

УДК 621.192.3

## НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ УЗЛА АВИАЦИОННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

**Кравченко Е.В., Ивлева Д.Ю.**

*Томский политехнический университет, Томск, e-mail: kevatp@tpu.ru*

В статье проведен анализ и определение показателей надежности узла авиационной электроники с учетом пространственной неоднородности температурного поля печатной платы типичной конструкции при пониженном и нормальном атмосферном давлении. Рассматривались три тепловых режима. Задача теплофизического моделирования пространственных температурных полей сводилась к решению нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности. В ходе численных экспериментов было установлено, что режим работы моделируемого печатного узла РЭА является нестационарным. Установлено, что показатели надежности, а именно интенсивности отказов при пониженном атмосферном давлении выше, чем интенсивность отказов при нормальном давлении почти в 3 раза, и в 91 раз выше, чем для некоторого постоянного (стационарного) режима работы типичного узла авиационной электроники. Показана необходимость учета давления для оценки остаточного ресурса бортовой аппаратуры.

**Ключевые слова:** надежность, остаточный ресурс, численные методы, пониженное давление

## RELIABILITY OF UNIT AVIONICS IN STATIONARY OPERATION MODE AT LOW AIR PRESSURE

**Kravchenko E.V., Ivleva D.Y.**

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: kevatp@tpu.ru*

The article analyzes and determination of reliability avionics unit with allowance for spatial heterogeneity of the temperature field of a typical printed circuit board design for reduced and normal atmospheric pressure. Considered three thermal regime. The task of thermophysical modeling spatial temperature fields was reduced to solving the nonlinear transient heat equation. In the numerical experiments, it was found that the operation of the simulated printed board assembly REA is unsteady. Found that the reliability, failure intensity at low air pressure is higher than failure intensity under normal pressure nearly 3 times, and 91 times higher than for a permanent (stationary) mode of a typical unit avionics. The necessity of taking into account the pressure on avia electronics equipments to estimate residual life.

**Keywords:** reliability, residual life, numerical method, low pressure

Надежность работы авиационного оборудования и, как следствие, безопасность полетов зависят от многих факторов. К одному из таких факторов относится температурный режим функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры [6]. Перебои в функционировании, например, радиостанции пилота при заходе на посадку могут стать следствием катастрофы воздушного судна, причиной которой мог послужить отказ платы блока питания радиостанции.

Известно, что неблагоприятная экономическая ситуация, в частности, в региональных авиакомпаниях приводит к тому, что срок эксплуатации оборудования после назначенного срока службы может продлеваться. При этом не учитывается тот факт, что отказы могут иметь экспоненциальный характер зависимости от времени эксплуатации. В сложившихся условиях создание инструмента для прогностического моделирования показателей надежности бортового радиоэлектронного оборудования является актуальной задачей по обеспечению безопасности полетов.

Тенденции развития радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сводятся к уменьшению массогабаритных показателей и уве-

личению функциональных возможностей оборудования. Не исключением является и бортовая РЭА, которая эксплуатируется в достаточно узком диапазоне рабочих температур 20...80°C. Увеличение температур на каждые 10°C приводит, как правило, к уменьшению показателей надежности на 25...50% [2]. Поэтому считается, что тепловое воздействие является одним из наиболее значимых факторов. Кроме этого, наряду с внешним тепловым воздействием на бортовую РЭА необходимо учитывать и пространственную неоднородность температурных полей при возможных локальных перегревах внутри аппаратуры. Локальная неоднородность может являться как следствием схемно-конструктивных ошибок, нестационарных режимов работы оборудования, так и следствием снижения коэффициента конвективного теплообмена бортовой РЭА с внешней средой. Коэффициент конвективного теплообмена является функцией температуры. Для типичных условий работы РЭА и мощностей тепловыделения до 2 Вт теплообмен осуществляется в режиме естественной конвекции [3, 5]. Однако при увеличении высоты полета воздух становится разреженным, что при-

водит к уменьшению количества активных молекул, осуществляющих теплоотвод от локально нагретых электрорадиоэлементов (ЭРЭ) функциональных узлов бортовой аппаратуры. Соответственно неоднородность температурного поля и температуры элементов печатного узла, вызванные локальными источниками тепловыделения при пониженном атмосферном давлении, должны увеличиваться. Поэтому, учитывая обратно-пропорциональную зависимость коэффициента конвективного теплообмена от разности температур, получается, что он будет уменьшаться. И, как следствие, теплоотвод будет осуществляться преимущественно за счет теплопроводности и радиационного теплообмена с внешней средой.

**Целью** данной работы является определение показателей надежности узла авиационной электроники с учетом пространственной неоднородности температурного поля печатной платы типичной конструкции при пониженном и нормальном атмосферном давлении.

Численное моделирование показателей надежности выполнено на примере типичного для современной РЭА узла (рис. 1), состоящего из печатной платы и 6 локальных источников тепловыделения [8]. Моделируемый объект представлял собой плату из стеклотекстолита, ограниченную размерами по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно  $L_x$ ,  $L_y$  и  $L_z$ . В качестве моделей источников тепловыделения были выбраны кремниевые транзисторы, применяемые в усилителях мощности и переключающих устройствах, а также интегральная микросхема как наиболее типичные электрорадиоэлементы в большом классе радиотехнических устройств.

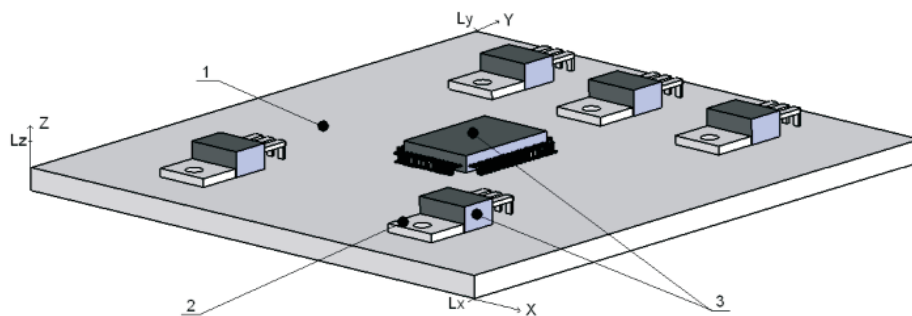


Рис. 1. Геометрия области решения:

1 – печатная плата; 2 – теплоотводящая поверхность; 3 – корпус транзистора и микросхемы

Принималось, что на границах с различными теплофизическими характеристиками (ТФХ) выполнялись условия равенства тепловых потоков и температур. Теплофизические

характеристики элементов печатного узла представлены в таблице. На границах с внешней средой задавались граничные условия III рода с учетом излучения.

#### Теплофизические характеристики области решения.

Номер области	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)
1	1750	1185	0,3
2	2700	900	210
3	2900	1100	0,8

Рассматривались три тепловых режима. Первый (реальный) – температура в каждой точке области решения изменяется в соответствии с условиями работы тепловыделяющих элементов РЭА и теплоотвода во внешнюю среду при пониженном атмосферном давлении. Второй режим отличается от первого давлением, а именно, считалось, что давление соответствует 760 мм рт. ст. Третий – температура в каждой точке области решения принимается постоянной и равной 300 К.

Задача теплофизического моделирования пространственных температурных полей сводится к решению нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности [8].

Используя широко известную формулу убыли давления с увеличением высоты:

$$P_h = P_0 \cdot \exp \left[ -\frac{M \cdot g \cdot (h - h_0)}{R \cdot T} \right], \quad (1)$$

где  $P_h$  и  $P_0$  – давление газа на высотах  $h$  и  $h_0$ ;  $M$  – молярная масса воздуха;  $g$  – ускорение

свободного падения;  $R$  – молярная газовая постоянная; и известную зависимость коэффициента конвективного теплообмена от температуры [4]:

$$\alpha(T) = (1,42 - 1,4 \cdot 10^{-3} T_m) \cdot N2 \cdot \left( \frac{T - T_B}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где  $T_m$  – среднее арифметическое температур поверхности и внешней среды;  $N2$  – коэффициент, зависящий от ориентации поверхности в пространстве [4];  $L$  – характеристика, определяющая размер; получим выражение, определяющее зависимость коэффициента конвективного теплообмена от температуры и давления:

$$\alpha(T, P_h) = (1,42 - 1,4 \cdot 10^{-3} T_m) \cdot N2 \cdot \left( \frac{T - T_B}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{P_0 \cdot \exp \left[ -\frac{M \cdot g \cdot (h - h_0)}{R \cdot T} \right] \cdot v}{\Delta T}, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость движения газа.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался для каждой точки поверхности.

Приведенный коэффициент черноты поверхности модели и окружающей среды определяется соотношением [4]:

$$\varepsilon_{np} = \left( \frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{1}{\varepsilon_{cp}} - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_n$  – коэффициент черноты поверхности модели;  $\varepsilon_{cp}$  – коэффициент черноты окружающей среды.

Для оценки показателей надежности будем использовать широко распространенную модель Аррениуса [2], где температура является основным учитываемым фактором:

$$\lambda = C \cdot \exp \left( -\frac{E_1}{kT} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов оборудования;  $C$  – константа;  $E_1$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана.

Известно, что при длительной эксплуатации бортового радиоэлектронного оборудования ( $t \geq 5$  лет) возникают постепенные отказы. С физической точки зрения подобного рода отказы заключаются в медленном изменении характеристик оборудования или, другими словами, в расходовании ресурса. Характерной моделью для случая постепенного расходования ресурса является модель аддитивного накопления повреждений [7].

$$H(t) = \int_0^t Y(t) \cdot dt, \quad (6)$$

где  $Y(t)$  – скорость расходования ресурса.

Преобразуем уравнение (5) в соответствии с моделью аддитивного накопления повреждений.

$$\lambda(T) = C \cdot \int_0^t \exp \left( -\frac{E_1}{kT} \right) \cdot dt. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что в полученном уравнении (7) температура является функцией времени.

Численные исследования определения показателя надежности – интенсивности отказов, проведены в типичном диапазоне изменения параметров внешнего воздействия и условий работы печатного узла. Анализ надежности печатного узла проводился при пониженном атмосферном давлении, соответствующем высоте полета  $h = 20$  км. Моделирование пространственных температурных полей проводилось на разностной сетке размерами  $110 \times 100 \times 18$  для длительной реализации ( $t = 1,58 \cdot 10^8$  с.). Мощность тепловыделения составляла 1 Вт – для транзисторов, 1 Вт – для микросхемы.

На рис. 2 показано типичное температурное поле моделируемого печатного узла в момент времени ( $t = 1800$  с) при нормальном атмосферном давлении ( $P_0 = 760$  мм рт. ст.).

Следует отметить, что представленное на рис. 2 температурное поле является типичным для рассматриваемых диапазонов изменения внешних и внутренних воздействий температур. Градиенты по оси  $Z$  при этом достигают 30 и более градусов, что согласуется с данными, полученными в [1]. Также в ходе численных экспериментов было установлено, что режим работы моделируемого печатного узла РЭА является нестационарным. Анализируя рис. 3, на котором представлены изотермы моделируемого печатного узла в сечении  $Z = 4$  мм (верхняя поверхность печатной платы) при пониженном и нормальном давлениях соответственно, можно сделать вывод о различиях по максимальным температурам (около  $20^\circ\text{C}$ ), а также в конфигурации изотерм даже для относительно простого функционального узла РЭА, представленного на рис. 1.

Разница в конфигурации изотермических линий и температурах в соответствующих областях печатного узла является след-

ствием изменения, а именно уменьшения коэффициента теплообмена. Необходимо отметить, что при моделировании рассматривались не самые экстремальные тепловые режимы (мощность источников тепло-

выделения не более 1 Вт). Можно сделать обоснованный вывод, что отличия будут тем существеннее, чем больше будет неоднородность ТФХ по оси  $Z$  и чем ниже будет атмосферное давление.

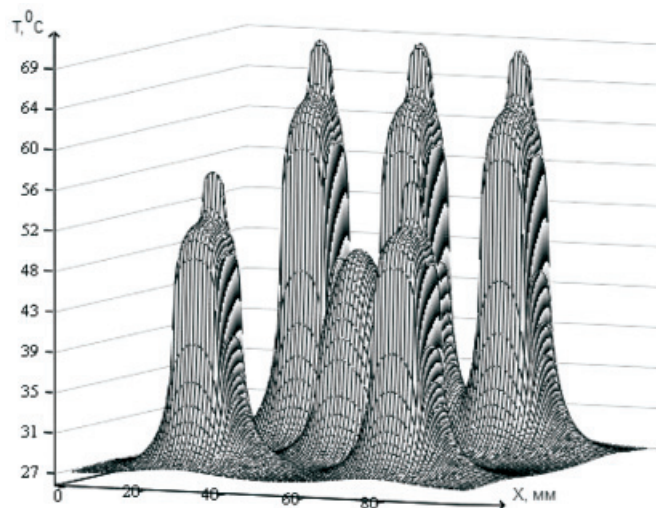


Рис. 2. Температурное поле моделируемого печатного узла

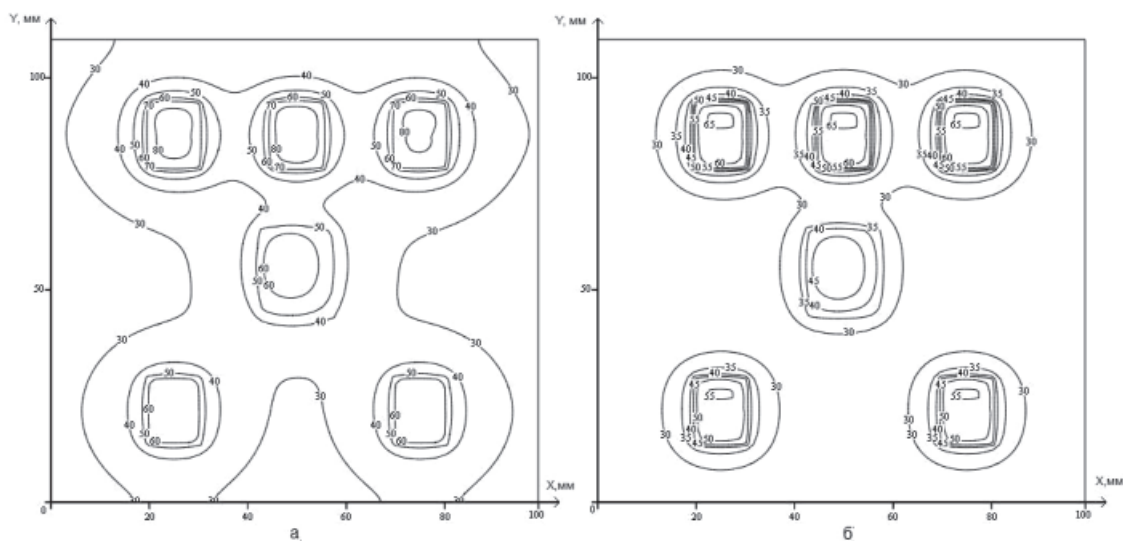


Рис. 3. Изотермы печатного узла в сечении  $Z = 4$  мм при пониженном (а) и нормальном (б) атмосферном давлении ( $t = 1800$  с)

Представленные на рис. 4 изотермы в сечении  $Z = 0$  мм подтверждают предположение о том, что теплоотвод от локальных источников тепловыделения увеличивается за счет механизма теплопроводности. При детальном рассмотрении изотерм (рис. 3 и 4) видно, что отличия по максимальным температурам уже составляют более  $20^\circ\text{C}$ .

Однако средние значения температур по типичному печатному узлу при пониженном атмосферном давлении выше на  $20^\circ\text{C}$ ,

чем при нормальном давлении. Как отмечалось ранее [2], увеличение температуры в рабочем диапазоне ЭРЭ на каждые  $10^\circ\text{C}$  может приводить к увеличению интенсивности отказов в 2 раза. Поэтому проведена оценка показателя надежности бортовой РЭА – интенсивности отказов, при различных атмосферных давлениях. В качестве основного фактора, влияющего на скорость расходования ресурса, в уравнении была выбрана максимальная температура по моделируемому узлу.



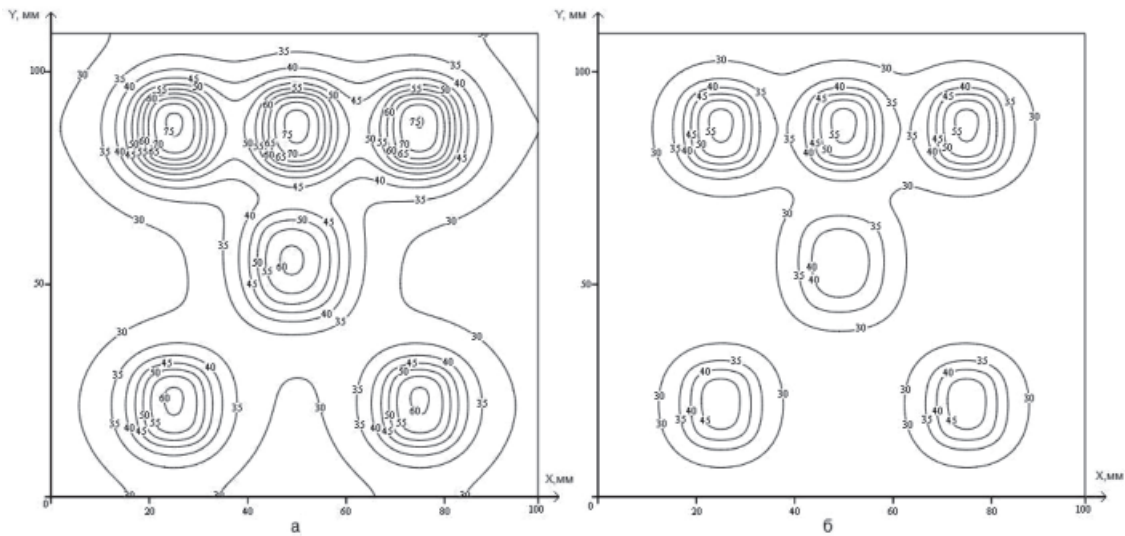


Рис. 4. Изотермы печатного узла в сечении  $Z = 0$  мм при пониженном (а) и нормальном (б) давлении ( $t = 1800$  с)

Результаты численного анализа представлены на рис. 5. Показатели надежности приведены для времени моделирования 5 лет. Из графика видно, что интенсивность отказов при пониженном атмосферном давлении (кривая 1) выше, чем интенсивность

отказов при нормальном давлении (кривая 2) в 2,8 раза, и в 91 раз выше, чем для некоторого постоянного (стационарного) режима работы типичного узла авиационной электроники (кривая 3) при прочих равных условиях.

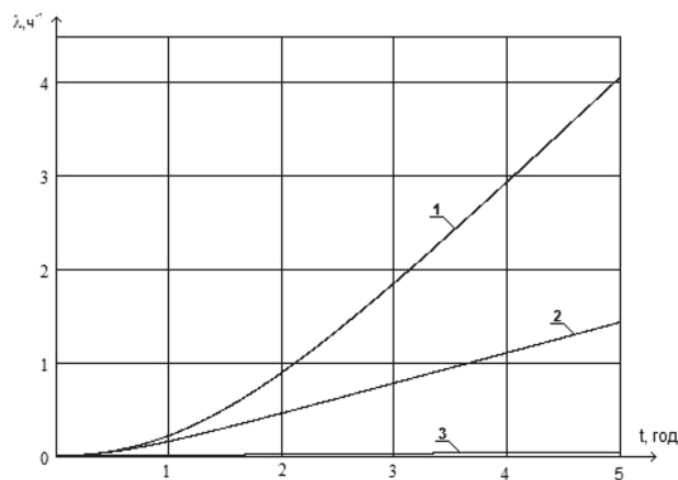


Рис. 5. График зависимости интенсивности отказов от времени: при пониженном (кривая 1) и нормальном атмосферном давлении (кривая 2), стационарном режиме тепловыделения при нормальном атмосферном давлении (кривая 3)

В заключение необходимо отметить практическую значимость полученных результатов для обеспечения безопасности полетов воздушных судов. Предложенный подход определения показателей надежности при учете пространственно неоднородных (реальных) полей температур и изменениях давлений позволяет получать данные для оценки остаточного ресурса

изделий бортовой РЭА. Прогнозировать техническое состояние и продлевать срок эксплуатации бортовой электроники за назначенный ресурс без риска для безопасности полетов.

Проведенное численное исследование создает возможность для применения физических методов прогнозирования, в частности, модели аддитивного накопления по-

вреждений. Применение подобных методов (физических) позволяет перейти от статистических методов оценки надежности к методам оценки на основе физических процессов, что в конечном итоге должно способствовать развитию физической теории надежности технических систем.

#### Список литературы

1. Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В. О влиянии неоднородности температурного поля на надежность электрорадиоизделий // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 7. – С. 48–54.
2. Борисов А.А., Горбачева В.М., Карташов Г.Д., Мартынова М.Н., Прытков С.Ф. Надежность зарубежной элементной базы // Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 5. – С. 34–53.
3. Добрынин В.Д. Оценка статистических характеристик теплового поражения полупроводниковых приборов // Радиотехника. – 2004. – № 10. – С. 38–46.
4. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
5. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения электронной аппаратуры // Известия вузов. Приборостроение. – 2002. – № 7. – С. 59–62.
6. Роткоп Л.Л., Гиделивич В.Б., Гунн Л.А., Максименко В.Д. Оценка влияния тепловых режимов в РЭА на ее надежность // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1972. – Вып. 1.
7. Садыхов Г.С., Савченко В.П. Оценка остаточного ресурса изделий с использованием физической модели аддитивного накопления повреждений. // ДАН. – 1995. – Т. 343. – № 4. – С. 469–472.
8. Kuznetsov G.V., Kravchenko E.V. The peculiarities of modeling reliability parameters for printed circuit assembly electronics working in cycling mode // Электромагнит-

ные волны и электронные системы. – 2005. – № 11–12. – С. 19–22.

#### References

1. Alekseev V.P., Kuznecov G.V., Shloma S.V. Uspehi sovremennoj radioelektroniki, 2003, no. 7, pp. 48–54.
2. Borisov A.A., Gorbacheva V.M., Kartashov G.D., Martynova M.N., Prytkov S.F. Zarubezhnaja radioelektronika. 2000, no. 5, pp. 34–53.
3. Dobrynin V.D. Radiotekhnika, 2004, no. 10, pp. 38–46.
4. Dul'nev G.N. Teplo- i massoobmen v radioelektronnoj apparature. [Heat and mass transfer in electronic equipment]. Moscow, 1984. 247 p.
5. Ismailov T.A., Evdulov O.V. Izvestija vuzov. Priborostroyeniye. 2002, no. 7, pp. 59–62.
6. Rotkop L.L., Gidelivich V.B., Gunn L.A., Maksimenko V.D. Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO. 1972, Vypusk 1.
7. Sadyhov G.S., Savchenko V.P. DAN. 1995, T. 343, no. 4, pp. 469–472.
8. Kuznetsov G.V., Kravchenko E.V. Jelektromagnitnyye volny i jelektronnyye sistemy, 2005, no. 11–12, pp. 19–22.

#### Рецензенты:

Шидловский С.В., д.т.н., профессор кафедры электронных средств автоматизации и управления, ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск;

Евтушенко Н.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий в исследовании дискретных структур радиофизического факультета, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 08.05.2013.