

В. Ф. АНТОНОВ, С. В. БЫСТРОВ, В. В. ГРИГОРЬЕВ

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Рассматривается система утилизации тепловой энергии при контактной сварке. Представлены математические модели тепловых процессов и приведены количественные оценки расхода тепловой энергии при различных мощностях на электродах.

**Ключевые слова:** контактная сварка, математическая модель, тепловые процессы.

Для решения технологических задач при контактной сварке, как правило, требуется определить количество теплоты, выделившейся в зоне сварки, и найти распределение температуры в этой зоне. Характер температурного поля в зоне формирования сварного соединения определяется в основном двумя процессами, одновременно протекающими и противоположно направленными: тепловыделением при сварке и теплопередачей в металл и на электроды [1, 2].

В настоящей статье рассматривается процесс утилизации тепловой энергии при контактной сварке на сварочном агрегате АТМС-14х75. Сварочный агрегат АТМС-14х75



Рис. 1

(рис. 1) состоит из электрической и механической частей, пневмосистемы и системы водяного охлаждения. В состав электрической части агрегата входят силовой сварочный трансформатор с переключателем ступеней его первичной обмотки, с помощью которого регулируется вторичное напряжение; вторичный сварочный контур для подвода сварочного тока к деталям; прерыватель первичной цепи сварочного трансформатора и регулятор цикла сварки, обеспечивающий заданную последовательность операций цикла и

регулировку параметров режима сварки. Мощность, потребляемая рассматриваемым агрегатом, составляет примерно 75 кВт.

**Источники теплоты в зоне формирования сварного соединения.** При контактной сварке в зоне формирования соединения действуют несколько источников теплоты (рис. 2). Нагрев металла в зоне сварки происходит в основном за счет генерирования теплоты в свариваемых деталях, а также на сопротивлениях участка электрод—электрод при прохождении через них электрического тока.

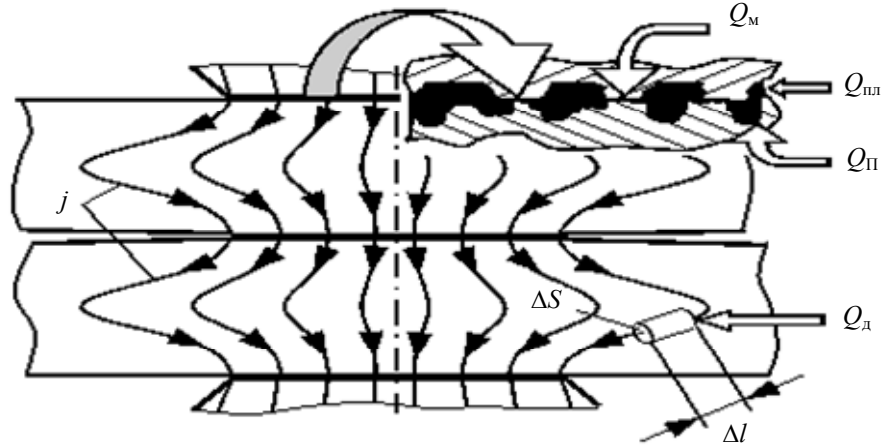


Рис. 2

Основное количество теплоты (более 90 % от общего ее количества  $Q_{э-э}$ , выделяющегося в течение цикла сварки в зоне формирования соединения на участке электрод—электрод [2]) формируется в свариваемых деталях.

Линии электрического тока в свариваемых деталях претерпевают заметные искривления, вследствие чего площадь  $\Delta S$  элементарной силовой трубки тока изменяется в зависимости от ее длины  $\Delta l$ . С учетом этого суммарное количество теплоты  $Q_д$ , выделяемой на сопротивлениях  $r_д$  деталей, может быть определено по закону Джоуля — Ленца [2]:

$$Q_д = \int_0^t \int_0^T \int_S j^2(t) \rho(T) \frac{\Delta l}{\Delta S} dt dT, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление металла свариваемых деталей;  $T$  и  $t$  — координаты температуры и времени в зоне сварки.

Некоторое количество теплоты (менее 10 % от  $Q_{э-э}$  [2]) генерируется на контактах деталь—деталь и электрод—деталь, а также в прилегающих к ним областях. На этих контактах генерируется теплота  $Q_м$  за счет электрического сопротивления  $r_м(T)$  микровыступов, непосредственно образующих контакт. Значение  $r_м$  в процессе сварки относительно быстро уменьшается вплоть до нулевых из-за деформирования микровыступов вследствие потери прочности при увеличении температуры  $T$ . На контактах деталь—деталь и электрод—деталь генерируется также теплота  $Q_{пл}$  за счет электрического сопротивления ( $r_{пл}$ ) естественных оксидных пленок или (в некоторых случаях) искусственных покрытий. Для контактной точечной сварки (КТС), характеризующейся непрерывным изменением силы сварочного тока и температуры металла в зоне формирования соединения, величины  $Q_м$  и  $Q_{пл}$  можно определить по следующим зависимостям [2, 3]:

$$Q_м = \int_0^t \int_0^T j^2(t) r_м(T) dt dT, \quad (2)$$

$$Q_{пл} = \int_0^t \int_0^T j^2(t) r_{пл}(T) dt dT. \quad (3)$$

При точных расчетах, как дополнительный источник теплоты, следует учитывать теплоту  $Q_п$ , выделяющуюся на контактах электрод—деталь вследствие проявления эффекта

Пельтье [2] или полупроводниковых свойств окисной пленки. Теплота Пельтье генерируется на границах пленок с металлом, или на границах жидкого металла с твердым, или на границах разнородных металлов. Количество теплоты  $Q_{\Pi}$  может быть определено согласно зависимости [1, 2]

$$Q_{\Pi} = \mp \int_0^t \int_0^T \Pi(T) j(t) dt dT, \quad (4)$$

где  $\Pi(T)$  — коэффициент Пельтье для некоторой границы.

Таким образом, общее количество теплоты  $Q_{3-3}$ , которая выделяется в зоне сварки при протекании через нее сварочного тока  $I_{\text{св}}$  в течение длительности его импульса  $t_{\text{св}}$  (времени сварки), может быть определено как сумма количеств теплоты, выделившейся на перечисленных источниках:

$$Q_{3-3} = Q_{\text{д}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\Pi}.$$

В приближенных решениях задач технологии КТС, например при определении (для конкретных условий сварки) ориентировочных значений сварочного тока, теплоту, выделяющуюся в контактах (т. е.  $Q_{\text{м}}$ ,  $Q_{\text{пл}}$  и  $Q_{\Pi}$ ), по зависимостям (2)—(4) не рассчитывают или учитывают усредненно, через различные поправочные коэффициенты [1, 2]. Таким образом, в технологических расчетах теплоту  $Q_{3-3}$  в основном определяют как теплоту  $Q_{\text{д}}$ , выделяющуюся только в свариваемых деталях. Поскольку в большинстве случаев значение температуры в зоне сварки усредняется, то зависимость (1) преобразуется к виду

$$Q_{3-3} = \int_0^{t_{\text{св}}} I_{\text{св}}^2(t) r_{3-3}(t) dt,$$

в соответствии с которым при усреднении по времени силы сварочного тока  $I_{\text{св}}$  и электрического сопротивления  $r_{3-3}$  зоны сварки и получают расчетные зависимости [1, 2].

**Температурное поле в зоне формирования сварочного соединения.** Распределение температуры в зоне формирования соединения измерить непосредственно при КТС пока никому не удалось несмотря на многочисленные попытки. Мнения о значениях температуры, например, в центре зоны сварки, расходятся: от температуры плавления металла до температуры его кипения [2]. Анализ известных методик расчетов температуры в зоне сварки, которые учитывают выделение и перераспределение теплоты в ней (например, приведенный в работе [2]), показывает, что удовлетворить требованиям современной технологии КТС этим путем весьма проблематично, и работы в этом направлении, по-видимому, бесперспективны.

Для исследования температурных полей в зоне сварки А. С. Гельман предложил решение дифференциальных уравнений распределения потенциалов и теплопроводности осуществить методом конечных разностей [1, 2]. Это позволило учесть изменение в процессе КТС теплофизических характеристик металла, геометрических параметров сварных соединений, а также влияние энергетического и силового воздействия на зону сварки и скрытой теплоты плавления металла в ядре. Эта методика (с уточнением граничных условий) стала широко использоваться при решении различных задач технологии точечной сварки методом конечных разностей и методом конечных элементов.

При исследованиях тепловых процессов в зоне формирования точечного сварного соединения в большинстве случаев осуществляется совместное решение дифференциального уравнения распределения потенциалов

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{r \cdot \partial r} = 0,$$

где  $\varphi$  — потенциал в рассматриваемой точке,  $z$  и  $r$  — цилиндрические координаты пространства, описывающего электрическое поле, и дифференциального уравнения теплопроводности

Фурье, которое при условии, что теплоемкость и плотность металла не зависят от температуры, записывается чаще всего следующим образом [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_M \gamma} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial T}{r \cdot \partial r} \right] + \frac{j^2 \rho}{c_M \gamma},$$

где  $c_M$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  и  $\rho$  — теплоемкость, плотность, теплопроводность и удельное электрическое сопротивление металла соответственно.

Так, расчетные изотермы температуры плавления  $T_{пл}$  металла (рис. 3, а) по конфигурации и геометрическому положению весьма близки к границам ядра расплавленного металла, экспериментально (рис. 3, б) определяемым на различных стадиях его формирования [1, 2].

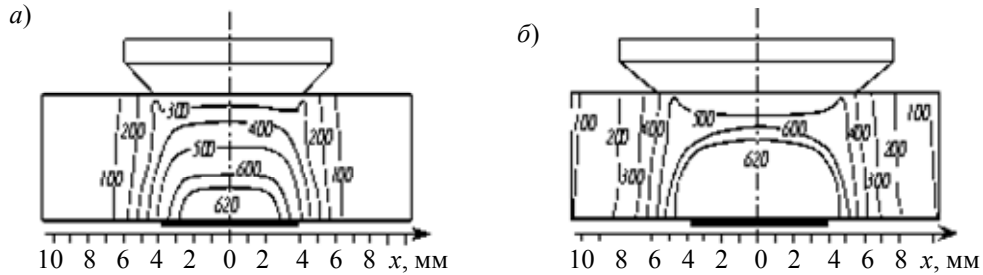


Рис. 3

**Тепловой баланс в зоне сварки.** Теплоту  $Q_{3-3}$ , которая выделяется в зоне формирования соединения для получения ядра заданных размеров, можно рассчитать по теплосодержанию металла к концу процесса сварки и количеству теплоты, отведенной из зоны сварки в процессе формирования соединения.

Для этого используются условные схемы теплопередачи в зоне сварки и распределения в ней температуры (рис. 4).

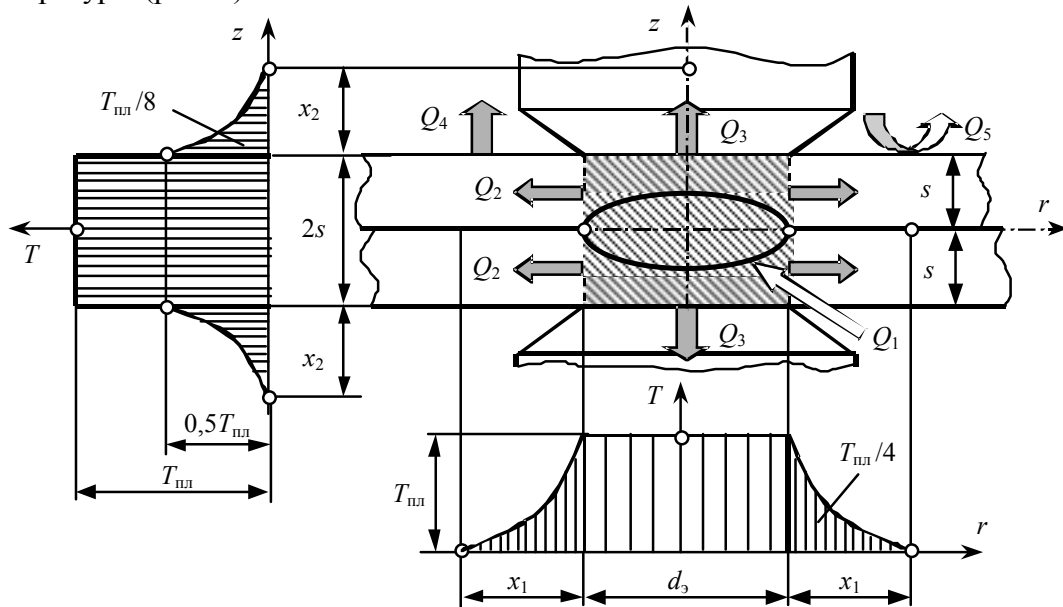


Рис. 4

При реализации данной методики расчета предполагается, что вся теплота  $Q_{3-3}$  выделяется в цилиндре, диаметр которого равен диаметру  $d_3$  контакта электрод—деталь. Теплота  $Q_{3-3}$  условно разделяется на теплоту  $Q_1$ , которая расходуется на нагрев и плавление металла в цилиндре ( $Q_1 \approx 20...30\%$  от  $Q_{3-3}$  [2]), теплоту  $Q_2$ , которая отводится в металл деталей ( $Q_2 \approx 20\%$  от  $Q_{3-3}$  [2]), и теплоту  $Q_3$ , которая отводится на электроды ( $Q_3 > 50\%$  от  $Q_{3-3}$  [2]). Относительно небольшое количество теплоты  $Q_{3-3}$  отводится с поверхностей деталей посредством

радиационной  $Q_4$  и конвективной  $Q_5$  теплоотдачи. Такое распределение теплоты  $Q_{3-3}$  описывается так называемым „уравнением теплового баланса“ [2]:

$$Q_{3-3} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5,$$

при этом радиационной  $Q_4$  и конвективной  $Q_5$  теплоотдачей обычно пренебрегают из-за их относительно малых величин. С учетом изложенного сокращенное уравнение теплового баланса  $Q_{3-3} = Q_1 + Q_2 + Q_3$  в развернутом виде описывают следующим выражением [2]:

$$Q_{3-3} = \frac{\pi d_3^2}{4} \cdot 2s\gamma_m c_m T_{пл} + k_1 \pi (d_3 + x_2) x_1 \cdot 2s\gamma_m c_m \frac{T_{пл}}{4} + 2k_2 \frac{\pi d_3^2}{4} x_2 \gamma_3 c_3 \frac{T_{пл}}{8},$$

где  $\gamma_m$  и  $\gamma_3$  — плотность металла свариваемых деталей и электродов;  $c_m$  и  $c_3$  — теплоемкость металла свариваемых деталей и электродов;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения температуры в кольце (см. рис. 4);  $k_2$  — коэффициент, учитывающий влияние на теплоотвод формы рабочей части электродов;  $x_1, x_2$  — параметры, характеризующие распределение температуры на некоторых участках в зоне сварки.

**Математическая модель тепловых процессов.** Суммарная тепловая энергия, выделяемая при работе агрегата, составляет около 75 кВт. Это тепло рассеивается в окружающем пространстве. Рассмотрим способ утилизации тепла, для этого закроем зону сварки специальным кожухом, схема движения воздуха в котором представлена на рис. 5. Снаружи кожух покрыт теплоизолирующим материалом.

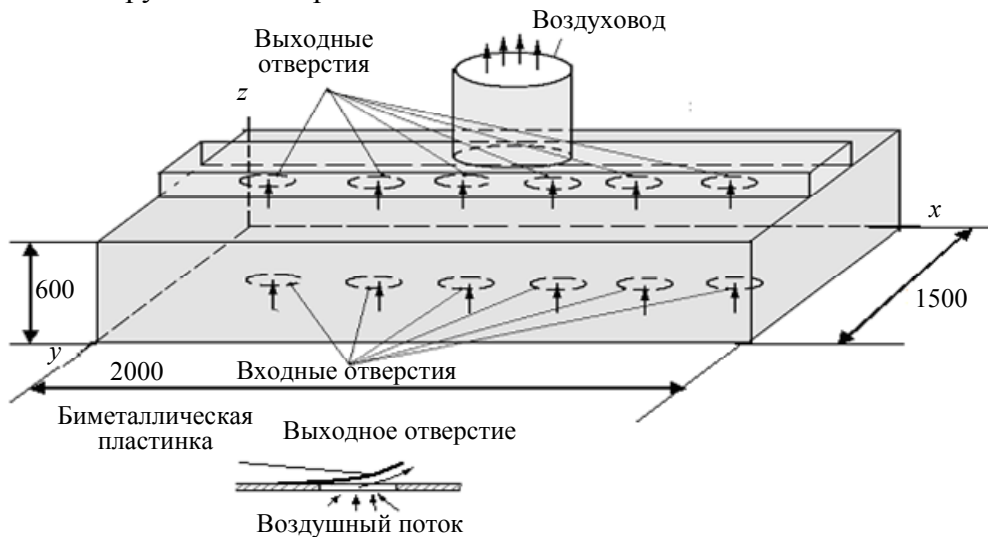


Рис. 5

Математическая модель тепловых полей внутри кожуха может быть описана следующими уравнениями:

$$\frac{dT(y, x, z, \tau)}{d\tau} = a \left[ \frac{d^2 T(y, x, z, \tau)}{dx^2} + \frac{d^2 T(y, x, z, \tau)}{dy^2} + \frac{d^2 T(y, x, z, \tau)}{dz^2} \right] + \delta(x_i, y_i, z_i) q_i(\tau); \quad (5)$$

$$0 < y < Y, 0 < x < X, 0 < z < Z,$$

где  $T(x, y, z, \tau)$  — температурное поле воздуха внутри кожуха;  $a$  — коэффициент температуропроводности воздуха;  $\delta(x_i, y_i, z_i)$  — дельта-функция, указывающая координаты  $i$ -го источника теплоты;  $q_i(\tau)$  — функция, отражающая мощность  $i$ -го источника теплоты.

При описании граничных условий примем, что температура воздуха во входных отверстиях остается постоянной. Тогда уравнение (5) примет следующий вид:

$$\frac{dT(y, x, z, \tau)}{dr} = 0. \quad (6)$$

С использованием математической модели (5), (6) была составлена дискретная модель тепловых процессов, протекающих в кожухе, и построен алгоритм расчета его температурных полей. По результатам расчетов построены графики изменения температуры воздуха внутри кожуха.

График зависимости температуры воздуха внутри кожуха от выделяемой мощности ( $P$ ) представлен на рис. 6. Как видно из графика, с увеличением мощности  $P$  температура внутри кожуха возрастает по линейному закону.

График зависимости температуры воздуха внутри кожуха от времени при различных значениях  $P$  представлен на рис. 7.

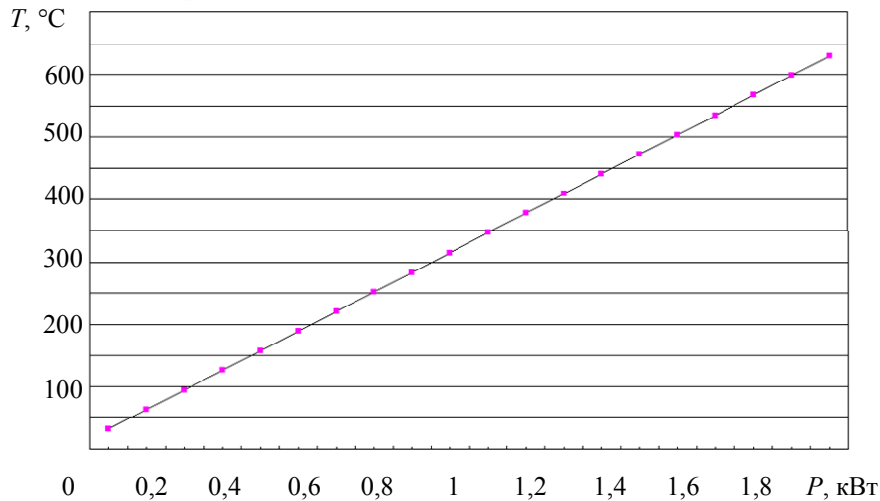


Рис. 6

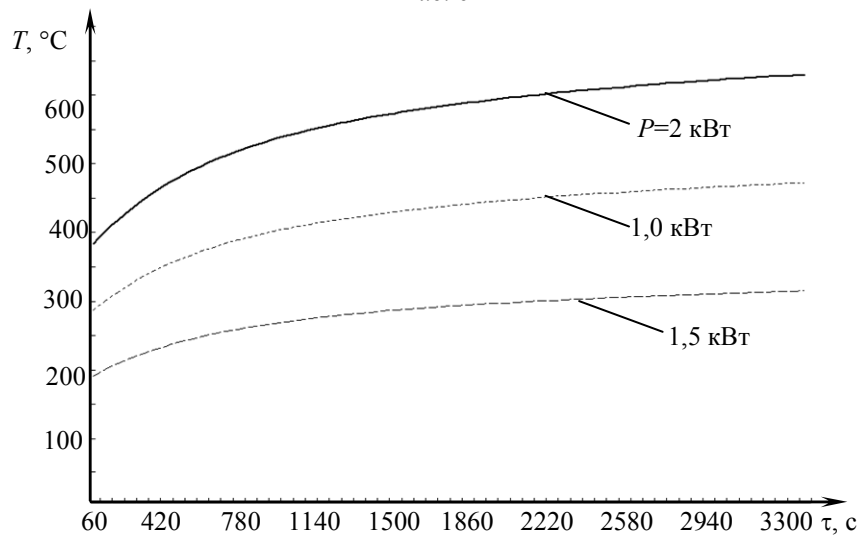


Рис. 7

Оценим количество энергии, которая аккумулируется внутри кожуха:

$$Q = c_v \nu \rho_v (T_1 - T_0),$$

где  $c_v=1,005$  кДж/кг·°C — удельная теплоемкость воздуха;  $\nu = 1,8$  м<sup>3</sup> — объем кожуха;  $\rho_v = 1,29$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воздуха;  $T_0, T_1$  — температура воздуха внутри кожуха перед началом сварки и после ее окончания.

Рассчитаем количество теплоты, аккумулируемой при различных значениях выделяемой мощности на каждом электроде:

- 1)  $P=1$  кВт,  $T_1=315$  °C,  $T_0=40$  °C, тогда  $Q_{31}=1,005 \cdot 1,8 \cdot 1,29 \cdot (315-40)=641,7428$  кДж;
- 2)  $P=1,5$  кВт,  $T_1=470$  °C,  $T_0=40$  °C, тогда  $Q_{32}=1,005 \cdot 1,8 \cdot 1,29 \cdot (470-40)=1003,452$  кДж;
- 3)  $P=2$  кВт,  $T_1=630$  °C,  $T_0=40$  °C, тогда  $Q_{33}=1,005 \cdot 1,8 \cdot 1,29 \cdot (630-40)=1376,83$  кДж.

Как следует из расчетов, достаточно большое количество тепловой энергии может быть утилизировано и использовано для других производственных нужд.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-08-00857-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колосов В. И., Гореликов П. А., Мусин Р. А. Новые возможности контактной точечной сварки // Сварочное производство. 2001. № 10. С. 25—28.
2. Козловский С. Н. Основы теории и технологии контактной точечной сварки: Монография. Красноярск: СибГАУ, 2003. 235 с.
3. Колосов В. И. Формирование температурных полей при контактной сварке // Сварочное производство. 1994. № 6. С. 27—28.

#### *Сведения об авторах*

- Владимир Феохарович Антонов** — Пятигорский государственный технологический университет, кафедра информатики и информационных технологий; зав. кафедрой; E-mail: antonovpgtu@mail.ru
- Сергей Владимирович Быстров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: sbystrov@mail.ru
- Валерий Владимирович Григорьев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: grigvv@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики  
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
18.01.11 г.