

В.В. Белозёров
(Институт физики Южного федерального университета;
e-mail: fireman@ip.rsu.ru)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА, НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

Изложена сущность экспериментальных методов оценки качества, надёжности и безопасности электроприборов с целью проверки их соответствия заданным требованиям.

Ключевые слова: качество, надёжность, безопасность.

V.V. Belozarov EXPERIMENTAL METHODS OF THE ESTIMATION QUALITY, RELIABILITY AND SAFETY ELECTRICAL APPLIANCE

Stated essence of the experimental methods of the estimation quality, reliability and safety electrical appliance for the reason check of their correspondence to given to requirements.

Key words: quality, reliability, safety.

При испытаниях любой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и электротехнического оборудования (ЭТО) на функционирование, надёжность и безопасность всегда приходится решать задачу максимально эффективного использования возможностей физических (стендовых) испытаний изделий, для подтверждения конструкторских расчетов и качества производственных процессов.

Технико-экономическими ограничениями решения указанной задачи, как правило, являются [1-3]:

- общая продолжительность испытаний (реально – не более 2-3 месяцев при круглосуточной загрузке стенда);
- количество испытываемых изделий с учетом разрушающего характера испытаний (реально - не более 5);
- затраты на идентификацию всех возникающих отказов электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и на оперативное восстановление изделий в ходе испытаний (помимо сопровождения самого процесса испытаний).

Основные физические и информационные ограничения при этом [4-7]:

- высокая надёжность ЭРЭ как причина слабой или практически нулевой наблюдаемости отказов некоторых типов даже в продолжительных испытаниях;
- малая доля информативных отказов в общей массе наблюдаемых отказов, т.е. низкий процент "функциональных и опасных" отказов (неправильный монтаж, несоответствие нагрузочных характеристик, короткие

замыкания, пробой и т.п.);

- ограниченные возможности корректного ускорения появления отказов в испытаниях с помощью повышения температуры среды и применения циклической электрической нагрузки, т.к. считается, что при ускорении деградации ЭРЭ более чем на два порядка происходит существенное перераспределение отказов по причинам, интенсивностям, формам проявления и т.д.

Указанные ограничения определяют место экспериментальных методов в общей схеме проверки испытываемых изделий на соответствие требованиям качества, надежности и безопасности. До настоящего времени они не позволяли продуктивно использовать экспериментальный этап для уточнения справочных интенсивностей отказов, но при надлежащей формулировке статистического критерия оставляли возможность экспериментально проверить расчетные оценки.

Решающим обстоятельством при выборе статистического критерия, связываемого с экспериментальными методами, явилось придание ему свойства относительной нечувствительности к неконтролируемому перераспределению пропорций в интенсивностях отказов ЭРЭ при форсировании испытаний циклическими нагрузками. Разработанный критерий сопоставления расчетных величин с результатами стендовых испытаний основывается на учете указанных обстоятельств, что позволило связать его с аналитическими физическими и химическими моделями.

Имея такой критерий (критерий Бернулли), можно провести его комплексирование с вероятностно-физическим методом определения "текущих" интенсивностей и вероятностей отказов ЭРЭ по модифицированному нами уравнению Аррениуса-Эйринга [8,9]:

$$\lambda = A(P, V, N, F) \cdot \frac{kT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \exp[f(H)]; \quad (1)$$

где λ - интенсивность отказа ЭРЭ, 1/час;

A - произведение полиномов, аппроксимирующих зависимость отказа от давления, объема, влажности, вибраций, количества выводов ЭРЭ;

k - постоянная Больцмана, $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T - температура ЭРЭ, °К;

h - постоянная Планка, $6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

E_a - эффективная энергия активации отказа, Дж;

$f(H)$ - функция нетермической (энергетической) нагрузки.

Указанное уравнение до настоящего времени не удавалось решить для каждого ЭРЭ в РЭА и ЭП по трем причинам [2-7]:

методологическим – корректное определение энергии активации отказа даже для одного ЭРЭ оказывалось практически не разрешимой задачей, так как приходилось выбирать превалирующий процесс деградации

(термодиффузия, электромиграция, коррозия и т.д.), т.е. не измерять и вычислять, а подбирать её значение;

метрологическим – точное измерение параметров окружающей ЭРЭ среды, его температуры и энергетической нагрузки было не возможно, из-за внесения самими средствами измерения (СИ) изменений и потерь в процессы электро-тепло-массообмена;

техничко-экономическим – количество ЭРЭ в РЭА и ЭП измеряется десятками, сотнями и тысячами, поэтому на каждый элемент СИ не поставить.

Нам удалось устранить указанные ограничения, решив газодинамические уравнения Навье-Стокса при двумерном приближении Обербека-Буссинеска в "прямой и обратной задачах" тепловой локации ЭРЭ, и получить для расчета функции энергетической нагрузки [8, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} &= \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + Nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) - Nu \cdot \alpha \cdot V_x; \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} &= \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + Nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) - Nu \cdot \alpha \cdot V_y + \beta \nabla T; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} &= \eta \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{Q}{C \rho_0 D}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\rho_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \rho_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial y}; \\ \beta \cdot S \cdot \varepsilon (T^4 - T_{возд.}^4) + \alpha \cdot S (T - T_{возд.}) - W_p &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha, \beta, \rho, \eta$ - коэффициенты;

Nu - число Нуссельта;

C - теплоемкость;

D - расстояние;

σ - постоянная Стефана- Больцмана;

S - площадь поверхности источника тепла (ЭРЭ);

W_p - потребляемая источником тепла мощность (фактическая);

$T_{возд.}$ - температура окружающего источник тепла воздуха/зонда;

T - искомая/измеренная температура источника тепла (ЭРЭ, платы, стенки и т.д.);

B_L - коэффициент энергетической нагрузки конструктива (блока, изделия);

P_L - коэффициент энергетической нагрузки платы (модуля);

W - номинальная (паспортная) потребляемая мощность.

E_L - коэффициент энергетической нагрузки ЭРЭ (микросхемы, резистора и т.п.), вычисляемый по формуле:

$$E_L = (\beta \cdot S \cdot \sigma (T^4 - T_{возд.}^4) + \alpha \cdot S (T - T_{возд.})) / (W_L \cdot B_L \cdot P_L). \quad (4)$$

Знание функций энергетической нагрузки ЭРЭ превратило λ в функцию, у которой для любого ЭРЭ известны минимальное (λ_{\min}), номинальное ($\lambda_{\text{ном}}$) и максимальное (λ_{\max}) значения, что позволило построить по "точкам" и сгладить функцию эффективной энергии активации отказа каждого ЭРЭ - E_a (H, T).

Таким образом, подставляя в уравнения Аррениуса-Эйринга текущие значения функций энергетических нагрузок каждого ЭРЭ, текущие значения температур их корпусов, текущие значения функций эффективной энергии активации отказа им соответствующие, а также текущие значения параметров окружающей среды (давления, объема, влажности и вибрации), получили текущие интенсивности отказов ЭРЭ.

Как оказалось, полученные функции интенсивности отказов можно описывать γ -распределениями [10, 11]. При этом нахождение параметров γ -распределения случайной величины λ_i в данном случае сводилось к задаче определения параметров B и C функции γ -распределения по заданному доверительному интервалу.

Для реализации стендовых испытаний данным методом по критерию Бернулли необходимо найти условия корректного ускорения испытаний, которые, как правило, осуществляются "баро-влажностно-термо-электроциклированием" с коэффициентом ускорения K_y , равным [2-5]:

$$K_y = K_{\text{HTЦ}} \cdot K_B, \quad (5)$$

где K_B - коэффициент учета внешней среды (влажности, давления, вибраций и т.п.), кроме температуры и электрической нагрузки;

$K_{\text{HTЦ}}$ - коэффициент (функция) учета совместного влияния на λ : электрической нагрузки, температуры окружающей ЭРЭ среды и параметров циклирования (включения и выключения ЭРЭ).

Найдем выражение для K_y в нашем случае:

$$K_y = K_B \cdot K_{\text{HTЦ}} \cdot K_T, \quad (6)$$

где $K_B = A(P, V, W, N)$ – коэффициент (функция) учета внешней среды, независящий от изменения электрической нагрузки и слабо коррелирующий с изменениями температуры;

$K_T = kT / h \exp(-E_a/kT)$ - коэффициент (функция) учета влияния температуры, независящий от изменений внешней среды и слабо коррелирующий с изменениями электрической нагрузки;

$K_{\text{HTЦ}} = \exp[f(H)]$ - коэффициент (функция) учета влияния электрической нагрузки, независящий от изменений внешней среды и слабо коррелирующий с изменениями температуры, характеризуемый параметром нагрузки H, рекомендуемыми значениями которого являются значения равные 0,2-0,9 от – номинальных, при этом $H = 0$ в цикле "выключения", а непрерывный режим работы является частным случаем при частоте цикла равной 0.

Функция учета влияния электрической нагрузки $f(H)$ определяется

как отношение заданной рабочей нагрузки $W_{РАБ}$ к нагрузке номинального режима $W_{НОМ}$. [5-7]:

$$H = W_{РАБ} / W_{НОМ}, \quad (7)$$

где нагрузкой W для ЭРЭ обычно являются:

- мощность (для транзисторов, резисторов, микросхем);
- напряжение (для конденсаторов, разъемов);
- сила тока (для диодов, выключателей);
- плотность тока в обмотке (для трансформаторов, дросселей) и т.п.

При определении указанных нагрузок могут учитываться различные параметры режима, например скважность сигналов, отношения сигналов верхнего и нижнего уровня к номинальному сигналу и т.п. Однако во всех случаях $f(H)$ выражает заданную нагрузку в долях номинальной и является безразмерной.

Принимая во внимание изложенное, и пренебрегая корреляцией K_B с температурой, коэффициент ускорения K_U определим без K_B как $K_{НТЦ}$, и будем искать его из условия:

$$\lambda \cdot t = \lambda_P \cdot t_P + \lambda_{Ц} \cdot v \cdot t + \lambda_{ОЖ} \cdot t_{ОЖ}, \quad (8)$$

где, в соответствии с уравнениями (6), (13-15) предполагается, что

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_{НОМ} \cdot K_{НТЦ}; \\ \lambda_P &= \lambda_{НОМ} \cdot K_{НЦ} \cdot K_T = \lambda_{НОМ} \cdot g(H, T); \\ \lambda_{ОЖ} &= \lambda_{НОМ} \cdot K_{ОЦ} \cdot K_T = \lambda_{НОМ} \cdot g(0, T), \end{aligned} \quad (9)$$

при t - общее полезное время испытаний в часах, в котором не учитываются задержки на восстановления изделий после отказов;

$t_P = r \cdot t$ - суммарное время нахождения изделия во включенном (рабочем) состоянии в процессе испытаний, а r - доля t_P в t ;

v - частота циклирования (или средняя частота, если регулярность циклирования нарушается), 1/час.;

$t_{ОЖ} = t - t_P = (1 - r) \cdot t$ - суммарное время нахождения изделия в выключенном состоянии в процессе испытаний (т.е. в состоянии ожидания включения) при средней подолжительности:

$$\begin{aligned} t_{Ц,Р} &= r / v - \text{рабочей стадии цикла, час.}, \\ t_{Ц,ОЖ} &= (1-r) / v - \text{нерабочей стадии цикла, час.}, \end{aligned}$$

λ_P - интенсивность отказов элемента во включенном состоянии при средней температуре T_P рабочего состояния:

$$T_P = \frac{1}{t_P} \int_{\{t'\}} T(t) dt \quad (10)$$

где $T(t)$ - температура окружающей среды для элемента как функция времени t ;

$\{t'\}$ - совокупность интервалов времени пребывания изделия во включенном состоянии в рабочих стадиях циклов;

$\lambda_{Ц}$ - интенсивность внезапных отказов элемента, возникающих в

момент включения или выключения изделия (на один цикл включения);

$\lambda_{\text{ОЖ}}$ - интенсивность отказов, возникающих в выключенном элементе при средней температуре $T_{\text{ОЖ}}$ ожидания работы:

$$T_{\text{ОЖ}} = \frac{1}{t_{\text{ОЖ}} \{t''\}} \int T(t) dt, \quad (11)$$

где $\{t''\}$ - совокупность интервалов времени пребывания изделия в выключенном состоянии - в нерабочих стадиях циклов;

Окончательное выражение для коэффициента циклирования, вытекающее из указанных соотношений, имеет вид

$$K_{\text{НТЦ}} = r \cdot g(N, T_p) + (1 - r) \cdot g(0, T_{\text{ОЖ}}) + h \cdot v, \quad (12)$$

где $h = \lambda_{\text{Ц}} / \lambda_{\text{НОМ}}$.

Таким образом, совмещая испытания на функционирование и надежность, и подбирая план испытаний РЭА и ЭТО (диапазоны режима "баро-влажностно-термо-электроциклирования"), применяя "обратимые" и "необратимые" термодинамические характеристики ("расходования ресурса" по тепловым гистерезисам ЭРЭ) в качестве событий критерия Бернулли, получаем возможность, продуктивно использовать экспериментальный этап и для уточнения справочных интенсивностей отказов $\lambda_{\text{МИН}}$ и $\lambda_{\text{НОМ}}$ (в режиме хранения и номинальном режиме), когда "баро-влажностно-тепло-электроцикл" проходит через математические ожидания и дисперсии интенсивности отказа при хранении ЭРЭ и интенсивности отказа в номинальном режиме [12-13].

Вероятностно-химическая модель пожарной безопасности. Разработанные модели [13-16] и методология [17-20] комбинированного термогравиакустического метода исследований (испытаний) веществ и материалов, позволили поставить и начать решение проблемы количественного определения физико-химических параметров ЭРЭ и РЭА, определяющих их эксплуатационную устойчивость и горючесть, а также по аналогии с долговечностью ввести понятие пожаробезопасного ресурса и "старения", которые могут рассчитываться по кинетическим, термодинамическим и вероятностно-физическим моделям, а проверяться - по критерию Бернулли.

Так, например, для оценки пожарной безопасности РЭА и ЭП разработана модель на критериях Семенова, Зельдовича и Франк-Каменецкого, в которой тепло пожароопасного отказа ЭРЭ, нагревая электрорадиоматериал (ЭРМ), воспламеняет его при переходе процессов деструкции и пиролиза ЭРМ в самоускоряющуюся фазу по критериям Семёнова ($Se = 0,368$) и Франк-Каменецкого ($Fk = 2,00$), что вполне допустимо, принимая во внимание бифуркационный характер пожароопасного отказа [9,14,19]:

$$\begin{cases} Ze = \sqrt{2\lambda_B \frac{RT_{\Pi}^2}{E_a} \cdot H \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\Pi}}\right)}; \\ Se = \frac{Q \cdot V}{S \cdot \alpha} \cdot \frac{E_a}{RT_{\Pi O}^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\Pi O}}\right); \\ F_k = \frac{Q \cdot r^2}{\lambda_O} \cdot \frac{E_a}{RT_O^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_O}\right); \end{cases} \quad (13)$$

$$E_{Di} = \frac{(\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2) \cdot R \cdot T_O T_{\Pi O}}{T_{\Pi O} - T_O} \quad (14)$$

$$K = \frac{2\lambda_O \cdot RT_{\Pi O}^2 \cdot \exp\left(\frac{T_{\Pi O}(\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2)}{T_{\Pi O} - T_O}\right)}{Q \cdot r^2 \cdot \frac{(\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2) \cdot R \cdot T_O T_{\Pi O}}{T_{\Pi O} - T_O}} \quad (15)$$

$$H_{Di} = \frac{Q^3 \cdot r^2 \cdot T_O^2 \cdot (\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2)^2 \cdot \exp\left(\frac{T_O T_{\Pi O} \cdot (\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2)}{T_{\Pi} (T_{\Pi O} - T_O)}\right)}{2 \cdot F_k \cdot \lambda_B \cdot S^2 \cdot \lambda_O \cdot T_{\Pi}^2 \cdot (T_{\Pi O} - T_O)^2 \cdot \exp\left(\frac{T_{\Pi O} \cdot (\ln T_O^2 - \ln T_{\Pi O}^2)}{(T_{\Pi O} - T_O)}\right)} \quad (16)$$

где Ze – критерий Зельдовича (критическая плотность теплового потока); λ – коэффициент теплопроводности газовой фазы; R – газовая постоянная; T_{Π} – температура печи; E_a – энергия активации пиролиза образца; H – тепловой эффект реакции в газовой фазе; K – предэкспонент; Se – критерий Семенова ($Se = 0,368$); Q – теплота, подведенная к образцу; V – текущий объем образца; S – текущая площадь поверхности образца; α – текущий коэффициент теплоотдачи образца; $T_{\Pi O}$ – температура поверхности образца; F_k – критерий Франк-Каменецкого ($F_k = 2,00$); r – линейный размер образца; λ_O – коэф. теплопроводности образца; T_O – температура образца.

Одновременно проверяется выполнение условия зажигания каждого соседнего ЭРЭ, при возникновении пожароопасного отказа в - данном, по критическому тепловому потоку Зельдовича -

$$\frac{Q}{S} > Ze \quad (17)$$

Численное определение всех параметров неравенств оказалось возможным (14-16), включая названную нами – "эффективную энергию активи-

вации воспламенения" (14), при объединении их в систему (13) на основании синергетики и "встречного характера векторов", описываемых ими процессов, и измерения текущих параметров в момент вспышки, фиксируемой при термоаналитических испытаниях [11, 12].

Расчеты по системе неравенств (13) проводятся для каждого элемента пожарной нагрузки объекта и его "соседей", для чего необходима их топология, а для вероятностной оценки результатов расчета вводится функция "маятник события" [21], формирующая из топологии элементов пожарной нагрузки на объекте "матрицу загораний":

$$U = \begin{cases} 1, & \text{если загорание произошло} \\ 0, & \text{если загорание не произошло} \end{cases} \quad (18)$$

Вероятность распространения огня, т.е. распространения загорания "на соседа" при нагревании и самовоспламенении элемента пожарной нагрузки, формируется с помощью той же функции "маятник события" (18) по критической плотности теплового потока Зельдовича, к которому добавляется дополнительный тепловой поток, обусловленный теплотой сгорания (пожаропроизводительностью) воспламенившегося ЭРМ [7, 11]:

$$\frac{Q_{\Gamma} \cdot m_{\text{Э}} + Q}{S} > Ze \geq \sqrt{2\lambda_{\text{В}} \cdot \frac{RT^2}{E_a} \cdot \frac{H}{K} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (19)$$

где Q_{Γ} - удельная теплота сгорания ЭРМ, Дж/кг;
 $m_{\text{Э}}$ - горючая масса ЭРМ (убыль массы), кг;
 S - площадь поверхности ЭРМ, м².

Тогда при испытаниях по критерию Бернулли проверяются вероятности полученной "матрицы загораний" и "матрицы распространения огня" и их соответствие стандарту [22].

Литература

1. ГОСТ 27.410-87. Методы контроля показателей надежности и планы контроля испытаний на надежность.
2. Груничев А.С. и др. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. - М.: Сов.радио, 1969.
3. Литвинский И.Е. Обеспечение безотказности микроэлектронной аппаратуры на этапе производства. - Минск, Беларусь, 1989. - 191 с.
4. Буловский П.И., Зайденберг М.Г. Надежность приборов систем управления / Справоч. пособ. - Л.: Машиностроение, 1975. - 238 с.
5. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технология и надежность ЭВА. - М.: Радио и связь, 1983. - 312 с.
6. Иьуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. - М.: Высш. шк., 1989. - 216 с.
7. Парфенов Е.М. и др. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры / Уч. пособ. для ВУЗов. - М.: Радио и связь, 1989. - 272 с.
8. Белозеров В.В., Иванников В.Л., Топольский Н.Г., Шпак Л.А. Новые средства оценки пожарной опасности и предотвращения пожаров в изделиях электронной техники и электроустановках // Сб. докл. "Семинара по проблемам пожарной

безопасности АЭС". - М.: Интератомэнерго, 1992. - С. 18-27.

9. Белозеров В.В., Загускин В.Л. Уравнения Навье-Стокса в моделях тепловой локализации электрорадиоэлементов // Сб. тр. межд. шк.-семинар "Применение симметрии и косиметрии в теории бифуркаций и фазовых переходов". - Ростов н/Д: РГУ, 2001. - С. 17-21.

10. Бородин Г.А., Лемуткин Л.В., Столяров А.К. Оценка требований, предъявляемых к надежности микропроцессорных средств аппаратуры связи, при неопределенности значений интенсивности потока отказов элементов // Сб. "Средства связи", вып. 3, 1987. -С. 66-69.

11. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988. - 168 с.

12. Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств. - М.: Наука, 1989. - 160 с.

13. Белозеров В.В., Топольский Н.Г. Термодинамический метод оценки объектов повышенной опасности и риска поражения ими ноосферы // Материалы 2-й междунар. конф. "Информатизация систем безопасности" - ИСБ-97. - М.: МАИ (ВИПТШ МВД РФ), 1993. - С. 45-51.

14. Белозёров В.В., Бушкова Е.С., Гаврилей В.М. Модель воспламенения электрорадиоэлементов при пожароопасном отказе – "Проблемы предотвращения и тушения пожаров на объектах народного хозяйства": Материалы XI научн.-практ.конф.- М., ВНИИПО, 1992, с.219-223.

15. Белозеров В.В., Топольский Н.Г., Смелков Г.И. Вероятностно-физический метод определения пожарной опасности радиозлектронной аппаратуры - Материалы XII Всероссийской науч.-практ. конф. "Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ", М., ВНИИПО, 1993. - С. 23-27.

16. Белозеров В.В., Гольцов Ю.И., Шпак Л.А. Применение полупроводниковых датчиков в средствах оценки пожарной опасности изделий электронной техники // Тез. докл. 6 Межд. семинара по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. - Ростов н/Д: РГПУ, 1993. - С. 97-98.

17. Белозеров В.В., Воронцов А.А., Кирьянова Н.А., Панич А.Е., Шпак Л.А. Позисторные сенсоры для электротехнических и радиозлектронных изделий // Тез. докл. IV межд.конф "Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение", 19-22 октября 1999 г. – Александров: ВНИИСИМС, 1999. - С. 352-353.

18. Белозеров В.В., Панченко Е.М., Буйло С.И. Методология термоакустических исследований веществ и материалов // Сб. науч. тр. Науч.-тех.конф. "Научно-инновационное сотрудничество" по межотрасл. программе Минатома и Минобразования РФ / ч.2., ISBN 5-7262-0403-4. - М.: МИФИ, 2002. - С. 76-77.

19. Белозеров В.В., Прус Ю.В., Топольский Н.Г. Диагностика параметров пожароопасности электрорадиоматериалов комплексным термоакустическим методом и проблемы её автоматизации // Сб. тр. 6 Межд. форума "Технологии безопасности". - М.: Защита-экспо, 2001. - С. 187-189.

20. Белозеров В.В., Буйло С.И., Прус Ю.В., Рудковская Л.М. Термоакустические исследования полимеров и композитов // Сб. тр. Межд. конф. "Порядок, беспорядок и свойства оксидов" (ODPO-2002, 9-12.09.2002,Сочи). - Ростов н/Д: РГПУ, 2002. - С. 23-25.

21. ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность. Общие требования.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 7 августа 2009 г.