



ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

КАМИНСКАЯ А.В., ГУСАРОВА И.Г.

Проводится численный анализ нестационарных неизо-термических режимов работы магистрального газопро-вода «Шебелинка–Белгород–Курск–Брянск» при макси-мальной нагрузке ТЭЦ-5 города Харькова. В результате исследования определен стабильный и безаварийный режим работы магистрального газопровода для обеспе-чения безопасных поставок природного газа потребите-лям при пиковых нагрузках на ТЭЦ-5 в зимнее время года.

1. Введение

Управление магистральных газопроводов (УМГ) «Харьковтрансгаз» является мощнейшим предприя-тием стратегического значения. По магистральным газопроводам (МГ) УМГ «Харьковтрансгаз» осуще-ствляется транзит газа в пять областей Украины и в страны Юго-Восточной Европы. Одним из главных источников природного газа для «Харьковтрансгаз» является Шебелинское газоконденсатное месторож-дение (ГКМ). Обеспечение бесперебойного и надёж-ного газоснабжения из ШГКМ осуществляется по МГ «Шебелинка–Белгород–Курск–Брянск» (ШБКБ), «Шебелинка-Харьков», «Шебелинка-Днепропет-ровск» и т.д. Однако основная часть добываемого природного газа поступает через газораспределитель-ную станцию (ГРС) ГРС-5 на одно из важнейших предприятий города Харькова–теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) ТЭЦ-5. Харьковская ТЭЦ-5 выполняет чрез-вычайно важные функции по обеспечению электро-энергией и теплом бытовых, промышленных и бюд-жетных потребителей города Харькова. Кроме того, ТЭЦ-5 предоставляет Объединенной энергосистеме Украины системные услуги по маневрированию элект-рической мощностью.

Одной из актуальных проблем, учитывая сложность процессов, протекающих на всех технологических объектах МГ, является выявление технологических режимов их работы, позволяющих обеспечить безот-казную и бесперебойную работу МГ и ТЭЦ-5 в целях предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения надежного газоснабжения потребителей. Именно по-этому основной целью данного исследования стало прогнозирование режима работы МГ ШБКБ для обе-спечения устойчивой работы всех его технологических объектов при максимальной нагрузке ТЭЦ-5.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи: выполнить расчет неста-ционарных неизотермических режимов работы (ННРР) МГ ШБКБ на основании разработанной математичес-кой модели и метода расчета ННРР многониточных линейных участков (МЛУ) газотранспортной систе-мы (ГТС), основанных на достоверных и точных моделях физических процессов, протекающих в трубо-проводах и полученных из общих законов механики сплошной среды – законов сохранения (количества движения, неразрывности потока, энергии), подробно изложенных авторами в работах [1-4]; проанализиро-вать полученные результаты расчета МГ ШБКБ; опре-делить стабильный и безаварийный режим работы МГ ШБКБ при максимальном количестве работающих на ТЭЦ-5 электрогенераторов.

2. Математическая модель

Здесь представлена разработанная авторами математическая модель (ММ) и метод расчета ННРР МЛУ ГТС, которые наиболее подробно рассмотрены ранее в [1-4].

Модель структуры МЛУ ГТС задается с помощью ориентированного графа $G = (V, M)$, где V – множе-ство узлов графа, M – множество дуг графа. Узлы графа представляют собой места соединения техноло-гических элементов между собой. Множество дуг $M = M_1 \cup M_2$, где M_1 – множество дуг графа, соот-ветствующих УТ; M_2 – множество дуг графа, соот-ветствующих кранам. Множество узлов $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$, где V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 – множество входов МЛУ ГТС, множество промежу-точных узлов, множество выходов МЛУ ГТС, мно-жество входов и выходов всех кранов из M_2 .

Математическая модель ННРР МЛУ ГТС представля-ет собой системы дифференциальных уравнений в частных производных для i -й ($i \in M_1$) дуги графа, описывающего МЛУ ГТС:

$$\frac{\partial W^i}{\partial t} + (1 - \alpha S^i T^i \frac{(W^i)^2}{(P^i)^2}) \frac{\partial P^i}{\partial x} + 2 \alpha S^i T^i \frac{W^i}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} + \beta S^i T^i \frac{W^i |W^i|}{P^i} + \frac{g}{\alpha S^i T^i} \frac{P^i}{dx} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P^i}{\partial t} + \alpha S^i T^i \frac{\partial W^i}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^i}{\partial t} + \alpha \gamma S^i T^i \frac{W^i}{P^i} \frac{\partial T^i}{\partial x} + \alpha S^i (\gamma - 1) \frac{(T^i)^2}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} + \frac{4K}{D^i} (\gamma - 1) \frac{T^i}{P^i} (T^i - T_{гр}) + g(\gamma - 1) \frac{W^i T^i}{P^i} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{z^i g R}{S^i}$, $\beta = \frac{\lambda \alpha}{2 D^i}$, $\gamma = \frac{C_p}{C_p - z^i g R}$, S^i – площадь поперечного сечения трубы; C_p – удельная теплоем-кость газа; z^i – коэффициент сжимаемости

газа; $W^i(x, t)$, $T^i(x, t)$, $P^i(x, t)$ – удельный массовый расход, температура, давление газа; t – временная координата; x – пространственная координата; D^i – диаметр трубы; K – коэффициент теплопередачи от трубы к грунту; $T_{гр}$ – температура грунта; h – глубина залегания трубы; g – ускорение свободного падения.

Система нелинейных алгебраических уравнений для i -й дуги, соответствующая крану ($i \in M_2$), а также система нелинейных алгебраических уравнений, соответствующая условиям согласования параметров газового потока в промежуточном m -м узле ($m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5$) графа, описывающего структуру МЛУ ГТС, имеют вид [6]:

$$P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t) - \zeta \frac{Rg}{2(S^j)^2} \frac{T^i(x^{++}, t)z^i}{P^i(x^{++}, t)} (G^i(x^+, t))^2, \quad i \in M_2, \quad (4)$$

$$T^i(x^{++}, t) = T^i(x^+, t) - D_i(P^i(x^+, t) - P^i(x^{++}, t)), \quad i \in M_2, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} G^j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G^i(x^+, t), \quad (6)$$

$$P_{y3}^m(t) = P^j(x^{++}, t) = P^i(x^+, t), \quad j \in V_m^+, \quad i \in V_m^-, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ \cdot T^j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G^i(x^+, t))^- \cdot T^i(x^+, t)) = T_{cp}^m \cdot \left(\sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G^i(x^+, t))^-) \right), \quad (8)$$

если $G^j(x^{++}, t) < 0$, то $T^j(x^{++}, t) = T_{cp}^m(t)$, $j \in V_m^+$,

если $G^i(x^+, t) > 0$, то $T^i(x^+, t) = T_{cp}^m(t)$, $i \in V_m^-$,

где x^+ , x^{++} – начало и конец УТ, соответствующего i -й дуге; V_m^+ , V_m^- – множество индексов дуг, входящих и выходящих из m -го ($m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5$) узла графа; $G(x, t)$, $T(x, t)$, $P(x, t)$ – массовый расход, давление и температура на УТ, соответствующем i -й дуге графа соответственно; S^j – площадь поперечного сечения УТ, соответствующего j -й ($j \in M_1$) дуге, прилегающей к концу i -й ($i \in M_2$) дуги, соответствующей крану.

Начальное распределение параметров газового потока (распределение расходов, давлений и температур) в начальный момент времени имеет вид:

$$W_i(x, 0) = W_i^0(x), \quad P_i(x, 0) = P_i^0(x), \quad T_i(x, 0) = T_i^0(x), \quad (9)$$

где $x \in [x_i^+, x_i^{++}]$, $i \in M_1$, $W_i^0(x)$, $P_i^0(x)$, $T_i^0(x)$ – известные функции.

Граничные условия I, II, III типов в узлах графа, соответствующие входам и выходам МЛУ ГТС, состоят в задании соответственно давления, расхода, температуры как функций времени:

$$P_{y3}^m(t) = P^m(t), \quad G_v^m(t) = G^m(t), \quad T_{y3}^m(t) = T^m(t), \quad (10)$$

где m – номер узла, в котором задано соответствующее условие; $P_{y3}^m(t)$, $G_v^m(t)$, $T_{y3}^m(t)$ – давление, расход и температура газа для m -го узла графа соответственно.

На основании разработанной математической модели ННРР МЛУ ГТС могут быть поставлены различные классы краевых задач, связанных с изменением граничных условий и структуры расчетного графа в процессе моделирования.

3. Метод решения

Общая система уравнений математической модели решается методом конечных разностей. Разностными уравнениями с использованием неявной конечно-разностной схемы, определенной на равномерном (пятиточечном или четырехточечном) шаблоне [1], аппроксимируем уравнения системы для УТ. После замены частных производных в системах дифференциальных уравнений их разностными аналогами для УТ получаем систему нелинейных алгебраических уравнений, которая является дискретным аналогом системы уравнений общей математической модели нестационарных неизотермических режимов транспорта газа. Решение систем уравнений дискретного аналога осуществляется методом Ньютона путем его линеаризации.

Дополняем полученную линейную систему уравнений линеаризованными уравнениями (4)-(5), описывающими ННРР МЛУ ГТС через краны и линеаризованными условиями согласования (6)-(8) параметров газового потока для m -го промежуточного узла.

Полученная линейная система уравнений решается относительно векторов поправок к неизвестным методом Гаусса с выбором главного элемента. Метод позволяет существенно сократить размерность линейной системы путем специальных преобразований, подробно описанных в работах [1,2].

4. Практическая реализация

В работе рассматривался численный эксперимент по расчету ННРР многониточного линейного участка МГ «Шебелинка–Белгород–Курск–Брянск» между дожимной компрессорной станцией (ДКС) «Червонодонская» и Юлиевским ГКМ Харьковского линейного производственного управления. Численный расчет ННРР МГ основан на разработанной авторами математической модели и методе расчета ННРР многониточных линейных участков газотранспортной системы, рассмотренных выше. Расчетная схема линейного участка МГ ШБКБ представлена на рис. 1.

Транспорт шебелинского газа к ТЭЦ-5 осуществляется с помощью Червонодонской ДКС по системе газопроводов ШБКБ и отводу Ду 700 (общая длина до ТЭЦ-5 составляет 152 км, из которых большая часть УТ с диаметром 700–980 мм). Расчет производился для пиковых нагрузок ТЭЦ-5, а именно для зимнего времени года.

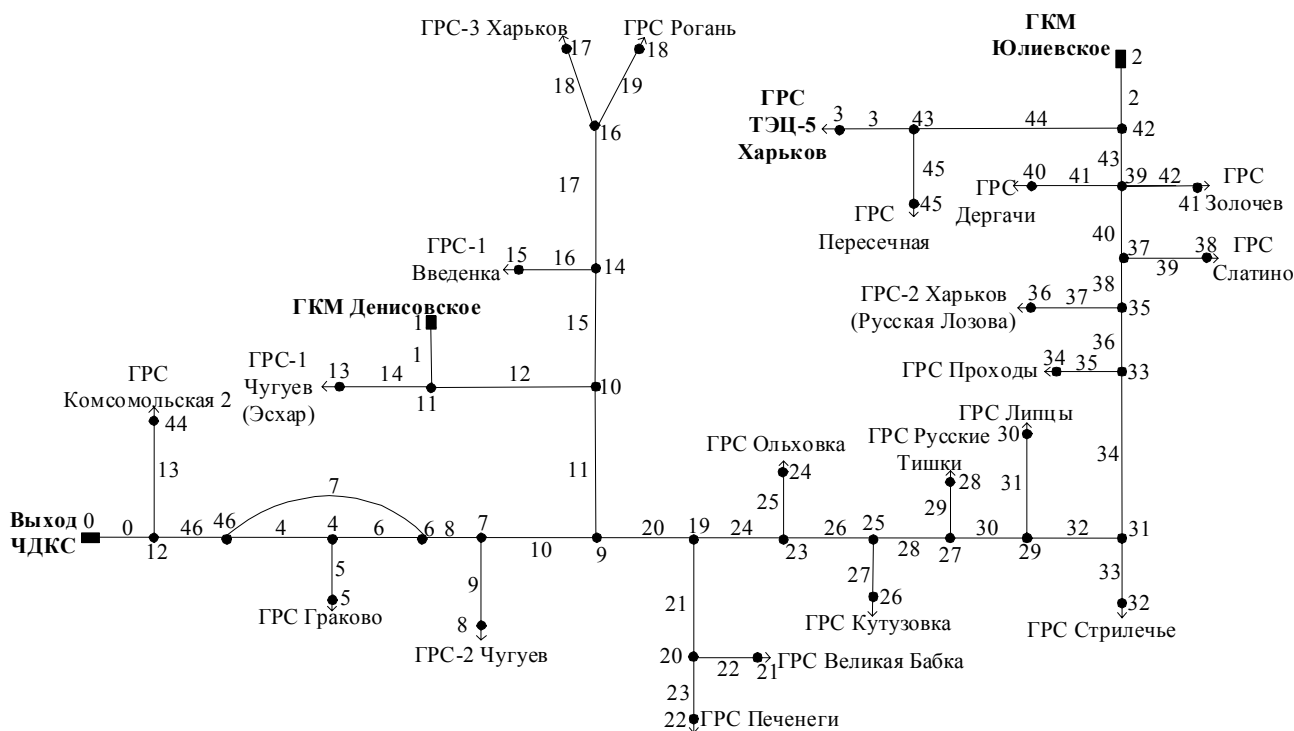


Рис. 1. Расчетная схема линейного участка МГ «Шебелинка–Белгород–Курск–Брянск»

Начальное стационарное распределение параметров газового потока для данного примера получено в результате численного моделирования. Это распределение сравнивалось с результатами натурных измерений параметров потока на МГ ШБКБ.

В качестве граничных условий на всех входах и выходах МГ ШБКБ задавались значения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Граничные условия (для зимнего времени года)

Узлы сети	Значения в узлах сети
Выход из ЧДКС	$P^0(t) = 28.1 \text{ атм.}$ $T^0(t) = 3^0 \text{ C}$
Денисовское ГКМ	$P^1(t) = 27.9611 \text{ атм.}$ $T^1(t) = -9^0 \text{ C}$
Юлиевское ГКМ	$P^2(t) = 33.2133 \text{ атм.}$ $T^2(t) = 3^0 \text{ C}$
ГРС ТЭЦ-5	$q^3(t) = \begin{cases} 2.424 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут., } t \leq 180 \text{ мин.} \\ 3.636 \text{ млн. м}^3 \text{ в сут., } t > 390 \text{ мин.} \end{cases}$

По всем остальным выходам МГ ШБКБ задано граничное условие II типа, на которых расходы природного газа постоянны и составляют в сумме 7,4688 млн.м³ в сут.

Для достижения поставленной в работе цели был проведен эксперимент, в котором ставилась задача определения стабильного безопасного и безаварийно-

го режима работы МГ ШБКБ в случае работы максимального количества электрогенераторов на ТЭЦ-5 и что при этом давление на ТЭЦ-5 не опускается ниже критически допустимого (10,16 атм.). При этом входное давление задано и постоянно. Стабильную работу ТЭЦ-5 обеспечивают 3 электрогенератора. В тестовом примере промоделировано включение максимального количества $n=3$ электрогенераторов на ТЭЦ-5, что соответствует изменению расхода в узле 3 (табл.1).

На рис.1-4 промоделирован ННРР МГ ШБКБ при граничных условиях, заданных в табл.1.

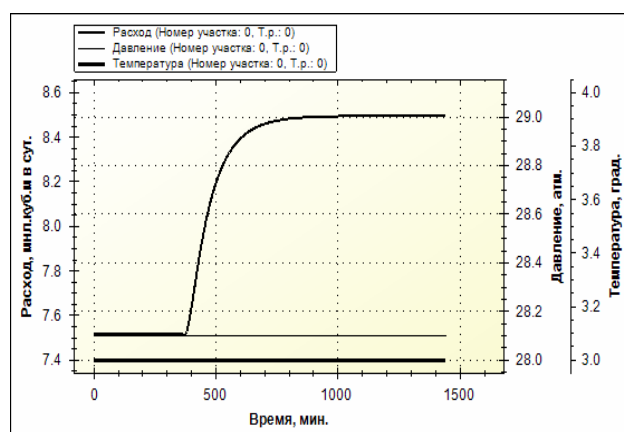


Рис. 2. Графики изменения давления, расхода и температуры в начале 0-го УТ, соответствующего выходу из Червонодоньской ДКС

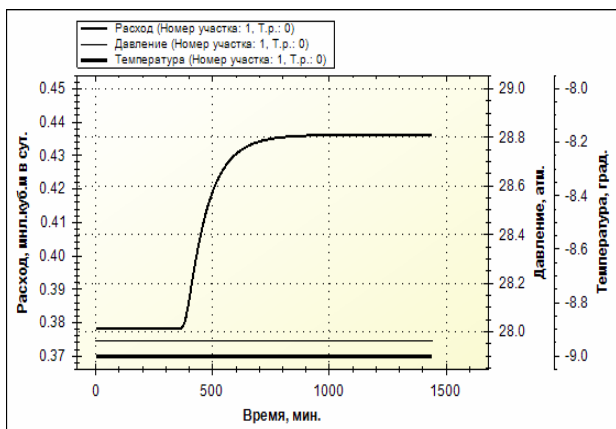


Рис. 3. Графики изменения давления, расхода и температуры в начале 1-го УТ, соответствующего Денисовскому ГКМ

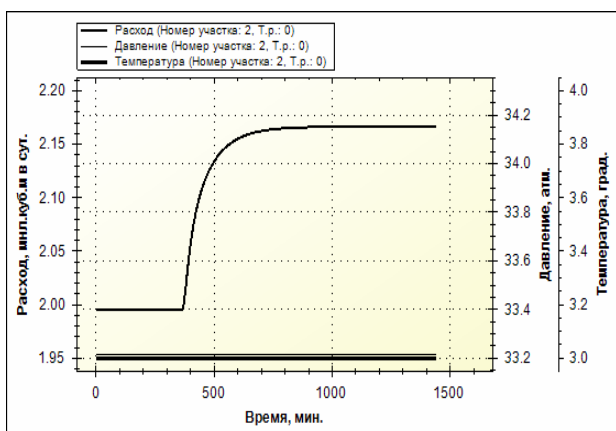


Рис. 4. Графики изменения давления, расхода и температуры в начале 2-го УТ, соответствующего Юлиевскому ГКМ

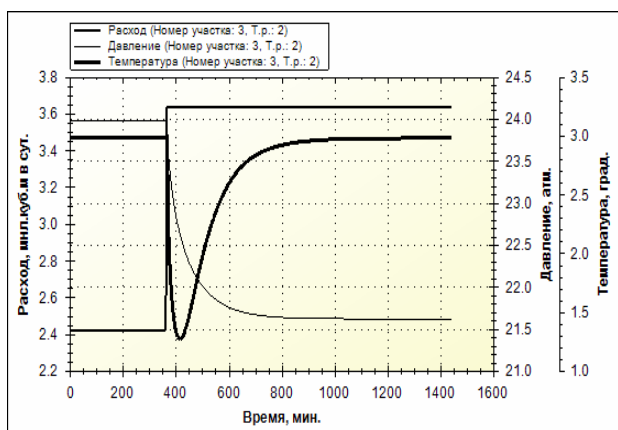


Рис. 5. Графики изменения давления, расхода и температуры в начале 3-го УТ, соответствующему ГРС ТЭЦ-5

Анализировали переходной процесс течения природного газа, связанного с увеличением его потребления ТЭЦ-5 (обусловленного включением максимального числа электрогенераторов) при заданном давлении на входе в МГ, до начала установившегося режима по всей сети газопровода. В результате получили, что для данного начального режима и заданных граничных

условий на входах и выходах МГ ШБКБ по окончании переходного режима на МГ давление на ТЭЦ-5 не опускается ниже критически допустимого (10,16 атм.) и режим работы МГ можно считать безопасным и безаварийным. Проведя расчеты ННРР МГ ШБКБ по включению различного числа электрогенераторов, получили следующие значения давления на ТЭЦ-5 (табл.2).

Таблица 2

Параметры газового потока при установившемся режиме на ТЭЦ-5 с различным количеством включенных электрогенераторов

Давление, атм.	Расход, млн.м ³ в сут.	Температура, град.	Количество электрогенераторов, n
25.6661	1.212	3	1
23.9883	2.424	3	2
21.6252	3.636	3	3

5. Вывод

Научная новизна – впервые проведен численный анализ ННРР МГ ШБКБ на основе математической модели ННРР МЛУ ГТС, позволяющий определить безопасный и стабильный режим работы МГ при пиковых нагрузках на ТЭЦ-5.

По результатам исследования сделан вывод о том, что при заданных начальных данных и начальном режиме (соответствующем зимнему времени, а значит при пиковых нагрузках на ТЭЦ-5) при максимальном количестве $n=3$ (максимальное количество установленных электрогенераторов на ТЭЦ-5) включенных электрогенераторов режим работы МГ ШБКБ является стабильным и безаварийным. Давление при этом на ТЭЦ-5 не падает ниже критически допустимого, причем существует возможность увеличить объемы потребления газа ТЭЦ-5, не меняя входных параметров на МГ ШБКБ. Следовательно, при необходимости включения ТЭЦ-5 на полную мощность МГ сможет бесперебойно обеспечить потребителей газом в заданном объеме при заданном давлении.

Практическая значимость – топливно-энергетический комплекс играет важнейшую роль в мировой экономике, так как без его продукции невозможно функционирование всех без исключения отраслей. Доля природного газа в структуре потребления непрерывно растет. Наибольший рост спроса на газ наблюдается в секторе производства электроэнергии на теплоэлектростанциях. При сохранении тенденции увеличения потребления природного газа проведенный численный анализ позволит решить проблему обеспечения безопасности поставок природного газа и удовлетворения пиковых нагрузок при производстве электроэнергии на теплоэлектростанциях в зимнее время года.

Литература: 1. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Каминская А.В.* Математическая модель и метод расчета нестационарных режимов в линейных участках магистральных газопроводов // Радиоэлектроника и информатика. 2007. №2(37). С. 144-150. 2. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Чуркина А.В.* Эффективный метод и алгоритм расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа в газотранспортной сети произвольной структуры // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. 2/3 (20). С. 45-52. 3. *Тевяшев А.Д., Гусарова И.Г., Каминская А.В.* Учет динамики работы запорной арматуры при моделировании нестационарных режимов транспорта газа в магистральных газопроводах // АСУ и приборы автоматики. 2009. № 147. С. 104-113. 4. *Каминская А.В.* Численный анализ нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы при различных режимах

работы запорной арматуры // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. 6/3 (42). С. 21-25.

Поступила в редколлегию 09.08.2011

Рецензент: д-р техн.наук, проф.Тевяшев А.Д.

Каминская Анна Владимировна, инженер I категории кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: численное моделирование трубопроводных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.

Гусарова Ирина Григорьевна, канд. техн. наук, проф. кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование и управление систем с распределенными параметрами. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-14-36.