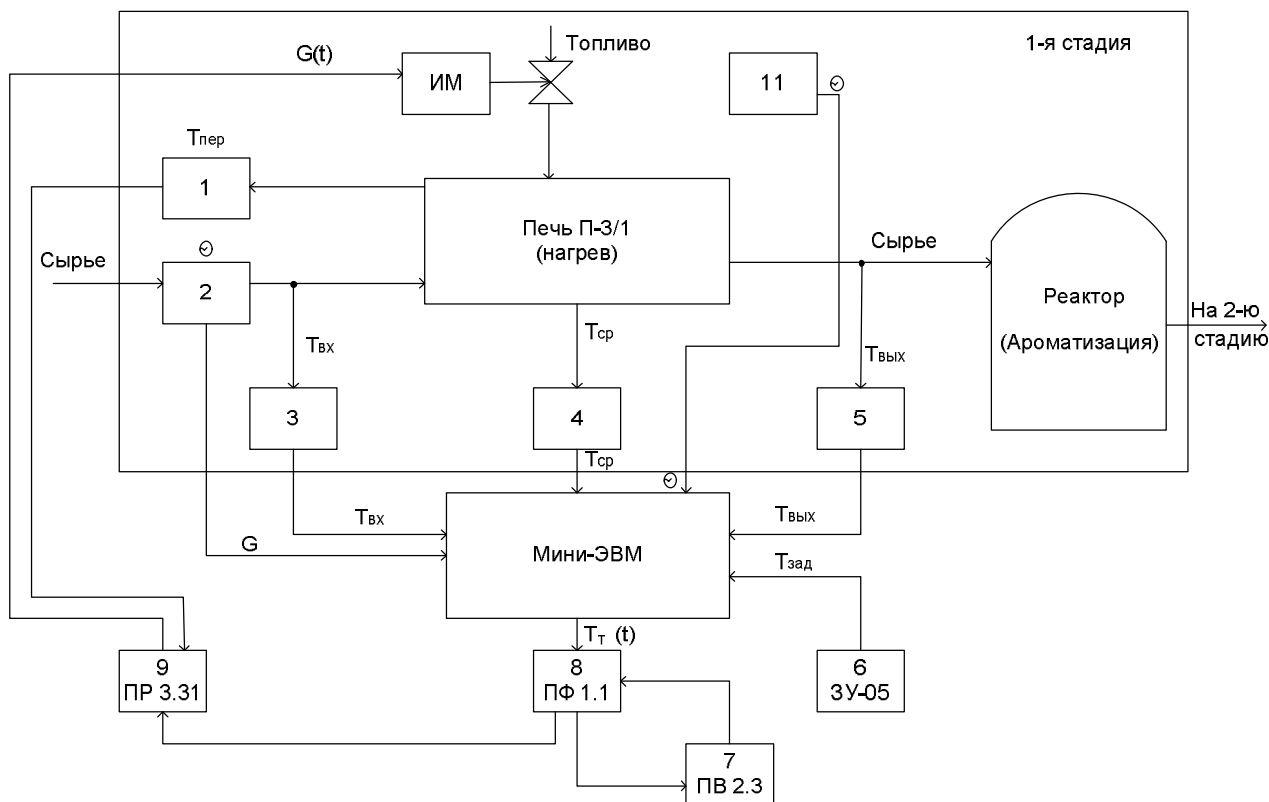


Рис.1. Структурная схема ЦСУ трубчатой печью установки каталитического риформинга бензинов

Измерение калорийности топлива Θ осуществляется датчиком 11. При изменении калорийности топлива Θ пересчитываются ограничения на управляющее воздействия (4) и выполняется пересчет коэффициентов цифрового регулятора с использованием соотношений (11), (12).

Результаты тестового испытания системы. Тестовые испытания синтезированной ЦСУ выполнены на производственных мощностях НПЗ ОАО “Лукойл”. Система была испытана в трех режимах: слежения за изменением заданной температуры на выходе печи (при условии: $G = const; T_{вх} = const; \Theta = const$); стабилизации температуры на выходе печи при изменении расхода и температуры поступающего сырья (возмущающего воздействия) ($T_b = const; \Theta = const$); адаптации параметров цифрового регулятора при изменении калорийности топлива ($G = const; T_{вх} = const; T_b = const$).

В режиме *слежения* система была испытана при изменении задания на температуру продукта на выходе печи в диапазоне 1...5°C. В процессе тестирования температура печи была понижена на 1°C с 504,8°C до 503,8°C, затем новый температурный режим был установлен на уровне 506,3°C. После чего печь была возвращена в исходное состояние. При этом ЦСУ позволила монотонно перевести температуру на выходе печи из одного установившегося состояния в другое не более чем за 14 мин (перевод печи из одного температурного режима в другой с помощью традиционной системы регулирования или вручную осуществляется за 30...50 мин).

В режиме *стабилизации* исследована реакция ЦСУ на такие возмущения, как изменение расхода продукта G и изменение температуры продукта на входе печи $T_{вх}$. В качестве другой разновидности возмущающего воздействия было взято изменение температуры продукта на входе печи. Цифровая система управления полностью справляется с компенсацией возмущений, вызванных изменением расхода и температуры продукта на входе печи, за период времени, не превышающий 20 мин.

При тестировании ЦСУ в рассмотренных двух режимах параметр штрафа на управление R_i и коэффициенты регулятора K_i не изменялись ($R_i = const = 1,2; K_1 = 1,015; K_2 = 8,75$), т.е. использовалась процедура одношаговой оптимизации, поскольку калорийность топлива Θ была постоянной.

Исследование ЦСУ в режиме *адаптации* параметров цифрового регулятора было выполнено при изменении калорийности топлива от 4,5 до 6 условных единиц (у.е.) в момент времени $t = t_0$ и обратном изменении от 6 до 4,5 у.е. в момент времени $t = t_0 + 15$ мин. В этом случае использовалась процедура двухшаговой оптимизации. На первом шаге параметр штрафа на управление и коэффициенты цифрового регулятора принимали значения $R_1 = 1,8; K_1^1 = 0,675; K_2^1 = 4,378$, а на втором $R_2 = 1,2; K_1^2 = 1,015; K_2^2 = 8,75$.

В качестве примера, для оценки функциональных возможностей синтезированной оптимальной адаптивной ЦСУ, на рис. 2 – 4 представлены диаграммы изменения калорийности топлива, оптимального управляющего воздействия и температуры продукта на выходе печи для двухшагового процесса управления, соответственно.

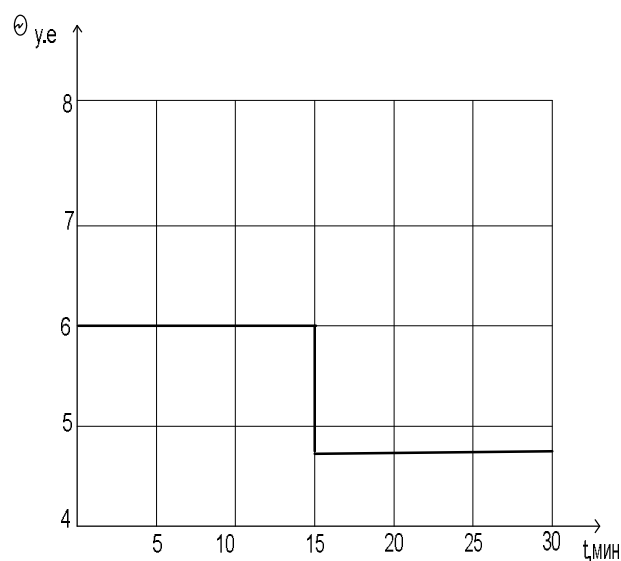


Рис.2. Диаграмма изменения калорийности топлива

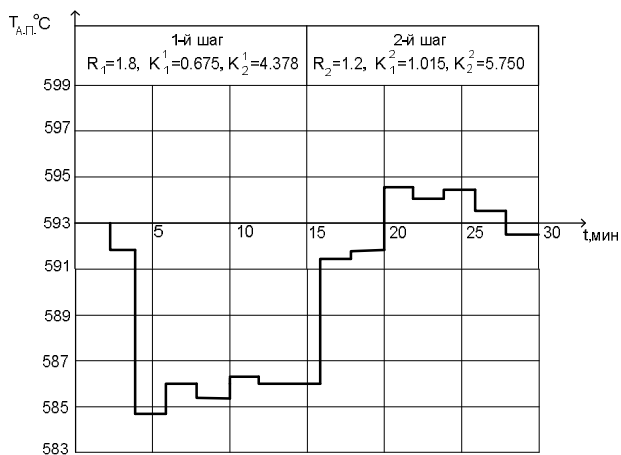


Рис.3. Оптимальное управление для двухшагового процесса

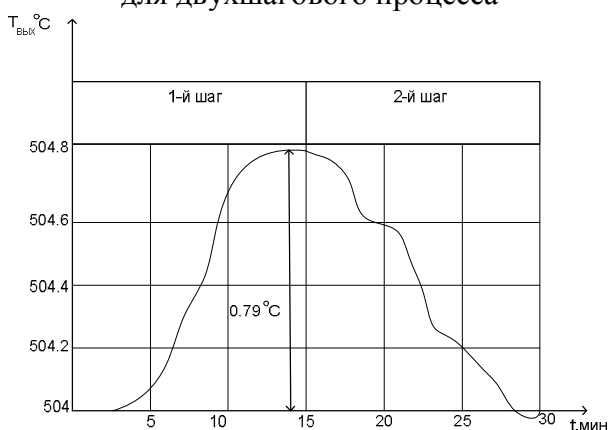


Рис.4. Температура продукта на выходе трубчатой печи для двухшагового процесса

Вывод. Проведенное тестирование позволило установить, что ЦСУ обеспечивает поддержание температурного режима продукта на выходе печи с точностью, находящейся в пределах $\pm 5\%$. Использование традиционной системы регулирования [2] позволяет поддерживать температуру на выходе печи с динамической точностью не выше $11,5\%$. Таким образом, предложенная ЦСУ обеспечивает сокращение времени переходных процессов в $1,5 - 2$ раза и повышение динамической точности регулирования температуры продукта на выходе печи на $6,5\%$, что позволяет улучшить работу установки риформинга (уменьшить расход топлива и увеличить срок службы катализатора).

Список использованной литературы

1. Ажогин В.В. Автоматизированное проектирование математического обеспечения АСУ ТП / Ажогин В.В., Згуровский М.З. – К.: Вища шк., 1986. – 334 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

Получено 22.03.2010



Положаенко
Сергей Анатольевич,
д-р техн. наук, профессор,
зав. каф. «Компьютеризиро-
ванных систем управления»
Одес. нац. политехн. ун-та
тел. 779-72-36



Григоренко Ю.В.
инж. каф. «Компьютеризиро-
ванных систем управления»
Одес. нац. политехн. ун-та
тел. 779-72-36