УДК 614.84:621.313; 67.2+691; 004.33+004.052.32
ББК 32.97+39.808+65.9

Рецензенты:

Прус Ю.В. – доктор физико-математических наук, профессор, начальник научно-образовательного комплекса организационно-управленческих проблем Академии государственной противопожарной службы МЧС России;

Лукиянов А.Д. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета.

Б__ Модели диагностики надежности и безопасности СВТ и АСУ объектов техносферы /В.В. Белозеров, А.Ю. Любавский, С.Н. Олейников – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2015. – 110 с.

ISBN 9785913273574

DOI: 10.17513/np.133

В данной монографии рассматриваются принципы, сущность, методы и средства определения надежности и безопасности средств вычислительной техники (СВТ) и различных автоматизированных систем управления (АСУ) объектами, в которых она используется.

Книга предназначена для научно-педагогических работников, разработчиков СВТ и проектировщиков АСУ, инженерно-технических работников создающих и эксплуатирующих АСУ различными хозяйствующими объектами.

Книга будет полезна студентам, аспирантам и докторантам ВУЗов и НИИ, занимающихся автоматизацией и информационными технологиями.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Раздел I. ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ, ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Глава 1. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

- 1.1. Вероятностно-физическая модель надежности ЭРЭ и изделий из них
- 1.2. Вероятностная физико-химическая модель пожарной опасности ЭРЭ и изделий из них
- 1.3. Вероятностно-физическая модель электрической опасности ЭРЭ и изделий из них
- 1.4. Термодинамическая модель надежности и безопасности изделий

Глава 2. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

- 2.1. Математическая модель стендовых испытаний
- 2.2. Методология реализации ускоренных испытаний электроприборов

Глава 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГОНА И ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- 3.1. Анализ результатов исследований ЭП, РЭА и СВТ
- 3.2. Модульные системы термоэлектронной защиты в автоматизации технологического прогона и приемо-сдаточных испытаний ЭП, РЭА и СВТ

Глава 4. «ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ» ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ В РАДИОИЗВЕЩАТЕЛИ ТЕХНОСФЕРНОЙ ОПАСНОСТИ И ЕЁ НАВИГАЦИИ

- 4.1. Интеллектуализация холодильников
- 4.2. Интеллектуализация телевизоров и других бытовых ЭП

Глава 5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КВАЛИМЕТРИИ ЭП, РЭА И СВТ

- 5.1. Модель контроля производителя ЭП, РЭА и СВТ
- 5.2. Модель контроля наработки и отказов ЭП, РЭА и СВТ
- 5.3. Синтез автоматизированной системы квалиметрии ЭП, РЭА и СВТ
- 5.4. Тиражирование системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО РАЗДЕЛУ 1

Раздел II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВРЕДА ОТ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Глава 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ «ВРЕДА»

6.1. Существующие способы и устройства обнаружения опасностей

6.2. Способы измерения качества и количества потребляемой электроэнергии

Глава 7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПОЖАРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО «ВРЕДА» И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОЖАРОВ ОТ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

7.1. Синтез системы определения ПЭВ

7.2. Достоверность и надежность предотвращения пожаров ЭП

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

Раздел III. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Глава 8. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

8.1. Экспоненциальное распределение

8.2. Распределение Пуассона

8.3. Усеченное нормальное распределение

8.4. Гамма распределение

8.5. Распределение Вейбулла

8.6. Логарифмически нормальное распределение

Глава 9. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

9.1. Диффузионное монотонное распределение

9.2. Вероятностно-кинетический подход к надежности СВТ в АСУ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

ПРЕДИСЛОВИЕ

В монографии обоснована необходимость разработки новых и эффективных методов испытаний и диагностики изделий электронной техники (ИЭТ), радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), электротехнического оборудования, электроприборов (ЭП) и средств вычислительной техники (СВТ) в аспектах качества, надежности и безопасности.

Разработка и бурное внедрение новейших информационно-коммуникационных технологий, а также тенденции «глобальной компьютеризации» в науке, технике и в быту, требуют решения вопросов надежности и безопасности СВТ на принципиально новом уровне.

Рассмотрены вопросы качества и количества потребляемой электроэнергии ЭП, РЭА и СВТ. Проведен анализ существующих типов датчиков и систем обнаружения опасностей техносферы. Разработан способ определения пожарно-электрического вреда и электросчетчика-извещателя, регистрирующего опасные факторы на различных объектах и в жилом секторе.

В монографии проведен анализ методов оценки надежности и безопасности ИЭТ, РЭА, ЭП и СВТ, на основании которого разработаны методы, модели и средства повышения надежности АСУ.

В разделе I приведены результаты системного анализа и вероятностно-физического моделирования решения проблем надежности и безопасности с помощью новых технологий:

- ускоренного технологического прогона ЭП и СВТ, который с помощью модулей термоэлектронной защиты позволяет за счет электро-термоциклирования осуществить тепловую локацию комплектующих его ЭРЭ, и обнаружить отклонения от расчетных коэффициентов нагрузки, что позволяет вычислить надежность и пожаробезопасный ресурс каждого изделия,
- обнаружения пожароопасных отказов ЭРЭ в ЭП и СВТ по лавинному росту температуры с отключением электроприбора от сети, с предотвращением, таким образом, его загорания,
- обнаружения такими «интеллектуальными» электроприборами других опасных факторов (дыма, газа и т.д.) в помещениях, где они эксплуатируются.

Используя указанные решения, а также «электронную этикетку», синтезирована Интернет – система, реализующая синергетическую концепцию квалиметрии электроприборов в реальном масштабе времени, включая контроль контрафактной продукции.

В работе показана логическая и функциональная связи предлагаемой концепции квалиметрии с концепцией «интеллектуальных зданий» («умного дома»).

В разделе II систематизированы методы и средства обнаружения опасностей и, с помощью нового понятия «пожарно-электрического вреда» синтезирована технология и устройство его диагностики и управления им на объектах промышленности и в жилом секторе.

В разделе III, предложенные в предыдущих главах методы и средства, распространены на СВТ, сети и АСУ.

В написании монографии принимали участие:

Раздел I (главы 1-5) *Белозеров Валерий Владимирович* – начальник Испытательного вычислительно-информационного центра НИИ физики Южного федерального университета, доктор технических наук, доцент, профессор Российской академии естествознания, академик Всемирной академии наук комплексной безопасности.

Раздел II (главы 6,7) *Олейников Сергей Николаевич* – зам. начальника факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии государственной противопожарной службы МЧС России, кандидат технических наук.

Раздел III (главы 8,9) *Любавский Алексей Юрьевич* – преподаватель кафедры информационных технологий Академии государственной противопожарной службы МЧС России.

РАЗДЕЛ I

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ, ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Глава 1. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

Разработка и бурное внедрение новейших информационно-коммуникационных технологий, а также тенденции «глобальной компьютеризации» в науке, технике и в быту, обуславливает необходимость разработки новых и эффективных методов проектирования, производства и испытаний изделий электронной техники (ИЭТ), радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), электро-технического оборудования и электроприборов (ЭП) в аспектах качества, надежности и безопасности.

В настоящее время для оценки надежности и безопасности электроприборов, машин, сооружений и объектов общепринятым в науке и практике считаются статистические методы [1-4]. При этом, несмотря на научную обоснованность необходимости применения, и других видов статистических распределений [5,6], и термодинамического подхода [7,8] при их конструировании, производстве и испытаниях, все международные и национальные нормативные и методические документы используют, как правило, экспоненциальные распределения, что, безусловно, искажает все показатели качества, надежности, долговечности и безопасности изделий [9,10].

Поэтому, постулируя **КАЧЕСТВО**, как *способность безопасной работы* объекта (потребления услуги) *во времени*, т.е. как **долговечность** и **надежность** (т.к. работоспособность во времени это по определению и есть надежность), **с минимальной общественной опасностью** (т.е. с минимальными материальными и моральными потерями), была разработана «Концепция общей безопасности» [10] и на протяжении нескольких лет разрабатывались отдельные модели вероятностно-физической методологии оценки надежности, долговечности и безопасности объектов и процессов [11-13], в том числе ИЭТ, различной РЭА [14-16], лабораторных и бытовых ЭП [17-19], как основы количественного метода квалиметрии.

Проблемы надежности, отказоустойчивости, старения и деградации свойств полупроводников, диэлектриков и проводниковых структур, используемых в ИЭТ, РЭА и ЭП, включают в себя вопросы оценки их физико-химического состояния. Проблема измерения надежности любого объекта, т.е. его количественная оценка, которая в настоящее время еще не разрешена, связана с основным понятием в теории и практике надежности - отказом, событием, заключающимся в нарушении работоспособности изделия [1,2,4].

Правильное понимание физической природы отказов, их причин и корректное математическое описание явлений, лежащих в основе этой природы отказов, являются важнейшими условиями успешного решения всех практических задач надежности изделий. Однако адекватный выбор теоретической модели, описывающей отказы высоконадежных элементов, в частности, интегральных микросхем, полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов и других электрорадиоэлементов (ЭРЭ), из которых состоят ИЭТ, РЭА и ЭП, оказывается не простой задачей, так как в отличие от моделей

отказов для слабо надежных элементов, например, механических объектов, для ЭРЭ нельзя получить выборку отказов всех поставленных на испытание элементов [5,6].

Следствием деградации физико-химических свойств полупроводников, диэлектриков и проводниковых структур, применяемых в изделиях, является их опасность для человека и окружающей его среды, с точки зрения диссипации запасенной или преобразуемой ими энергии, которая, помимо потери работоспособности при отказе, может привести к пожару, взрыву и другим опасным факторам [10-19].

Общепринятое деление отказов ЭРЭ на так называемые "внезапные" и "постепенные", приводящие к неоднозначному выбору вероятностных моделей отказов, в последнее время все более отклоняется [6-9].

Обычно отказ считается "внезапным", если не установлена причина отказа и подразумевается, что он появился в результате мгновенного изменения наблюдаемых параметров, т.е. отрицается существование каких-либо физических деградационных процессов - истинных причин, предшествующих появлению отказа. Часто оказывается, что отказ представляется "внезапным" лишь потому, что исследователи не в состоянии пока проконтролировать изменение всех определяющих параметров, способных вызвать отказ [6].

Физические модели отказов полупроводниковых приборов и многих ЭРЭ описаны довольно подробно [1,5-10], поэтому просто перечислим основные, которые обычно протекают в них: *механические разрушения, интерметаллизация, электромиграция, теплоэлектрический пробой, генерация и перемещение зарядов на поверхности кристаллов, коррозия, плавление, образование поверхностных плёнок, старение материалов.*

Таким образом, физическая природа "внезапных" и "постепенных" (с известной природой) отказов одна и та же - это результат необратимых деградационных процессов, протекающих в любом ИЭТ, РЭА и ЭП во время изготовления, эксплуатации, хранения или испытания. Только в первом случае процесс деградации протекает очень быстро, что приводит к отказу и к скачкообразному изменению контролируемого параметра, и поэтому сам факт появления отказа представляется неожиданным ("внезапным") для исследователя. Во втором же случае, определяющий параметр, вызывающий отказ, постоянно контролируется и его приближение к предельному значению не является неожиданным.

1.2 Вероятностно-физическая модель надежности изделий

Модель включает в себя определение «текущих» интенсивностей и вероятностей отказов элементов изделий по модифицированному уравнению Аррениуса-Эйринга [20,21]:

$$\lambda = A(P, V, N, F) \frac{kT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \exp[f(H)] \quad (1.1)$$

где λ - текущая интенсивность отказа элемента, 1/час; $A=k_i \cdot \lambda_0$ – произведение безразмерных коэффициентов, зависящих от давления, влажности, вибраций и т.д.) на интенсивность отказов при хранении (λ_0), 1/час; k - постоянная Больцмана, $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T - температура элемента, °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:

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;

технико-экономическим – количества ЭРЭ в РЭА и ЭП измеряются десятками, сотнями и тысячами, поэтому на каждый элемент СИ не поставить.

Решение было найдено путем термозондирования внутреннего объема изделия $[T(t)]$ и окружающего воздуха $[T_{\text{возд}}(t)]$, а также измерением потребляемой изделием энергии $[E(t)]$, при известных минимальных ($\lambda_{\min}$), номинальных ($\lambda_{\text{ном}}$) и максимальных ($\lambda_{\max}$) значениях интенсивности отказов всех элементов [22-25]. Единственным допущением считалось то, что все элементы расположены на платах, установленных регулярно (вертикально или горизонтально с определенным шагом), у каждой из которых также измеряется потребляемая энергия $[W_p(t)]$, тогда решением уравнений теплового баланса и Навье-Стокса (прямая и обратная задачи тепловой локации), **определялись все текущие коэффициенты энергетических нагрузок элементов** $[E_L(t)]$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + Nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) - Nu \cdot \alpha \cdot V_x; \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + Nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) - Nu \cdot \alpha \cdot V_y + \beta \nabla T; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \eta \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{Q}{C \rho_0 D}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \rho_0 \cdot \frac{\partial V}{\partial y}; \\ \beta \cdot S_u \cdot \varepsilon (T^4 - T_{\text{возд}}^4) + \alpha \cdot S_u (T - T_{\text{возд}}) - W_p = 0; \\ W_p = B_L \cdot P_L \cdot E_L \cdot W; \\ f(H) \approx E_L = (\beta \cdot S \cdot \sigma (T^4 - T_{\text{возд}}^4) + \alpha \cdot S (T - T_{\text{возд}})) / (W_L \cdot B_L \cdot P_L) \end{array} \right. \quad (1.2)$$

где $\alpha, \beta, \rho, \eta$ - коэффициенты, Nu - число Нуссельта; C - теплоемкость, D - расстояние, σ - постоянная Стефана-Больцмана, S_u - 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.).

Знание функций энергетической нагрузки ЭРЭ - $f(H)$, превращало λ в функцию, у которой для любого ЭРЭ известны минимальное (λ_0), номинальное ($\lambda_{ном}$), максимальное (λ_{max}) значения интенсивности отказов, а также интенсивность отказов при хранении (λ_{xp}), что позволяло построить и аппроксимировать «семейство» λ -кривых в плоскость, ограниченную кривыми $\lambda_{xp}(T)$ и $\lambda_{max}(T)$. Далее, логарифмированием получалась функция эффективной энергии активации отказов каждого ЭРЭ - $E_{ai}(H, T)$.

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, влажности, вибрации и т.д.), получаем **текущие интенсивности отказов ЭРЭ**, т.е. функции $\lambda(H, T, P)$, которые можно описать γ -распределениями и нельзя описывать экспоненциальными распределениями [22].

Именно с помощью термозондирования тепловых потоков от ЭРЭ позисторами, на которые был получен Патент РФ № 2060566 от 20.05.96 [23], удалось устранить ограничения, возникающие при решении указанного уравнения (1.2) в двумерном приближении Обербека-Буссинеска в «прямой и обратной задачах» тепловой локации элементов, чтобы получить значения функции нетермической нагрузки $f(H)$ [24,25].

Как оказалось, полученные функции интенсивности отказов можно описывать γ -распределениями [22]. 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 двустороннему 100% доверительному интервалу

$$F(\lambda, B, C) = \int_0^{\lambda} \frac{(\lambda/B)^{C-1}}{B \cdot \Gamma(C)} \exp(-\lambda B) d\lambda \quad \text{при } B > 0, C > 0,5, \Gamma(C) \text{ - гамма-функция} \quad (1.3)$$

т.е. по заданным ее квантилям $\lambda_n = \lambda_{min}$ и $\lambda_g = \lambda_{max}$ уровней вероятности соответственно L и $1-L$, где $L = (1-p)/2$, к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} F(\lambda_n, \hat{B}, \hat{C}) = \frac{1-p}{2} \\ F(\lambda_g, \hat{B}, \hat{C}) = \frac{1+p}{2} \end{cases} \quad (1.4)$$

с последующей заменой переменной $x = 2\lambda/B$, переводящей γ -распределение в обобщенное χ^2 – распределение (для снятия ограничений относительно целочисленности ν), после чего делением одного уравнения на другое находится:

$$q(\nu) = \lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{н}} \quad (1.5)$$

Полученные значения $q(\nu) = \chi^2_{1-L}(\nu)/\chi^2_L(\nu)$ являются монотонной функцией от ν , имеющей при $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{н}} > 0$ единственный корень, а по вычисленному ν (а следовательно, и $C = \nu/2$), находится и второй параметр γ -распределения:

$$B = 2\lambda_{\text{н}}/\chi^2_L(\nu) = 2\lambda_{\text{в}}/\chi^2_{1-L}(\nu). \quad (1.6)$$

Для реализации стендовых испытаний по данной методологии, необходимо было найти условия корректного ускорения испытаний, которые, как правило, осуществляются «термо-баро-электро-циклированием» с коэффициентом ускорения $K_{\text{У}}$, равным [22,25]:

$$K_{\text{У}} = K_{\text{НТЦ}} \cdot K_{\text{В}}, \quad (1.7)$$

где $K_{\text{В}}$ – коэффициент учета внешней среды (влажности, давления, вибраций и т.п.), кроме температуры и электрической нагрузки;

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

Сопоставляя уравнения 1.1 и 1.7, найдем выражение для $K_{\text{У}}$:

$$K_{\text{У}} = K_{\text{В}} \cdot K_{\text{НЦ}} \cdot K_{\text{Т}}, \quad (1.8)$$

где $K_{\text{В}} = A(P, V, W, N)$ – коэффициент (функция) учета внешней среды, независимый от изменения электрической нагрузки и слабо коррелирующий с изменениями температуры;

$K_{\text{Т}} = kT \cdot \exp(-E_{\text{а}}/kT)$ – коэффициент (функция) учета влияния температуры, независимый от изменений внешней среды и слабо коррелирующий с изменениями электрической нагрузки;

$K_{\text{НЦ}} = \exp[f(H)]/h$ – коэффициент (функция) учета влияния электрической нагрузки, независимый от изменений внешней среды и слабо коррелирующий с изменениями температуры, характеризуемый функцией нагрузки $f(H)$, рекомендуемыми значениями которой являются значения равные 0,2–0,9 от – номинальных, при этом $f(H)=0$ 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 $W_{\text{РАБ}}$ к нагрузке $W_{\text{НОМ}}$ номинального режима [5,6,21]:

$$f(H) = W_{\text{РАБ}} / W_{\text{НОМ}},$$

где в качестве нагрузки W для ЭРЭ обычно выступают – мощность (для транзисторов, резисторов, микросхем), – напряжение (для конденсаторов, разъемов), – сила тока (для диодов, выключателей), – плотность тока в обмотке (для трансформаторов, дросселей).

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

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

$$\lambda \cdot t = \lambda_P \cdot t_P + \lambda_{Ц} \cdot v \cdot t + \lambda_{ОЖ} \cdot t_{ОЖ}, \quad (1.8)$$

где, в соответствии с вышеприведенными уравнениями предполагается, что

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_{ном} \cdot K_{HTЦ}, \\ \lambda_P = \lambda_{ном} \cdot K_{HTЦ} \cdot K_T = \lambda_{ном} \cdot g(H, T), \\ \lambda_{ОЖ} = \lambda_{ном} \cdot K_{HTЦ} \cdot K_T = \lambda_{ном} \cdot g(0, T), \end{cases} \quad (1.9)$$

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 продолжительности:

$t_{Ц.P} = r/v$ - рабочей стадии цикла, час.,

$t_{Ц.ОЖ} = (1-r)/v$ - нерабочей стадии цикла, час.,

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

$$T_P = \frac{1}{t_P} \int_{\{t'\}} T(t) dt \quad (1.10)$$

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);

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

$$T_{ОЖ} = \frac{1}{t_{ОЖ}} \int_{\{t''\}} T(t) dt \quad (1.11)$$

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

$$K_{HTЦ} = r \cdot g(H, T_P) + (1 - r) \cdot g(0, T_{ОЖ}) + q \cdot v, \quad (1.12)$$

где $q = \lambda_{Ц} / \lambda_{ном}$

Совмещая испытания на функционирование и надежность, и подбирая план испытаний РЭА и ЭП (диапазоны режима «термо-баро-электро-циклирования»), можно контролировать «обратимые» и «необратимые» процессы в ЭРЭ, в т. ч. по модифицированной формуле Аррениуса-Эйринга, где S_o - энтропия отказа [22]:

$$\lambda = K_{HTЦ} \lambda_H \frac{kT_o}{h} \cdot \exp\left(-\frac{S_o}{k}\right) \cdot \exp[f(H)] \quad (1.13)$$

Таким образом, получаем возможность продуктивно использовать экспериментальный этап, во-первых, для уточнения интенсивностей отказов $\lambda_{мин}$ и $\lambda_{ном}$ (в режиме хранения и номинальном режиме), если баро-термо-электро-цикл «охватывает» интервал интенсивностей отказов от хранения ЭРЭ до номинального режима, а во-вторых, для получения значений функции производства энтропии - ΔS , логарифмируя «соседние» значения λ -функции и вычисляя их разность.

1.3. Вероятностная физико-химическая модель пожарной опасности изделий.

Разработанные модели и методология БЭТА-анализа (испытаний) веществ и материалов, позволили поставить и начать решение проблемы количественного определения физико-химических параметров ЭРЭ и РЭА, обуславливающих их эксплуатационную устойчивость и пожарную опасность, а также по аналогии с долговечностью ввести понятие *пожаробезопасного ресурса*, который рассчитывается по термодинамическим и вероятностно-физическим моделям [26].

Было показано, что функция распределения вероятностей $F_{\mathcal{E}}(Q)$ возможных дополнительных тепловыделений Q в элементе $\mathcal{E}$ при условии его отказа определяется по общему для всех ЭРЭ правилу:

$$F_{\mathcal{E}}(Q) = 1 - v_{\mathcal{E}} \cdot [1 - G_{\mathcal{E}}(z)], (Q > 0), \quad (1.14)$$

где $v_{\mathcal{E}}$ - доля пожароопасных отказов среди всех отказов элементов данного типа в рассматриваемых условиях; $G_{\mathcal{E}}(z)$ - условная функция распределения (при возникновении пожароопасного отказа) случайной величины $z = \lg Q$ ЭРЭ.

При этом, случайная величина Q рассматривается как функция случайных аргументов I и t (R и t), исходя из общего выражения для "Джоулева тепла":

$$Q = k \cdot U \cdot I \cdot t = k \cdot U^2 \cdot t / R, \quad (1.15)$$

где I, R - случайные, усредненные за время t значения силы тока и сопротивления в ЭРЭ; U - рабочее напряжение на ЭРЭ; k - коэффициент пересчета электрической мощности в тепло, с учетом режима работы ЭРЭ.

Для случайных величин $\lg I = \lg U - \lg R$, $\lg t$, $\lg R$ - принимались нормальные распределения и учитывались их коэффициенты корреляции r ,

что хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными [25], вследствие чего функция $F(Q)$ берется для вычислений в следующем виде:

$$F_Z(Q) = 1 - v_Z + v_Z \cdot \Phi [(z - M_Z) / \delta_Z] \quad (1.16)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2 / 2) dt, \text{ - стандартная функция нормального распределения}$$

M_Z - математическое ожидание случайной величины $z = \lg Q$;

δ_Z - среднеквадратическое отклонение величины z ;

Флуктуациями параметров распределений величин U , I , R в моделях пожароопасных отказов, влияющими на параметры M_Z и δ_Z , пренебрегаем, считая, что уже имеем их усредненные данные по быстротекущим процессам пробоев, коротких замыканий и т.п.

Случайная величина $z = \lg Q$ (для удобства применения имеющихся данных при оценке параметров m_z и δ_z) представлена в формуле (1.14) двумя выражениями (1.15).

В первом случае имеем [22]:

$$Q = kU^2 t / R,$$

где k и U - постоянные.

Относительно случайных величин $x = \lg t$ и $y = \lg R$ предполагается, что они имеют совместное двумерное нормальное распределение, определяемое параметрами $m_1, m_2, \delta_1, \delta_2, r$, где m_1, m_2 - математические ожидания величин x и y ; δ_1, δ_2 - их дисперсии; r - коэффициент корреляции между x и y . При этом плотность вероятности $P(x, y)$ совместного распределения x и y имеет вид

$$P(x, y) = \frac{\exp\left\{-\left[(x - m_1)^2 / \delta_1^2 - 2r(x - m_1)(y - m_2) / \delta_1 \delta_2 + (y - m_2)^2 / \delta_2^2\right] / 2(1 - r^2)\right\}}{2\pi \delta_1 \delta_2 \sqrt{(1 - r^2)}}$$

а частные распределения случайных величин x и y - нормальные с параметрами m_1, δ_1 и m_2, δ_2 , оценки которых считаются известными.

Согласно (1.16) $z = \lg Q = c_1 + x - y$, где $c_1 = \lg(kU^2)$ - постоянная. Отсюда $m_z = c_1 + m_{x-y}$, $\delta_z = \delta_{x-y}$, но распределение суммы (разности) величин x, y , подчиненных совместно распределению $P(x, y)$, как известно [27], является нормальным, и окончательно для данного случая (1.16) в принятых обозначениях имеем:

$$m_z = c_1 + m_1 - m_2,$$

$$\delta_z = \sqrt{\delta_1^2 - 2r\delta_1\delta_2 + \delta_2^2} \quad (1.17)$$

где $c_1 = \lg(kU^2) = \lg k + 2\lg U$.

Во втором случае имеем:

$$Q = k \cdot U \cdot I \cdot t,$$

и в предположении совместного нормального распределения величин $x = \lg t$ и $y = \lg I$ с параметрами $m_1, m_3, \delta_1, \delta_3, r^*$ (где m_3, δ_3 - параметры частного

распределения случайной величины v , а r^* - коэффициент корреляции между x и v) аналогично предыдущему приходим к выражениям:

$$z = \lg Q = c_2 + x + v,$$

$$m_z = c_2 + m_1 - m_3, \quad (1.18)$$

$$\delta_z = \sqrt{\delta_1^2 - 2r^* \delta_1 \delta_3 + \delta_3^2}$$

где $c_2 = \lg(kU) = \lg k + \lg U$.

Следует заметить, что при $I = U/R$ имеем $V = \lg U - y$, маргинальные (частные) распределения v и y оказываются взаимно обусловленными и из нормальности одного вытекает нормальность другого, при простых соотношениях параметров: $m_3 = \lg U - m_2$, $\delta_3 = \delta_2$, $r^* = -r$. Таким образом, с учетом соотношения $c_2 = c_1 - \lg U$ формулы (1.18) оказываются эквивалентными формулам (1.17).

Входящий в выражения (1.17) коэффициент корреляции r может быть оценен обычными способами в зависимости от характера имеющихся данных: по выборке пар (x_i, y_i) , по группированным данным и т.п.

Оценка r должна согласовываться с линейным среднеквадратическим уравнением регрессии величины y относительно x , которое проходит через точку (m_1, m_2) и имеет вид

$$y = m_2 + r \cdot \delta_2 / \delta_1 \cdot (x - m_1), \quad (1.19)$$

или в более симметричном виде,

$$(y - m_2) / \delta_2 = r \cdot (x - m_1) / \delta_1, \quad (1.20)$$

Теоретический вид функции условного математического ожидания $m(y|x)$ является необходимым условием утверждения вида $P(x)$.

Поэтому все применяемые в (1.17) оценки $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, r$ должны согласовываться (с учетом доверительных интервалов) с получаемой по методу наименьших квадратов регрессионной прямой вида (1.20). При этом теоретическое значение остаточной дисперсии равно

$$\delta^2(y|x) = \delta_2^2 \cdot (1 - r^2)$$

Для вычисления входящей в выражение (1.14) $F_9(Q)$ функции распределения вероятностей нормального закона

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

могут быть использованы различные известные аппроксимации.

Таким образом, для оценки пожарной опасности материалов и ЭРЭ из них, разработана модель, в которой тепло пожароопасного отказа ЭРЭ, вычисляемое по логнормальным функциям распределения дополнительного тепловыделения (1.14), нагревая электрорадиоматериал (ЭРМ), воспламеняет его при переходе процессов деструкции и пиролиза ЭРМ в самоускоряющуюся фазу по критерию

Семёнова ($Se=0,368$), что вполне допустимо, принимая во внимание лавинообразный характер пожароопасного отказа [9,22]:

$$Se \leq \frac{Q \cdot V \cdot a^n}{\alpha_m \cdot S} \cdot \frac{E_a}{RT^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1.21)$$

где Q - тепловыделение пожароопасного события, Дж./сек.; V - объём ЭРМ, м³; S - площадь поверхности ЭРМ, м²; R - газовая постоянная, 8.31441 Дж/моль · °К; α_m - коэффициент теплоотдачи ЭРМ, Вт/°К · м²; E_a - эффективная энергия активации процессов в ЭРМ, Дж/моль; T - рабочая температура ЭРМ, °К; K - предэкспоненциальный множитель, получаемый по результатам термоаналитических испытаний ЭРМ; a^n - концентрация и порядок реакции в конденсированной фазе.

Одновременно проверяется выполнение условия зажигания каждого соседнего ЭРЭ, при возникновении пожароопасного отказа в - данном, по критическому тепловому потоку Зельдовича [9,22]:

$$\frac{Q}{S} > Ze \geq \sqrt{2\lambda_b \cdot \frac{RT^2}{E_a} \cdot H \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (1.22)$$

где H - тепловой эффект реакций пиролиза и деструкции ЭРМ, Дж./с; λ_a - теплопроводность газовой фазы, Вт/м · °К (остальные обозначения переменных такие же, как в 1.21).

Численное определение всех параметров обоих неравенств оказывается возможным, если в базе данных есть «образ» - ВФЖЦ материалов, из которых изготовлены ЭРЭ [17], путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} Ze = \sqrt{2\lambda_b \frac{RT_{\Pi}^2}{E_a} \cdot H \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\Pi}}\right)}; \\ Se = \frac{Q \cdot V}{S \cdot \alpha} \cdot \frac{E_a}{RT_{\Pi O}^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\Pi O}}\right); \\ F_k = \frac{Q \cdot r^2}{\lambda_o} \cdot \frac{E_a}{RT_o^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_o}\right); \end{cases} \quad (1.23)$$

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 Семёнова ($Se=0,368$); Q - теплота, подведенная к образцу; V - текущий объём 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.

Расчеты по системе уравнений (1.23) проводятся для каждого элемента пожарной нагрузки объекта и его «соседей», для чего необходима их топология, а для вероятностной оценки результатов расчета вводится функция «индикатор события», формирующая из топологии элементов пожарной нагрузки на объекте «матрицу загораний» [22,25]:

$$U = \begin{cases} 1, & \text{если загорание произошло} \\ 0, & \text{если загорание не произошло} \end{cases} \quad (1.24)$$

Вероятность распространения огня (Fp), т.е. распространения загорания «на соседа», формируется с помощью той же функции «индикатор события» по уравнению Семенова (1.21) «для соседа» при критической плотности теплового потока Зельдовича, к которому добавляется дополнительный тепловой поток - $\Delta Q_{\text{э}}$, обусловленный теплотой сгорания (пожаропроизводительностью) воспламенившегося ЭРМ [10,19]:

$$\frac{Q_{\text{г}} \cdot m_{\text{э}} + Q}{S} > Ze \geq \sqrt{2\lambda_{\text{в}} \cdot \frac{RT^2}{E_{\text{а}}} \cdot \frac{H}{K} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{а}}}{RT}\right)} \quad (1.25)$$

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

Математическая модель и алгоритмы, реализующие эти процедуры, позволяют определить:

$\lambda_{\text{ПО}} = \lambda \cdot \sum v_{\text{э}}$ - интенсивности пожароопасных отказов ЭРЭ, как произведение текущей интенсивности отказа (1.1) на сумму долей пожароопасных отказов (КЗ, пробой, обрыв) в общей статистике их отказов;

$\lambda_{\text{В}} = \lambda_{\text{ПО}} \cdot F_{\text{э}}$ - интенсивности воспламенений элементов, как произведение интенсивности пожароопасных отказов ЭРЭ на вероятность (1.14) дополнительного тепловыделения - $Q_{\text{э}}$, достаточного для самовоспламенения ЭРМ по Семенову (1.21);

$F_{\text{В}} = \int \lambda_{\text{В}} d\lambda_{\text{В}}$ - вероятности воспламенений ЭРЭ, как интеграл функции интенсивности их воспламенений;

$Fp = F(Q_{\text{э}} + \Delta Q_{\text{э}})$ - вероятность распространения огня, как вероятности дополнительного тепловыделения ЭРЭ и горения ЭРМ, достаточного для «зажигания соседнего ЭРЭ» по Зельдовичу (1.25);

$F_{\text{п}} = F_{\text{В}} \cdot Fp$ - вероятность пожара, как произведение совместных событий – воспламенения по Семенову и распространения по Зельдовичу.

Тогда при стендовых испытаниях появляется возможность проверки полученной «матрицы пожара» на соответствие стандарту [2].

1.5. Вероятностно-физическая модель электрической опасности изделий

Все существующие международные (МЭК) и национальные стандарты (ГОСТ Р) устанавливают качественные методы оценки электробезопасности. Изделия и оборудование считаются электробезопасными для потребителя, если при фактических размерах конструкции изделий, установленных на пробойных установках соответствующих напряжений (1 кВ, 2.7кВ, 6кВ и т.д.), пробой не наступает. Такой критерий не дает возможности прогноза и вероятностной оценки указанной опасности в зависимости от условий эксплуатации изделий и оборудования (давления, влажности, температуры), не учитывает процессы «старения», в результате которых изменяется и диэлектрическая проницаемость

ЭРМ, и другие физические параметры, влияющие на их устойчивость и электробезопасность [11,17].

Вероятностно-физический подход в оценке электроопасности заключается в том, что в качестве расчетно-экспериментального метода можно применить ту же логнормальную модель (1.14), где под током в цепи будет подразумеваться ток Таунсендовского разряда, зависящий от давления, напряжения и расстояния пробоя по закону Пашена, с коэффициентами ионизации, определяемыми из уравнения Ленгмюра-Саха [20,22]:

$$\begin{cases} I = \frac{I_{oi} \exp(\alpha_i d_i)}{1 - \gamma_i [\exp(\alpha_i d_i) - 1]} \\ U_m = F\left(\frac{U_i}{P \cdot d_i}\right) \\ \alpha_i = \frac{g_i}{g_a} \exp\left[-\frac{e(\varphi - U_i)}{kT}\right] \end{cases} \quad (1.26)$$

где I - ток разряда; I_{oi} - плотность тока; α, γ - первый и второй коэффициенты Таунсенда; d - междуэлектродное расстояние; g_i, g_a - статистические веса ионного и атомного состояний; e - заряд электрона; φ - потенциал выхода; U_i - потенциал ионизации; k - постоянная Больцмана; P - давление газа; U_m - минимальное напряжение пробоя; T - температура

Далее, через функцию "индикатор события" (1.24) полученный результат "разводится" по вероятностям последствий пробоя (поражения человека, энергии зажигания и т.п.).

В настоящее время наработан исследовательский материал, доказывающий изменение условий ионизации при наличии высокочастотных полей, что позволяет прогнозировать процессы пробоя на высоких частотах и, как следствие, оценивать электроопасность в блоках и модулях электро, радиооборудования, где практически все электрические напряжения и подводящие их цепи питания сопровождаются электромагнитными колебаниями широкого спектра частот [20].

1.6. Термодинамическая модель надежности и безопасности

Термодинамический подход к проблеме надежности известен [7], а вот применение его к проблемам безопасности разрабатывается сравнительно недавно [8,22,25], поэтому рассмотрим его использование для объектов различной структуры (изделия, оборудование, здания и т.д.), отметив следующие особенности:

- универсальный характер термодинамических моделей и методов относительно объектов и процессов различной физической природы и сложности;
- кинетический характер термодинамических моделей, отражающих реальные необратимые процессы и явления, включая фактор времени в явном виде;
- свойство аддитивности термодинамических функций и их интегральный характер (в виде интегральной физики дефектов-отказов);

- возможности прямого и косвенного инструментального измерения термодинамических параметров объектов разной степени сложности.

Указанные особенности проявляются и в энергетике взаимодействия объектов с внешней средой (1-й закон термодинамики), и в направленности и динамике необратимого изменения состояния объектов (2-й закон термодинамики). Объединяющим 1-й и 2-й законы термодинамики является уравнение Гиббса [7,8]:

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_j dN_j, \quad (1.27)$$

или в обобщенной форме:

$$dU = \sum X_j dY_j \quad (1.28)$$

Это выражение представляет типичную структуру термодинамических соотношений, включающих два класса параметров системы:

интенсивные или локальные параметры типа X_j существуют для каждой локальной точки системы (температура, плотность, давление) и имеют смысл термодинамических сил;

экстенсивные или интегральные параметры типа Y_j принадлежат системе в целом (масса, объем, энтропия) и подчиняются свойству аддитивности равновесных значений параметров, а в трехмерном случае - градиентами интенсивных параметров;

Свойство аддитивности экстенсивных параметров позволяет адекватно представлять сложные, гетерогенные, многокомпонентные физические среды как суперпозицию соответствующих подсистем, без усложнения применяемого аппарата. Указанные свойства, таким образом, являются основой термодинамических методов декомпозиции и агрегирования, позволяющих распространить свойства и характеристики подсистем на системы различного уровня сложности [20].

Рассмотренные термодинамические величины и соотношения вводятся в классической термодинамике для равновесных состояний физических систем при условии протекания квазистатических обратимых процессов, где такие величины, как температура, энтропия, существуют только для равновесных состояний. Реальные физические системы характеризуются принципиально неравновесными состояниями и соответственно необратимыми процессами, поэтому в соответствии с теорией о локальном равновесии можно записать [8]:

$$d_i S/dt = \sum (\partial_i S / \partial y_j) (dy_j/dt) \quad (1.29)$$

или

$$\delta(S) = 1/T \cdot \sum_j X_j^i J_j^i \quad (1.30)$$

Функция $d_i S/dt$ (или $\delta(S)$), называемая производством энтропии, включает составляющие, относящиеся к необратимым процессам различного тензорного ранга: химические реакции, тепловые потоки, перенос вещества, электромагнитные процессы, вязкие явления. Каждая из этих составляющих

содержит два типа сомножителей:

$\overset{(i)}{X_j} = \text{grad} x_j$ - обобщенные внутренние термодинамические силы, определяемые разностью неравновесных и равновесных значений параметров, а в трехмерном случае - градиентами интенсивных параметров;

$\overset{(i)}{J_j} = dy_j/dt$ - потоки или скорости необратимых процессов сопряженные с соответствующими экстенсивными параметрами и определяемые изменением их во времени.

Протекание необратимых процессов сопровождается производством энтропии в результате диссипации энергии:

$$E = \sum \overset{(i)}{X_j} \overset{(i)}{J_j} \quad (1.31)$$

Согласно 2-му закону термодинамики $\Delta S > 0$. При термодинамическом равновесии (вблизи состояния локального равновесия) зависимости между потоками и силами линейны:

$$\overset{(i)}{J_j} = \sum_k \overset{(i)}{L_{jk}} \overset{(i)}{X_k}, \quad (\overset{(i)}{X_j} = 0 \text{ и } \overset{(i)}{J_j}, \Delta S = 0) \quad (1.32)$$

где $\overset{(i)}{L_{jk}}$ - линейные коэффициенты, подчиняющиеся соотношениям Онсагера.

В соответствии с теоремой Пригожина общее условие устойчивости можно записать в виде обобщенных критериев эволюции термодинамических систем по производству энтропии [7]:

неравновесные состояния: $\delta(S) > 0, \Delta\delta(S) > 0$;

стационарные состояния: $\delta(S) = \min, \Delta\delta(S) = 0$;

равновесные состояния: $\delta S = 0, S_0 = \max$.

Используя теорему Пригожина и критерии устойчивости, интегральный критерий эволюции физических систем можно представить в виде

$$y_j(t) - y_j(0) = \sum [l_{jk} \exp(-t/\tau_k)], \quad (1.33)$$

где $y_j(0)$ - неравновесные или стационарные значения соответствующих параметров системы; τ_k - времена релаксации соответствующих необратимых процессов в системе; l_{jk} - кинетические коэффициенты.

Нетрудно видеть, что из производства энтропии в аналогичной форме суперпозиции экспоненциальных функций, можно представить интегральный процесс эволюции (релаксации) любых систем [8,20].

Таким образом, интегральные эволюционные и локальные процессы нарушения термодинамической устойчивости – взаимосвязаны, и связующим звеном вероятностно-физического моделирования между теорией термодинамического равновесия и теорией необратимых процессов является теория флуктуаций, вероятность возникновения которых для равновесных и локально-равновесных состояний выражается формулой Эйнштейна [7]:

$$P = B \exp(\Delta S/k) \quad (1.34)$$

Если определить параметр - B , как «функцию масштаба начальной вероятности флуктуации», которую в данном случае можно получить интегрированием интенсивности отказа при хранении – λ_0 , т.е. из уравнения (1.13), а в качестве P использовать статистическую вероятность отказа, то логарифмирование уравнения (1.33) дает возможность «обратного перевода» вероятностных характеристик в функцию производства энтропии

$$k \cdot (\ln P - \ln B) = \Delta S \quad (1.35)$$

Глава 2. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

При испытаниях изделий на надежность и безопасность всегда приходится решать задачу максимально эффективного использования возможностей их физических (стендовых) испытаний, для подтверждения конструкторских расчетов и качества производственных процессов.

Технико-экономическими ограничениями решения указанной задачи при этом являются [25]:

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

В качестве основных физических ограничений выступают:

- высокая надежность ЭРЭ, как причина слабой или практически нулевой наблюдаемости отказов ЭРЭ некоторых типов даже при продолжительных испытаниях;
- малая доля информативных отказов в общей массе наблюдаемых отказов, т.е. низкий процент однозначно идентифицируемых (параметрических) отказов (дефектность ЭРЭ, несоответствие нагрузочных характеристик и т.д.), в том числе «опасных» (коротких замыканий, пробоев 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 перераспределения отказов по причинам, интенсивностям, формам проявления и т.д.

Указанные ограничения предопределяют место экспериментальных методов в общей схеме проверки испытываемых изделий на соответствие требованиям квалиметрии, 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 вероятностей.

Разработанный критерий сопоставления расчетных величин с результатами стендовых испытаний [22], основывается на учете указанных обстоятельств и «связывается» с разработанными ранее физико-химическими моделями и методами [20], что, по мнению автора, позволяет более точно оценивать все необходимые параметры. При этом решающим обстоятельством в выборе статистического критерия, связываемого с экспериментальными методами, является придание ему свойства относительной нечувствительности к неконтролируемому перераспределению пропорций в интенсивностях отказов ЭРЭ при форсировании испытаний изделий «ударными и циклическими» нагрузками [25].

Ниже представлена математическая модель, позволяющая в дальнейшем её корректно «наполнять» соответствующими физико-химическими критериями оценки.

2.1. Математическая модель стендовых испытаний

Утверждение. Пусть после завершения экспериментальных испытаний с восстановлением отказывающих элементов всего получено N отказов ЭРЭ, в том числе o опасных отказов, m ($m \geq o$) из которых вызвали опасные ситуации (пробой, воспламенение, дым и т.д.). Предположим, что за счет продолжительности форсированных испытаний полученное количество опасных отказов o не слишком мало (иначе статистические выводы окажутся слишком грубыми), а «ударный» режим «термобароциклирования» испытываемых изделий выбран так (в пределах ТУ), что вероятности опасных ситуаций в зонах наибольшей интенсивности отказов высоки (например, выше 0,1).

Обозначим имевшие место опасные отказы через Π_i ($i=1, o$) и будем рассматривать их как осуществленные взаимно независимые испытания, каждое из которых имело возможность завершиться одним из двух исходов - появлением или не появлением события C , означающего опасную ситуацию в изделии (испытания Π независимы именно относительно события C).

Пусть, вычисленные любым способом, вероятности события C в каждом из испытаний Π_i , а $q_i = 1 - p_i$ - вероятности противоположного события C в этих испытаниях. Тогда данная совокупность независимых испытаний Π_i с указанными вероятностями p_i, q_i ($p_i + q_i = 1$) представляет собой обобщенную схему независимых испытаний Бернулли с переменными вероятностями, приводящую к определенному вероятностному распределению возможных значений случайной величины ξ суммарного количества исходов C при реализации совокупности испытаний Π_i ($i=1, o$). Это распределение задается вероятностями $P_k = P(\xi=k)$, где $P(\xi=k)$ - вероятность того, что ξ принимает значение k .

Доказательство. Естественным статистическим критерием расчетных вероятностей является проверка того, что каждая из вероятностей $P(\xi \leq m) = P(\xi \geq m)$ оказывается не меньше $P_i (i=1, \bar{o})$ заранее заданного числа $L/2$, где L - уровень значимости.

Указанные вероятности вычисляются по формулам [10,11,16]:

$$P(\xi \leq m) = \sum_{k=0}^m P_k, \quad P(\xi \geq m) = \sum_{k=m}^o P_k, \quad P_k = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} P_k \quad (2.1)$$

а вероятности $P_k (k = 0, \bar{o})$ для случайной величины ξ , имеющей обобщенное биномиальное распределение с параметрами $(o, p_1, p_2, \dots, p_o)$, $(0 < p < 1, i = 1, \bar{o})$, определяются выражениями:

$$P_k = P(\xi = k) = \begin{cases} \prod_{i=1}^o (1-p_i), & k=0; \\ \sum_{\ell_k=1}^o \dots \sum_{\ell_1=1}^o \prod_{i \neq \ell_1 \dots \ell_k} (1-p_i) \prod_{j=1}^k p_{\ell_j}, & k=1, \dots, o-1; \\ \prod_{i=1}^o p_i, & k=o; \end{cases} \quad (2.2)$$

При этом математическое ожидание $M[\xi]$ и дисперсия $D[\xi]$ случайной величины ξ , как это непосредственно следует из теорем о математическом ожидании и дисперсии, равны

$$M[\xi] = \sum_{i=1}^o p_i, \quad D[\xi] = \delta_\xi^2 = \sum_{i=1}^o p_i(1-p_i) \quad \text{при} \quad \xi = \sum_{i=1}^o \xi_i \quad (2.3)$$

где ξ - взаимно независимые случайные величины, принимающие значения 1 и 0 в испытаниях Π_i , соответственно с вероятностями p_i и q_i , т.е. имеющие распределения Бернулли с параметрами $p_1, p_2, \dots, p_o$ соответственно.

В тех случаях, когда все p_i - невелики, оказывается $M[\xi] \approx D[\xi]$ и подобно обычному биномиальному распределению можно, для упрощения расчетов, аппроксимировать указанное распределение (2.2) с достаточной точностью распределением Пуассона с параметром $\alpha = M[\xi]$, что подтверждается сравнением соответствующих характеристических функций:

$$Y(t) = \prod (p_j \cdot e^j + q_j), \quad (i = \sqrt{-1}) \quad (2.4)$$

Для практического применения является полезным следующее представление дисперсии $D[\xi]$:

$$D[\xi] = o \cdot \bar{p}(1-\bar{p}) - o \cdot \delta_p^2 = o \cdot p \sum_{i=1}^o p_i^2, \quad (2.5)$$

где $\bar{p}$ и δ_p - соответственно выборочное среднее и дисперсия "варианты" p по заданной совокупности значений p :

$$\bar{p} = \frac{1}{o} \sum_{i=1}^o p_i, \quad \delta_p^2 = \frac{1}{o} \sum_{i=1}^o p_i^2 - \bar{p}^2, \quad (2.6)$$

Данное выражение указывает на то, что дисперсия рассматриваемого обобщенного биномиального распределения меньше дисперсии классического

биномиального распределения с параметрами (o, p) , причем меньше ровно на o дисперсий "варианты" p .

Таким образом, при планировании «интервалов электро-термо-баро-ударов» в стендовых испытаниях изделий [24] следует иметь в виду, что если средняя вероятность p будет оставаться постоянной, то максимум дисперсии $D[\xi]$ будет соответствовать случаю $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$, а изменения p_i в сторону их неодинаковости будут уменьшать флуктуации случайной величины ξ . Без (2.6) этот вывод мог бы показаться парадоксальным.

2.2. Методология реализации ускоренных испытаний электроприборов

В аналогичном множестве методов оценки надежности и ускоренных испытаний ЭРЭ в ИЭТ, РЭА и ЭП [1,5-7], были выделены наиболее, на наш взгляд, прогрессивные: американская HAST-методика [29] и отечественные [22-26], анализ достоинств и недостатков которых, позволил выявить оптимальное направление исследований при создании стенда экспресс-диагностики изделий, в условиях тех ограничений, которые накладываются при ускорении процессов деградации полупроводников, диэлектриков и проводниковых структур.

В связи с тем, что безопасность изделий связана только с некоторой частью отказов, интенсивность которых, во-первых, на один-два порядка ниже средних значений параметрических отказов, а во-вторых, во многом обусловлена схмотехническими и конструкторскими решениями, была обоснована взаимосвязь [9-20], необходимость [26] и эффективность [25,28] совмещения испытаний и оценки безопасности изделий и их надежности, с применением вероятностно-физических моделей. Это позволяет использовать все существующие подходы и наработки в оценках, как параметров надежности (расходования ресурса), так и каждого опасного фактора: пожарной опасности, взрывоопасности, электроопасности, электромагнитной и радиационной опасности, токсичности, включая «человеческий фактор» [1,5,6,20], и направить дальнейшие усилия на их термодинамическое [7,8] или вероятностно-физическое комплексирование [9-20,28].

Ускоренными испытаниями электроприборов называются испытания указанных изделий в форсированных режимах с последующей экстраполяцией результатов к условиям испытаний при нормальных нагрузках [1]. В связи с тем, что результатом прогноза в нашем случае является момент времени выхода пожарных параметров за допустимые ГОСТ 12.1.004-91 границы (10^{-6}), а натурные испытания проводятся на выборке (группе) из 3-х изделий, то данная методология является - **групповой обратной методологией ускоренных испытаний** [2,9-19].

2.2.1. Методика испытаний при нормальных нагрузках

Испытания 3-х электроприборов проводятся на стенде (рис.2.1), состоящем из следующего оборудования [9,22]:

1. Термобарокамеры с диапазонами изменения: температуры от минус 50°С до плюс 80°С и давления от 0,01 МПа до 0,2 МПа;

2. Программно-технического комплекса "УНИКОНТ" УК-111 с комплектом измерительных модулей МККТП/ТС, АЦП-60 и коммутаторов повышенной мощности УФДС;
3. Комплекта интегрирующих термодатчиков (ИТД_{ХК-68}), измерительных термозондов (ИТЗ_{ТСМ-50}) и измерительных шунтов (ИШ_{Рi});
4. Имитатора изменения переменного сетевого напряжения 187-242 в., мощностью до 0.9 - 8 квт. (ЛАТР и АТ-8 ОФ4.723.002П);
5. Рабочей станции (Intel Pentium);
6. Измерителей времени испытаний (таймеры УК 111 и РС).

Рис. 2.1. Стенд термо-баро-электро-циклирования: а) модернизированная камера 1 м³ (КТВ); б) контроллер «УНИКОНТ» (УК-111); в) рабочая станция

Рис. 2.2. Схема электрическая подключения контроллера «УНИКОНТ»

Все испытываемые изделия с установленными в них ИТД, ИТЗ и ИШ подключаются к испытательному стенду и помещаются в термобарокамеру, в

которой с помощью РС и контроллера «УНИКОНТ» (рис. 2.2) устанавливаются средние по ТУ температура и давление для данного типа изделий, в которых они выдерживаются в течении 2-х часов.

После указанной выдержки изделие включают в рабочий режим с тестовой нагрузкой при сетевом напряжении 242 V 50 Гц.

В "нормальном режиме" изделия испытывают в течении суток (24 часа), после чего, полученные (установившиеся) температуры плат (блоков) и потребляемые ими мощности, обрабатываются программой расчета параметров надежности и пожарной опасности [22].

После «проветривания» термобарокамеры ("остывания шунтов, датчиков и термозондов" до температуры средней по ТУ), описанный выше цикл измерений повторяется для сетевых напряжений 220 V и 187 V, 50 Гц.

2.2.2. Методика испытаний при форсированных режимах.

После суммарного прогона в "нормальном режиме" в течение 72 часов (если электроприбор быстрее «выходит» на установившиеся температуры и потребляемую мощность, то указанные циклы можно сокращать), изделие включают в режим с термо-баро-электро-циклированием, при сетевом напряжении 187 V 50 Гц. При этом термобароцикл должен иметь противофазные «квази-изотермические/квази-изобарические» участки (рис.2.3), во время которых должен «успевать» отрабатываться тест работоспособности электроприбора.

Рис. 2.3. Термо-баро-циклограмма (минуты)

В "циклическом режиме" изделия испытывают в течение таких же интервалов времени (по 24 часа), после чего, аналогично "нормальному режиму", изменяются сетевые напряжения циклов - 220 V и 242 V. Все полученные данные температурных и энергетических колебаний (блоков) и

изделия в целом - обрабатывают программой расчета параметров надежности и пожарной опасности.

Если в ходе испытаний происходит отказ ЭРЭ, плат и блоков электроприбора, то изделие подвергается восстановительному ремонту с фиксацией времени наработки и причины отказа. Пожароопасный отказ автоматически фиксируется УК 111 по изменению потребляемой мощности, измеряемой ИШ и соответствующему росту температуры зон, измеряемых ИТД и ИТЗ.

В случае периодических испытаний, завершающий этап испытаний проводится на том же стенде с той же длительностью электроциклов, за исключением того, что "стартовые" температура и давление в термобарокамере устанавливаются постоянными и равными максимальным по ТУ температуре и давлению окружающей среды (например, 45°C и 0,1 МПа), а сетевое напряжение - 187 V или 242 V 50 Гц. (в зависимости от схемы реализации источника питания: импульсный или одно/двухполупериодный). Если в изделии имеется термозащита, то она должна быть заблокирована.

В таком режиме изделия испытывают до появления ОФП (опасных факторов пожара по ГОСТ 12.1.004) – плавления, дыма или воспламенения какого-либо ЭРЭ или ЭРМ в результате пожароопасного отказа, который фиксируется УК 111 с помощью ИШ, ИТД и ИТЗ, как отказ работоспособности, сопровождающийся ростом температуры ЭРЭ (ЭРМ) любой из плат (блоков) и потребляемой мощности. Абсолютные температуры ЭРЭ (ЭРМ) плат (блоков) изделий при этом не должны превышать температур теплостойкости, воспламенения и самовоспламенения самых горючих материалов конструкции.

Если за рассчитанный (с учетом электроциклирования) срок испытаний воспламенение не произошло, то изделие считается пожаробезопасным с точечными данными, полученными расчетным путем, но с более грубой доверительной оценкой при "нулевых наблюдениях".

Глава 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГОНА И ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

3.1. Анализ результатов исследований электроприборов (ЭП), радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и средств вычислительной техники (СВТ)

Проведенные исследования ЭП, РЭА и СВТ с применением разработанных вероятностно-физических моделей свидетельствуют о том [10,24-26], что при использовании как отечественных, так и импортных ЭРЭ и рекомендуемых режимов их применения, имеет место низкий уровень их надежности и безопасности.

Так пожарная опасность отечественного персонального компьютера (ПК) СМ-1810.62 в 27,3 раза превысила допустимый уровень вероятности пожара – 10^{-6} , обусловленный государственным стандартом. При этом только клавиатура ПК полностью соответствовала всем требованиям стандартов, принимая во внимание гарантированные техническими условиями (ТУ) параметры надежности: наработку на отказ, долговечность, ремонтпригодность и технический (эксплуатационный) ресурс. Остальные блоки и устройства оказывались опасными уже через несколько десятков часов наработки после своего изготовления, т.к. процессорный блок в 12,1 раза превысил допустимый уровень пожарной безопасности, монитор – в 8,8 раза, а устройство печати – в 6,3 (табл.3.1).

Аналогичные результаты были получены при испытаниях зарубежных СВТ (Литовской мини ЭВМ СМ-1700 и Украинской вычислительной техники), а также при испытаниях отечественных лабораторных (таб.3.2) и бытовых (таб.3.3) электроприборов [10-19,22].

Таблица 3.1. Надежность и пожарная безопасность ПЭВМ

НАИМЕНОВАНИЕ БЛОКОВ И МОДУЛЕЙ	СРЕДНЕВЗВЕШЕННАЯ ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ПИРОЛИЗА ЭРЭ (КДЖ/МОЛЬ)	ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА ПОЖАРООПАСНЫХ ОТКАЗОВ	СРЕДНЕВЗВЕШЕННАЯ ТЕМПЕРАТУРА КОРПУСОВ ЭРЭ (°C)	СРЕДНЕОБЪЕМНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ (°C)	КОЛ-ВО ПАЕК	ИНТЕРВАЛ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПОЖАРОВ ЭРЭ И ЭРМ	
1	2	3	4	5	6	7	
ПЭВМ СМ-1810.62 в составе:	229,33	7,20E-05	33,79	350,77	23585	2,73E-05	1,98E-06
1.Процессорный блок (Бпр-3), в том числе:	265,18	5,83E-05	35,52	352,13	19378	1,21E-05	1,19E-06
1.1. Блок электропитания (2.087.029)	187,84	1,89E-06	38,73	360,09	776	2,07E-06	7,81E-07
1.2.Модуль системного контроля(СМ-1810.2010)	267,38	3,57E-06	38,61	355,39	1370	6,88E-07	3,88E-08
1.3. Многоканальный модуль связи (МСТМ)	252,02	2,39E-06	32,92	359,14	965	5,11E-07	1,10E-09
1.4. Видеоконтроллер цветной (СМ-1810.7006)	282,47	4,21E-06	38,92	354,42	1585	8,77E-07	3,28E-08
1.5. Модуль центрального процес- сора (СМ-1810.2204.13), в т.ч.	326,08	7,05E-06	35,71	338,93	2475	1,26E-06	6,37E-08
- БЭ 9898	264,15	3,95E-06	33,4	346,82	1369	7,44E-07	3,22E-08
- БЭ 9999	302,02	3,11E-06	38,03	330,89	1106	5,14E-07	3,14E-08
1.6. Контроллер НМД и НГМД (СМ-1810.5126)), в т.ч.:	275,11	9,01E-06	35,64	345,09	3274	1,42E-06	8,73E-08
- БЭ 9828 (с НГМД ST-242)	271,78	3,80E-06	36,33	345,09	1401	6,10E-07	3,33E-08
- БЭ 9929 (с НГМД СМ-5605)	277,15	5,21E-06	34,9	345,09	1873	8,1E-07	5,40E-08
1.7. Модуль оперативный запоми- нающий(СМ-1810,3516.03), в т.ч.	273,05	4,12E-06	37,15	336,44	1505	8,45E-07	1,00E-08
- БЭ 9907	266,4	2,33E-06	36,55	352,76	866	4,25E-07	1,06E-09
- БЭ 9852	279,68	1,79E-06	37,7	320,13	639	4,20E-07	8,99E-09
1.8. Блок включения и вентиляции (5.129.025 с 5.103.004)	230,58	4,29E-06	30	453,77	94	5,70E-07	7,46E-09
1.9. Пульт управления и индикации (5,135,051)	222,00	1,61E-06	28,17	337,88	80	3,23E-07	2,61E-09
2.Монитор МС 6502, в т.ч.:	203,15	4,39E-06	37,91	349,87	1734	8,85E-06	4,28E-07
2.1.Узел ввода сети (УВС)	257,69	4,86E-07	34,58	306,08	146	1,76E-07	3,23E-08
2.2.Узел электропитания (МС 9006)	196,21	5,59E-07	37,7	362,64	230	1,02E-06	8,79E-08
2.3.Панель управления и ЭЛП с кинескопом (ПУК)	158,12	3,08E-07	37,49	340,92	232	7,77E-07	4,13E-08
2.4.Блок высоких напряжений(БВН)	224,16	8,41E-07	41,4	376,89	131	2,11E-06	7,87E-08
2.5.Блок разверток (БР)	190,16	1,40E-06	42,83	368,34	673	3,77E-06	1,11E-07
2.6.Блок видеусилителей (БВУ)	192,56	7,94E-07	33,44	344,33	322	9,99E-07	7,65E-08
3. Клавиатура (КМ-035)	226,51	3,78E-06	25,05	346,13	527	6,30E-08	1,10E-09
4. Устройство печати (СМ-6337), в том числе:	222,47	5,56E-06	36,7	354,96	1946	6,32E-06	3,68E-07
Блок центр. управления(БЦУ-1)	271,57	1,85E-06	31,54	341,61	807	2,96E-07	1,84E-08
Блок питания и стабилизаторов(БПС)	219,07	2,29E-06	36,82	324,93	219	5,49E-06	3,23E-07
Блок управления механизмом печати(БУМП-1)	210,91	1,32E-06	38,49	368,48	817	2,01E-07	1,90E-08
Блок пульта управления (БПУ-1)	188,33	1,04E-07	39,95	384,81	103	3,36E-07	7,56E-09

Моделирование вариантов повышения надежности и снижения опасности электротехнического и радиоэлектронного оборудования привели к созданию [24,25] модульных систем термоэлектронной защиты (МСТЭЗ), применение которых (при тех же конструктивных и схемотехнических решениях) поднимает уровень пожарной безопасности изделий более чем в 11 раз (таб.3.4), т.к. отключает их от электроэнергии (рис.3.1), при возникновении пожароопасного отказа, не допуская возникновения загорания, тем самым, делая соизмеримыми их эксплуатационный и пожаробезопасный ресурс [22,25,30].

Таблица 3.2 - Надежность и пожарная безопасность лабораторных ЭП

Наименование изделия, блока, класса и типа ЭРЭ	Ср. значения в изделии				Ср. интенсивность в группе				Вероятность в группе					
	Темп-ра восплам.	Рек. нагр.	Выводов	Кол-во ЭРЭ	Отказов номин.	Отказов фактич.	Воспла-менения	Пож.опас. отказов	Кор. замык.	Обры-ва	Про-бо-я	Воспла-менения	Распр-я огня	Пожара ЭРЭ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Холодильник термоэлектрический (ХТ-25)														
1.Холодильная камера, в т.ч.:	351,25	0,69		11		2,10E-06	1,73E-08	8,90E-07				1,52E-04	7,79E-03	5,08E-07
Термоэлемент	507,8	0,70	2	4	3,10E-08	6,65E-08	5,42E-11	1,79E-09	0,027	0,192	0,000	4,75E-07	1,57E-05	7,47E-12
Вентилятор	306,5	0,80	2	1	2,25E-06	5,51E-07	5,05E-09	4,41E-07	0,500	0,100	0,300	4,43E-05	3,9E-03	1,71E-07
Разъем	358,2	0,65	15	1	3,75E-06	7,02E-07	1,92E-10	6,67E-08	0,095	0,000	0,000	1,68E-06	5,84E-04	9,83E-10
Провода	232,5	0,65	1	5	1,50E-08	2,75E-08	3,92E-10	5,28E-09	0,192	0,027	0,000	3,44E-06	4,63E-05	1,59E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	155	2,00E-08	7,51E-07	1,17E-08	3,76E-07	0,400	0,400	0,100	1,02E-04	3,29E-03	3,36E-07
2.Блок питания "CARAT" в т.ч.:	309,40	0,64		124		1,36E-05	7,42E-08	1,90E-06				6,51E-04	1,66E-02	2,71E-06
Микросхемы	368,7	0,85	14	1	1,30E-08	1,92E-08	5,56E-10	1,13E-08	0,370	0,240	0,220	4,87E-06	9,94E-05	4,84E-10
Транзисторы	507,8	0,35	3	10	5,00E-07	1,18E-06	3,36E-09	1,02E-07	0,047	0,264	0,040	2,95E-05	8,97E-04	2,64E-08
Диоды	256,3	0,35	2	24	2,10E-07	4,38E-06	2,52E-08	3,81E-07	0,047	0,264	0,040	2,21E-04	3,33E-03	7,36E-07
Резисторы	253,0	0,55	2	45	4,50E-08	8,40E-07	1,45E-09	2,27E-08	0,027	0,192	0,000	1,27E-05	1,99E-04	2,53E-09
Конденсаторы	224,3	0,60	2	23	5,20E-08	4,92E-07	3,19E-09	1,01E-07	0,130	0,000	0,075	2,79E-05	8,84E-04	2,47E-08
Дроссели	203,2	0,80	2	4	3,40E-07	7,99E-07	8,48E-10	4,63E-08	0,058	0,353	0,000	7,44E-06	4,06E-04	3,02E-09
Трансформаторы	203,2	0,80	6	1	6,00E-07	3,52E-07	3,74E-10	2,04E-08	0,058	0,353	0,000	3,28E-06	1,79E-04	5,88E-10
Предохранители/выключатели	457,4	0,80	2	2	1,00E-06	8,61E-07	1,50E-09	8,18E-08	0,095	0,000	0,000	1,31E-05	7,17E-04	9,41E-09
Реле	387,6	0,65	6	2	3,00E-06	2,94E-06	1,08E-08	2,79E-07	0,095	0,000	0,000	9,48E-05	2,44E-03	2,32E-07
Провода	232,5	0,65	1	12	1,50E-08	6,60E-08	9,41E-10	1,27E-08	0,192	0,027	0,000	8,25E-06	1,11E-04	9,16E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	346	2,00E-08	1,68E-06	2,60E-08	8,39E-07	0,400	0,400	0,100	2,28E-04	7,33E-03	1,67E-06
Итого по изделию:	330,32			135		1,57E-05	9,16E-08	2,79E-06				8,03E-04	2,44E-02	3,21E-06
Стандартное отклонение						1,17E-06	8,54E-09	2,33E-07				7,5E-05	2,0E-03	4,4E-07
Безотказность / пожарная устойчивость:						0,86258211						0,99912264		
Технический / пожаро-безопасный ресурс, лет:						6,76	- :-	7,85				0,3	- :-	0,4
Смеситель лабораторный с электромагнитным приводом (СЛЭП-1)														
1.Опора (ТЭНы с индукторами), в	337,39	0,669		18		4,50E-06	2,03E-08	1,69E-06				1,78E-04	1,48E-02	1,59E-06
Индуктор	400,0	0,70	2	4	3,10E-08	6,14E-08	5,01E-11	1,66E-09	0,027	0,192	0,000	4,39E-07	1,45E-05	6,38E-12
Эл.нагреватель	1200,0	0,80	2	1	2,25E-06	1,66E-06	1,52E-08	1,33E-06	0,500	0,100	0,300	1,33E-04	1,2E-02	1,54E-06
Клеммная колодка, разъем	316,0	0,65	6	3	4,50E-06	2,49E-06	6,80E-10	2,36E-07	0,095	0,000	0,000	5,96E-06	2,07E-03	1,23E-08
Провода	232,5	0,65	1	10	1,50E-08	5,50E-08	7,84E-10	1,06E-08	0,192	0,027	0,000	6,87E-06	9,26E-05	6,36E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	48	2,00E-08	2,33E-07	3,61E-09	1,16E-07	0,400	0,400	0,100	3,16E-05	1,02E-03	3,23E-08
2.Пульс управления, в т.ч.:	328,08	0,64		58		7,20E-06	3,47E-08	9,67E-07				3,04E-04	8,47E-03	6,06E-07
Микросхемы	368,7	0,85	14	3	1,30E-08	5,77E-08	1,67E-09	3,40E-08	0,370	0,240	0,220	1,46E-05	2,98E-04	4,36E-09
Транзисторы	507,8	0,35	3	8	5,00E-07	9,41E-07	2,69E-09	8,19E-08	0,047	0,264	0,040	2,36E-05	7,18E-04	1,69E-08
Диоды	256,3	0,35	2	11	2,10E-07	2,01E-06	1,15E-08	1,75E-07	0,047	0,264	0,040	1,01E-04	1,53E-03	1,55E-07
Резисторы	253,0	0,55	2	14	4,50E-08	2,61E-07	4,51E-10	7,06E-09	0,027	0,192	0,000	3,96E-06	6,19E-05	2,45E-10
Конденсаторы	224,3	0,60	2	5	5,20E-08	4,03E-08	2,61E-10	8,25E-09	0,130	0,000	0,075	2,28E-06	7,24E-05	1,65E-10
Дроссели	203,2	0,80	2	0	3,40E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,058	0,353	0,000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Трансформаторы	390,0	0,80	6	1	6,00E-07	1,00E-06	1,06E-09	5,80E-08	0,058	0,353	0,000	9,32E-06	5,09E-04	4,74E-09
Предохранители/выключатели	457,4	0,80	2	3	1,50E-06	1,94E-06	3,37E-09	1,84E-07	0,095	0,000	0,000	2,95E-05	1,61E-03	4,76E-08
Светодиод	387,6	0,65	2	1	5,00E-07	9,21E-08	3,39E-10	8,75E-09	0,095	0,000	0,000	2,97E-06	7,67E-05	2,28E-10
Провода	232,5	0,65	1	12	1,50E-08	6,60E-08	9,41E-10	1,27E-08	0,192	0,027	0,000	8,25E-06	1,11E-04	9,16E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	164	2,00E-08	7,95E-07	1,23E-08	3,98E-07	0,400	0,400	0,100	1,08E-04	3,48E-03	3,76E-07
Итого по изделию:	332,73			76		1,17E-05	5,50E-08	2,66E-06				4,82E-04	2,32E-02	2,19E-06
Стандартное отклонение						8,50E-07	4,94E-09	3,29E-07				4,3E-05	2,9E-03	3,9E-07
Безотказность / пожарная устойчивость:						0,89587322						0,99947482		
Технический / пожаро-безопасный ресурс, лет:						9,09	- :-	10,52				0,4	- :-	0,6

Схемотехническая реализация МСТЭЗ (рис.3.1) зависит от сложности и блочности ЭП (количества термозондов с предусилителями, контролирующими

тепловые потоки), а исполнительная часть (тиристор или семистор, отключающий от сети) – от мощности ЭП [30].

Таблица 3.3. Надежность и пожарная безопасность бытовых ЭП

Класс и тип ЭРЭ	Ср. значение в изделии				Средневзвешенная интенсивность				Групповая вероятность					
	Темп-ра воспл.	Рек. нагр.	Выводов	Кол-во ЭРЭ	Отказов номин.	Отказов фактич.	Воспла-менения	Пож.опас. отказов	Кор. замык.	Обрыва	Пробоя	Воспла-менения	Распр-я огня	Пожара ЭРЭ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Холодильник "STINOL" (102-E)														
1. Холодильная камера, в т.ч.:	393,88	0,667	16	14		4,71E-06	3,05E-08	1,57E-06				2,67E-04	1,37E-02	8,71E-07
Терморегулятор	507,8	0,55	3	1	3,10E-08	1,83E-08	3,16E-11	4,94E-10	0,027	0,192	0,000	2,77E-07	4,33E-06	1,20E-12
Нагреватели	400,0	0,60	2	2	8,70E-08	8,65E-08	2,15E-09	4,32E-08	0,500	0,150	0,000	1,89E-05	3,79E-04	7,15E-09
Таймер	507,8	0,65	2	1	5,00E-07	1,42E-07	5,22E-10	1,35E-08	0,095	0,000	0,000	4,58E-06	1,18E-04	5,40E-10
Тепловое реле	507,8	0,65	3	1	7,50E-07	1,81E-07	6,65E-10	1,72E-08	0,095	0,000	0,000	5,83E-06	1,50E-04	8,77E-10
Выключатели	316,1	0,65	2	2	1,00E-06	4,16E-07	1,53E-09	3,96E-08	0,095	0,000	0,000	1,34E-05	3,47E-04	4,66E-09
Вентилятор	306,5	0,80	2	1	2,25E-06	5,51E-07	8,08E-09	4,41E-07	0,500	0,100	0,300	7,1E-05	3,9E-03	2,73E-07
Лампа освещения	372,5	0,80	2	1	4,00E-06	3,02E-06	7,21E-09	8,76E-07	0,090	0,050	0,200	6,32E-05	7,65E-03	4,83E-07
Провода	232,5	0,65	1	5	1,50E-08	2,75E-08	3,92E-10	5,28E-09	0,192	0,027	0,000	3,44E-06	4,63E-05	1,59E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	30	2,00E-08	2,66E-07	9,87E-09	1,33E-07	0,400	0,400	0,100	8,65E-05	1,16E-03	1,01E-07
2. Блок компрессора, в т.ч.:	327,03	0,69	27	17		1,19E-06	1,71E-08	5,39E-07				1,50E-04	4,72E-03	1,78E-07
Компрессор	375,0	0,60	2	1	2,00E-07	9,66E-08	2,41E-09	4,83E-08	0,500	0,150	0,000	2,11E-05	4,23E-04	8,93E-09
Магнитный пускатель	316,1	0,80	8	1	1,00E-06	2,48E-07	3,64E-09	1,98E-07	0,500	0,100	0,300	3,2E-05	1,7E-03	5,54E-08
Тепловое реле	507,8	0,65	3	1	2,50E-07	5,02E-08	1,85E-10	4,77E-09	0,095	0,000	0,000	1,62E-06	4,18E-05	6,77E-11
Лампа индикаторная	214,7	0,80	2	1	5,00E-07	3,74E-07	8,92E-10	1,08E-07	0,09	0,05	0,200	7,82E-06	9,49E-04	7,42E-09
Клеммный набор	316,1	0,65	12	1	6,00E-08	3,19E-08	4,55E-10	6,12E-09	0,192	0,027	0,000	3,99E-06	5,37E-05	2,14E-10
Провода	232,5	0,65	1	12	1,50E-08	6,60E-08	9,41E-10	1,27E-08	0,192	0,027	0,000	8,25E-06	1,11E-04	9,16E-10
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	51	2,00E-08	3,20E-07	8,59E-09	1,60E-07	0,400	0,400	0,100	7,53E-05	1,40E-03	1,05E-07
В среднем по холодильнику:	360,45			31		5,90E-06	4,75E-08	2,11E-06				4,17E-04	1,84E-02	1,05E-06
Стандартное отклонение						7,2E-07	3,4E-09	2,3E-07				3,0E-05	2,0E-03	1,3E-07
Безотказность / пожарная устойчивость:							0,94361988						4,47E-04	
Технический / пожаро-безопасный ресурс, лет:							17,23	-:-	22,06			0,85	-:-	1,09
Телевизор "Рубин" (54M04)														
Микросхемы	415,870	0,85	21	10	1,43E-07	7,214E-07	5,7243E-08	3,37736E-08	0,370	0,240	0,220	5,017E-04	2,960E-04	6,286E-08
Транзисторы	305,274	0,35	3	23	3,49E-06	3,641E-06	4,9281E-07	2,25214E-07	0,077	0,227	0,230	4,316E-03	1,973E-03	3,268E-06
Диоды	252,033	0,35	2	39	8,67E-07	3,814E-06	5,3738E-07	1,06304E-07	0,061	0,193	0,093	4,706E-03	9,316E-04	2,158E-06
Резисторы	265,689	0,55	2	168	2,06E-07	2,301E-06	1,8885E-07	6,13026E-08	0,264	0,171	0,000	1,655E-03	5,373E-04	3,422E-07
Конденсаторы	460,825	0,60	2	123	2,37E-07	6,261E-06	5,1394E-07	1,05357E-07	0,130	0,000	0,075	4,500E-03	9,233E-04	2,051E-06
Трансформаторы	254,700	0,80	5	3	7,45E-07	8,787E-07	1,9607E-07	1,1372E-08	0,058	0,353	0,000	1,718E-03	9,968E-05	8,609E-08
Дроссели	265,000	0,80	2	5	4,60E-07	7,844E-07	1,7503E-07	1,01517E-08	0,058	0,353	0,000	1,534E-03	8,899E-05	5,358E-08
Эл-ты коммутации	363,342	0,65	5	12	1,92E-06	2,504E-06	2,0551E-07	1,95235E-08	0,095	0,000	0,000	1,801E-03	1,711E-04	1,155E-07
Вентиляторы	306,500	0,80	2	0	2,25E-06	0	0	0	0,500	0,100	0,300	0	0	0
Оптико-электрон. приборы	297,322	0,35	4	9	5,38E-06	2,174E-06	1,0251E-07	2,97283E-08	0,090	0,050	0,200	8,984E-04	2,606E-04	1,118E-07
Проводники, кабели, жгуты	315,634	0,65	2	520	1,60E-06	1,018E-06	6,0973E-08	1,17067E-08	0,192	0,027	0,000	5,344E-04	1,026E-04	3,377E-08
Пайки			1	1018	5,10E-08	1,467E-06	1,9854E-07	9,92678E-08	0,400	0,400	0,100	1,740E-03	8,700E-04	6,541E-07
Платы печатной схемы	276,433	0,65	324	3	7,90E-07	1,118E-06	1,5131E-07	2,90517E-08	0,192	0,027	0,000	1,326E-03	2,546E-04	3,121E-07
Всего по изделию:				406		2,668E-05								9,249E-06
Стандартное отклонение:						6,968E-06								2,573E-06
Безотказность / пожарная безопасность:						0,7445424								1,182E-05
Технический / пожаро-безопасный ресурс, лет:						5,79								0,08

Рис. 3.1. Блок-схема МСТЭЗ

Следует отметить, что в отличие от ЭП, в СВТ вместо компаратора (рис.3.1) в МСТЭЗ может устанавливаться микропроцессор с АЦП, который помимо функций «сравнения с уставкой» и управления тиристором/семиистором отключения, может осуществлять опрос и запоминание данных термозондов и электрозондов, а с помощью микроконтроллера связи – передачу блока указанных данных на верхний уровень АСУ, для последующих вычислений «остатков» технического и пожаробезопасного ресурса каждого СВТ.

Таблица 3.4 - Надежность и безопасность ЭП с термоэлектронной защитой

Наименование изделия, блока, класса и типа ЭРЭ	Ср. значения в изделии				Ср. интенсивность в группе				Вероятность в группе					
	Темп-ра восплам.	Рек. нагр.	Вывод	Кол-во ЭРЭ	Отказов номин.	Отказов фактич.	Воспла- мения	Пож.опас. отказов	Кор. замык.	Обры- ва	Про- боя	Воспла- мения	Распр-я огня	Пожара ЭРЭ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.Холодильная камера, в т.ч.:	361,91	0,61		27		7,11E-06	6,03E-10	1,77E-06				4,54E-05	1,55E-02	6,27E-08
Терморегулятор	507,8	0,55	3	1	3,10E-08	1,83E-08	3,16E-11	4,94E-10	0,027	0,192	0,000	9,53E-09	4,33E-06	4,12E-14
Нагреватели	400,0	0,60	2	2	8,70E-08	8,65E-08	2,15E-09	4,32E-08	0,500	0,150	0,000	6,50E-07	3,79E-04	2,46E-10
Таймер	507,8	0,65	2	1	5,00E-07	1,42E-07	5,22E-10	1,35E-08	0,095	0,000	0,000	1,58E-07	1,18E-04	1,86E-11
Тепловое реле	507,8	0,65	3	1	7,50E-07	1,81E-07	6,65E-10	1,72E-08	0,095	0,000	0,000	2,01E-07	1,50E-04	3,02E-11
Выключатели	316,1	0,65	2	2	1,00E-06	4,16E-07	1,53E-09	3,96E-08	0,095	0,000	0,000	4,63E-07	3,47E-04	1,61E-10
Вентилятор	306,5	0,80	2	1	2,25E-06	5,51E-07	5,05E-09	4,41E-07	0,500	0,100	0,300	1,52E-06	3,9E-03	5,88E-09
Лампа освещения	372,5	0,80	2	1	4,00E-06	2,95E-06	1,98E-10	8,56E-07	0,090	0,050	0,200	5,99E-08	7,48E-03	4,48E-10
Модуль системы электронной защиты, в т.ч.:						1,21E-06								
- транзисторы	316,1	0,35	3	2	8,40E-07	4,66E-07	7,64E-10	1,43E-07	0,077	0,227	0,230	2,31E-07	1,25E-03	2,89E-10
- стабилитроны	256,3	0,35	2	1	2,10E-07	1,82E-07	1,05E-09	1,59E-08	0,047	0,264	0,040	3,17E-07	1,39E-04	4,41E-11
- резисторы	253,0	0,55	2	7	4,50E-08	1,31E-07	2,26E-10	3,53E-09	0,027	0,192	0,000	6,82E-08	3,09E-05	2,11E-12
- конденсаторы	224,3	0,60	2	1	5,20E-08	1,09E-08	7,06E-11	2,24E-09	0,130	0,000	0,075	2,13E-08	1,96E-05	4,19E-13
- разъемы	358,2	0,65	4	1	1,00E-06	1,90E-07	5,20E-11	1,81E-08	0,095	0,000	0,000	1,57E-08	1,58E-04	2,49E-12
- реле	507,8	0,65	5	1	1,25E-06	2,34E-07	6,39E-11	2,22E-08	0,095	0,000	0,000	1,93E-08	1,95E-04	3,76E-12
Провода	232,5	0,65	1	5	1,50E-08	2,75E-08	3,92E-10	5,28E-09	0,192	0,027	0,000	1,18E-07	4,63E-05	5,48E-12
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	63	2,00E-08	3,05E-07	4,74E-09	1,53E-07	0,400	0,400	0,100	4,15E-05	1,34E-03	5,56E-08
2.Блок компрессора, в т.ч.:	341,41	0,63		29		2,83E-06	6,68E-12	5,87E-07				3,37E-05	5,14E-03	3,64E-08
Компрессор	375,0	0,60	2	1	2,00E-07	9,66E-08	2,41E-09	4,83E-08	0,500	0,150	0,000	1,11E-08	4,23E-04	4,69E-12
Магнитный пускатель	316,1	0,80	8	1	1,00E-06	2,48E-07	2,27E-09	1,98E-07	0,500	0,100	0,300	1,05E-08	1,7E-03	1,82E-11
Тепловое реле	507,8	0,65	3	1	2,50E-07	5,02E-08	1,85E-10	4,77E-09	0,095	0,000	0,000	8,52E-10	4,18E-05	3,56E-14
Лампа индикаторная	214,7	0,80	2	1	5,00E-07	3,74E-07	2,77E-10	1,08E-07	0,09	0,05	0,200	1,28E-09	9,49E-04	1,21E-12
Клеммный набор	316,1	0,65	12	1	6,00E-08	3,19E-08	4,55E-10	6,12E-09	0,192	0,027	0,000	2,10E-09	5,37E-05	1,12E-13
Модуль системы электронной защиты, в т.ч.:						8,57E-07								
- микросхемы	368,7	0,85	14	1	1,30E-08	1,92E-08	5,56E-10	1,13E-08	0,370	0,240	0,220	2,56E-09	9,94E-05	2,55E-13
- тиристоры	507,8	0,35	3	1	5,00E-07	1,18E-07	3,36E-10	1,02E-08	0,047	0,264	0,040	1,55E-09	8,97E-05	1,39E-13
- стабилитроны	256,3	0,35	2	1	2,10E-07	1,82E-07	1,05E-09	1,59E-08	0,047	0,264	0,040	4,84E-09	1,39E-04	6,73E-13
- резисторы	253,0	0,55	2	5	4,50E-08	9,34E-08	1,61E-10	2,52E-09	0,027	0,192	0,000	7,43E-10	2,21E-05	1,64E-14
- конденсаторы	224,3	0,60	2	2	5,20E-08	2,18E-08	1,41E-10	4,48E-09	0,130	0,000	0,075	6,51E-10	3,92E-05	2,55E-14
- разъемы	358,2	0,65	4	1	1,00E-06	1,90E-07	5,20E-11	1,81E-08	0,095	0,000	0,000	2,40E-10	1,58E-04	3,80E-14
- позистор	507,8	0,65	5	1	1,25E-06	2,32E-07	3,31E-11	2,20E-08	0,095	0,000	0,000	1,53E-10	1,93E-04	2,95E-14
Провода	232,5	0,65	1	12	1,50E-08	6,60E-08	9,41E-10	1,27E-08	0,192	0,027	0,000	4,34E-09	1,11E-04	4,82E-13
Монтажные соединения(пайки)	274,6	0,65	1	51	2,00E-08	2,47E-07	3,83E-09	1,24E-07	0,400	0,400	0,100	3,36E-05	1,08E-03	3,64E-08
В среднем по холодильнику:	351,66			56		9,94E-06	6,10E-10	2,36E-06				7,90E-05	2,07E-02	9,91E-08
Стандартное отклонение						5,52E-07	1,40E-09	1,75E-07				9,7E-06	1,5E-03	1,2E-08
Безотказность / пожарная устойчивость:							0,91216272					0,99998242		
Технический / пожаро-безопасный ресурс, лет:							10,88	-:-	12,16			9,0	-:-	11,5

3.2. Модульные системы термоэлектронной защиты в автоматизации технологического прогона и приемо-сдаточных испытаний ЭП, РЭА и СВТ

При установке МСТЭЗ в ЭП, помимо решения проблемы их пожарной безопасности, т.е. автоматического отключения при появлении дополнительного пожароопасного тепловыделения, появляются следующие новые возможности, позволяющие повысить качество и надежность ЭП.

3.2.1. Использование МСТЭЗ для организации ускоренного технологического прогона ЭП, вместо выборки группы изделий из промышленной серии и их испытаний, для «статистического распространения» параметров качества, надежности и безопасности на всю серию.

Если, как это показано на блок-схеме (рис.3.1), предусмотреть в МСТЭЗ порт (ИК, Bluetooth или просто разъем «К»), на который вывести данные

позисторов, то появляется возможность организовать для каждого ЭП ускоренный технологический прогон с термоэлектроциклированием и тепловой локацией «их внутренностей» (без вскрытия ЭП), что позволяет решить проблему прогнозирования наработки на отказ каждого изделия и его опасности, а также выявлению «ненадежных» ЭРЭ, «проскользнувших» в системе выходного контроля (у производителя ЭРЭ) и входного контроля (у производителя ЭП), что является наикратчайшим путем предупреждения брака, отказов и потерь работоспособности до истечения спрогнозированного ресурса [30].

При этом, как это не парадоксально, надежность самого изделия из-за дополнительных ЭРЭ, на которых реализована МСТЭЗ, может не снижаться, а повышаться, т.к. в процессе его доработки и постановки на производство, появляется возможность «итерационного доведения» конструкции до оптимальной по «тепловому образу» каждого ЭРЭ и изделия в целом, получаемых по результатам ускоренного термоэлектропрогона [22].

3.2.2. Использование данных ускоренного технологического прогона, с МСТЭЗ для формирования динамического гарантийного срока работы и ценообразования каждого ЭП, вместо одинаковых гарантийных сроков и цен на всю серию.

Вычисление наработки на отказ каждого изделия и его опасности по данным ускоренного технологического прогона с термоэлектроциклированием и внутренней тепловой локацией ЭП с помощью МСТЭЗ, позволяет проставлять в паспорте каждого изделия вычисленный результат, как гарантийный срок работы, и изменять его цену, в соответствии надежностью и безопасностью каждого ЭП [22].

3.2.3. Использование данных ежегодной диагностики с МСТЭЗ ЭП

Гарантийное обслуживание ЭП с МСТЭЗ превращается в ежегодную диагностику с помощью порта МСТЭЗ, которая только уточняет фактическую наработку, чтобы *изъять из эксплуатации ЭП* в конце срока безопасной эксплуатации, *предотвратив*, таким образом, *его отказ* (аварию, пожар и т.д.) *и возможные социально-экономические потери*.

3.2.4. Использование МСТЭЗ в РЭА и СВТ

Очевидно расширение использования предлагаемой методологии на технологический прогон, приемо-сдаточные испытания и эксплуатацию любой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и средств вычислительной техники (СВТ).

Более того, возможность получения и обработки данных о техническом и пожаробезопасном ресурсе каждого СВТ (п.3.1), создает принципиально новые условия повышения надежности различных АСУ, путем своевременной профилактики модулей и блоков, вероятность отказа в которых начинает превышать допустимый уровень, который характеризует «остаток технического и/или пожаробезопасного ресурсов. Это особенно важно в АСУТП объектов повышенной опасности (АЭС, ГРЭС, НПЗ и т.д.), отказы СВТ в которых влекут

за собой аварии, пожары и взрывы, приносящие обществу огромные социальные потери и материальный ущерб.

Глава 4. «ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ» ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ В РАДИОИЗВЕЩАТЕЛИ ТЕХНОСФЕРНОЙ ОПАСНОСТИ И ЕЁ НАВИГАЦИИ

В России в пожарах ежедневно погибает около 60 человек и столько же травмируется, а прямой и косвенный материальный ущерб достигает 500,0 миллионов рублей в день. В том числе в жилом секторе ежедневно происходит 515 пожаров, в которых погибают 27 человек, в среднем, и столько же травмируется. При этом наибольшая частота возгораний происходит с 22 часов вечера до 6 часов утра, т.е. когда люди спят и не в состоянии быстро среагировать [31].

Именно поэтому в некоторых странах (США, Германия, Польша) в последнее время получили распространение автономные пожарные извещатели (АПИ), предназначенные для применения в жилых помещениях, выдающих, при обнаружении признаков пожара, прерывистый сигнал тревоги с уровнем звукового давления 85-90 дБ на расстоянии 1 м. от извещателя. Статистика свидетельствует, что применение АПИ позволяет сократить число погибших при пожарах в жилом секторе на 45% [32].

Если учесть, что более 60% пожаров возникает по электротехническим причинам (проводка, электронагревательные приборы, холодильники, телевизоры и т.д.), в которых погибают более 40% населения, возникает идея со-вместить АПИ с бытовым электроприбором, чем, во-первых, повысить его собственную безопасность, путем своевременного отключения от сети с помощью МСТЭЗ, если в нем возникает пожароопасный отказ, во-вторых, превратить его в устройство обнаруживающее загорание в жилом помещении вне электроприбора и оповещающее жильцов о необходимости эвакуации, в-третьих, расширить его функции оповещения об утечке бытового газа, а в-четвертых, предусмотреть наращивание функций на предмет охраны от несанкционированного проникновения в жилое помещение, включая реализацию оповещения с помощью радиоканала соответствующих «аварийных служб» (пожарной и вневедомственной охраны, газоаварийной и т.д.), как это было предложено при разработке такой системы [22,32].

4.1. Интеллектуализация холодильников

Технология «интеллектуализации» была разработана для холодильника «СТИНОЛ-102», который является самым «пожароопасным» из всех холодильников, выпускаемых Липецким ЗАО «СТИНОЛ», т.к. содержит два электродвигателя-компрессора (рис.4.1 и 4.2), которые обеспечивают работу независимо и одновременно морозильной и холодильной камер [33].

Модель «интеллектуализации СТИНОЛ-102» включала установку внутри корпуса холодильника проточного дымового пожарного извещателя с радиоканалом, при использовании дополнительной секции электровентилятора,

который работает в системе автоматической оттайки (No Frost), и установкой МСТЭЗ в наиболее пожароопасных зонах (рис.4.3).

- 1 – компрессор,
- 2 - всасывающая трубка,
- 3 - капиллярная трубка,
- 4 - испаритель ХК,
- 5 - испаритель МК,
- 6 – конденсатор,
- 7 - фильтр-осушитель,
- 8 - нагнетательная трубка

Рис. 4.1. Схема структурная агрегата

Рис. 4.2. Схема электрическая

L – Фаза, N – Нейтраль, TH1 – терморегулятор холодильной камеры, TH2 - терморегулятор морозильной камеры, RH1 - тепловое реле компрессора холодильной камеры, RA1 - пусковое реле компрессора холодильной камеры, RH2 - тепловое реле компрессора морозильной камеры, RA2 - пусковое реле компрессора морозильной камеры, SL1 - индикаторная лампа холодильной камеры, SL2 - индикаторная лампа морозильной камеры, IL1 - выключатель лампы освещения холодильной камеры, L1 - лампа освещения холодильной камеры, TIM – таймер, TR - тепловое реле электронагревателя испарителя, IMV - выключатель вентилятора, MV – вентилятор, TF - тепловой плавкий предохранитель, CO1 - компрессор холодильной камеры, CO2 - компрессор морозильной камеры, R1 - электронагреватель испарителя, R2 - электронагреватель поддона испарителя

Тогда алгоритм круглосуточной «охраны кухни» можно представить в виде трех параллельных процессов [22,33]:

Рис.4.3. Блок-схема холодильника-извещателя

а) процесс непрерывного теплового контроля «пожароопасных зон» самого холодильника и отключение его от сети с помощью семисторов, если температура зоны превысит допустимую, с выдачей звукового аварийного сигнала «пожароопасный отказ»;

б) процесс «прокачки» объема воздуха в кухне через автономный пожарный извещатель с помощью электровентилятора и выдача прерывистого звукового сигнала «опасное задымление» в случае обнаружения «пороговой концентрации» дыма в помещении;

в) 3-х кратная верификация в течение 30 секунд концентрации дыма и, в случае непринятия жильцами мер блокировки сигнала «опасное задымление», отключение холодильника от сети с помощью семисторов и выдача непрерывного звукового сигнала «пожар», а также передача по радиоканалу сообщения на приемно-контрольный прибор в доме или прямо на ЦУСС сигнала «пожар».

В некоторых моделях холодильников «СТИНОЛ» (002,003,022,125 и 126) применяется электронная система управления вместо обычной электромеханической. В таких холодильниках все функции контроля и управления сосредоточены в электронном блоке управления (рис.4.4).

При помощи термочувствительных датчиков, электронный блок управления собирает информацию о текущей температуре испарителей и воздуха внутри камер холодильника. На основании этой информации, электроника "принимает решение" о включении/отключении той или иной нагрузки (компрессоры, нагреватели, вентилятор и т.д.). Функции контроля временных интервалов работы системы «No Frost» также возложены на электронный блок управления, включая функции самодиагностики.

Рис. 4.4. Блок-схема электронного управления холодильником

В случае обнаружения неисправности, на цифровом табло холодильника высвечивается соответствующий код. Расшифровка кодов системы самодиагностики (по заводской документации) представлена в таблице 4.1.

Наличие аварийной ситуации сопровождается свечением красного светодиода, звуковым сигналом и кодом ошибки. Звуковой сигнал и код ошибки сбрасывается при нажатии любой кнопки. Свечение красного светодиода сбрасывается только после устранения аварийной ситуации. В этом

случае функции МСТЭЗ и управление проточным извещателем, включая функцию отключения всех агрегатов при пожароопасном отказе, может быть возложена на электронный блок, при его соответствующей доработке.

Таблица 4.1 - Система самодиагностики электронного блока

код неисправности	расшифровка
E00	Неисправен датчик температуры
E01. E10. E11	Температура в камере выше 50°C
E02. E20. E22	Температура в камере выше 12°C. но при открытой
E03. E30. E33	Температура в камере выше 12°C
E04. E40. E44	Температура в камере ниже допустимого предела и не
E05	Температура испарителя не достигла 14°C в течение 1
F06	При включении оттайки не подается напряжение на
E07	При включении оттайки не снимается напряжение с

4.2. Интеллектуализация телевизоров и других бытовых ЭП

Статистические исследования мест возникновения (рис.4.5) и причин пожаров (рис.4.6) на Юге России показал [31], что жилом секторе от бытовых приборов происходит 71,17% пожаров, в т.ч. более половины по электротехническим причинам: от электроустановочных изделий – 16,32% и от ЭП – 21,76% (осветительные и нагревательные – 4,1%, телевизоры - 2,33%, холодильники – 0,58% и т.д.).

Рис. 4.5. Места возникновения пожаров

Рис. 4.6. Причины возникновения пожаров

При этом более половины мест возникновения пожаров в городах Юга России находится внутри объектов (рис.3.9): 24,98% пожаров возникает в основных помещениях, 9,43 – в прочих помещениях, 7,2% - в туалетах и кухнях, 6,22% - на чердаках и крышах, 4,97% - на верандах и балконах, 3,66% - в подсобных помещениях, 2,96% - в подвалах, 1,8% в коридорах.

По аналогии с холодильником могут быть «интеллектуализированы» телевизоры (таб.4.2 и 4.3), кондиционеры, сплит-системы, СВЧ-печи и электросчетчики, защищая помещения, в которых они установлены [30].

Таблица 4.2. Надежность и безопасность телевизора «Рубин» с МСТЭЗ

Класс и тип ЭРЭ	Ср. значения в изделии				Ср. интенсивность в группе				Вероятность в группе					
	Темп-ра восплам.	Рек. нагр.	Выво- дов	Кол-во ЭРЭ	Отказов номин.	Отказов фактич.	Восплам- ения	Пож.опас. отказов	Кор. замык.	Обры- ва	Про- бо- я	Восплам- ения	Распр-я огня	Пожара ЭРЭ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Телевизор "Рубин" (54М04)														
Микросхемы	415,87	0,87	21	10	1,4Е-07	7,9Е-07	7,1Е-08	4,2Е-08	0,370	0,240	0,220	4,6Е-06	3,6Е-04	6,45Е-10
-малой интеграции	405,2	0,9	8	6	1,20Е-07	4,92Е-07	3,31Е-08	1,95Е-08	0,370	0,240	0,220	2,16Е-06	1,71Е-04	3,70Е-10
-средней интеграции	368,7	0,9	20	3	1,30Е-08	1,08Е-07	1,13Е-08	6,69Е-09	0,370	0,240	0,220	7,43Е-07	5,87Е-05	4,36Е-11
-большой интеграции	621,4	0,8	36	1	1,00Е-08	1,93Е-07	2,61Е-08	1,54Е-08	0,370	0,240	0,220	1,71Е-06	1,35Е-04	2,31Е-10
Транзисторы	305,27	0,20	3	23	3,5Е-06	3,6Е-06	4,9Е-07	2,3Е-07	0,077	0,227	0,230	3,2Е-05	2,0Е-03	2,44Е-08
-маломощные	316,1	0,2	3	12	8,40Е-07	1,56Е-06	2,11Е-07	9,65Е-08	0,077	0,227	0,230	1,38Е-05	8,46Е-04	1,17Е-08
-средней мощности	256,3	0,2	3	7	7,40Е-07	5,47Е-07	7,41Е-08	3,38Е-08	0,077	0,227	0,230	4,84Е-06	2,97Е-04	1,44Е-09
-большой мощности	358,5	0,2	3	4	1,91Е-06	1,53Е-06	2,08Е-07	9,48Е-08	0,077	0,227	0,230	1,36Е-05	8,31Е-04	1,13Е-08
Диоды	252,03	0,40	2	39	8,7Е-07	3,8Е-06	5,4Е-07	1,1Е-07	0,061	0,193	0,093	3,5Е-05	9,3Е-04	1,611Е-08
-маломощные	256,3	0,5	2	24	1,57Е-07	2,17Е-06	2,93Е-07	8,51Е-08	0,090	0,050	0,200	1,92Е-05	7,45Е-04	1,43Е-08
-средней мощности	256,3	0,5	2	11	2,10Е-07	1,33Е-06	1,80Е-07	1,56Е-08	0,047	0,264	0,040	1,18Е-05	1,37Е-04	1,61Е-09
-большой мощности	214,7	0,2	2	4	5,00Е-07	3,18Е-07	6,42Е-08	5,58Е-09	0,047	0,264	0,040	4,20Е-06	4,89Е-05	2,05Е-10
Резисторы	265,69	0,50	2	168	2,1Е-07	2,3Е-06	1,9Е-07	6,1Е-08	0,264	0,171	0,000	1,2Е-05	5,4Е-04	2,56Е-09
-композиционные	303,9	0,5	2	73	4,30Е-08	1,08Е-06	8,83Е-08	4,42Е-08	0,500	0,150	0,000	5,78Е-06	3,87Е-04	2,24Е-09
-пленочные	256,3	0,5	2	19	3,10Е-08	1,62Е-07	1,33Е-08	3,60Е-10	0,027	0,192	0,000	8,72Е-07	3,16Е-06	2,75Е-12
-проволочные	436,7	0,5	2	7	8,70Е-08	3,72Е-07	3,05Е-08	1,53Е-08	0,500	0,150	0,000	2,00Е-06	1,34Е-04	2,67Е-10
-угольные	210,5	0,5	2	69	4,50Е-08	6,91Е-07	5,67Е-08	1,53Е-09	0,027	0,192	0,000	3,71Е-06	1,34Е-05	4,98Е-11
Конденсаторы:	460,83	0,50	2	123	2,4Е-07	6,3Е-06	5,1Е-07	1,1Е-07	0,130	0,000	0,075	3,4Е-05	9,2Е-04	1,532Е-08
-металлобумажные	316,1	0,5	2	27	5,20Е-08	5,08Е-07	4,17Е-08	8,55Е-09	0,130	0,000	0,075	2,73Е-06	7,50Е-05	2,05Е-10
-керамические	490,6	0,5	2	35	1,50Е-07	4,01Е-06	3,29Е-07	6,74Е-08	0,130	0,000	0,075	2,15Е-05	5,91Е-04	1,27Е-08
-электролитические	507,8	0,5	2	61	3,50Е-08	1,75Е-06	1,43Е-07	2,94Е-08	0,130	0,000	0,075	9,38Е-06	2,58Е-04	2,42Е-09
Трансформаторы:	254,70	0,50	5	3	7,5Е-07	8,8Е-07	2,0Е-07	1,1Е-08	0,058	0,353	0,000	1,3Е-05	1,0Е-04	6,427Е-10
-высоочастотные	302,4	0,5	4	1	4,50Е-08	1,19Е-07	2,66Е-08	1,54Е-09	0,058	0,353	0,000	1,74Е-06	1,35Е-05	2,35Е-11
-низкочастотные	258,5	0,5	5	1	1,00Е-07	1,73Е-07	3,86Е-08	2,24Е-09	0,058	0,353	0,000	2,53Е-06	1,96Е-05	4,96Е-11
-силовые	203,2	0,5	6	1	6,00Е-07	5,87Е-07	1,31Е-07	7,59Е-09	0,058	0,353	0,000	8,56Е-06	6,65Е-05	5,70Е-10
Дроссели:	265,00	0,50	2	5	4,6Е-07	7,8Е-07	1,8Е-07	1,0Е-08	0,058	0,353	0,000	1,1Е-05	8,9Е-05	4Е-10
-высоочастотные	302,4	0,5	2	2	2,00Е-08	1,06Е-07	2,36Е-08	1,37Е-09	0,058	0,353	0,000	1,55Е-06	1,20Е-05	1,86Е-11
-низкочастотные	258,5	0,5	2	2	1,00Е-07	3,46Е-07	7,73Е-08	4,48Е-09	0,058	0,353	0,000	5,05Е-06	3,93Е-05	1,99Е-10
-силовые	203,2	0,5	2	1	3,40Е-07	3,32Е-07	7,42Е-08	4,30Е-09	0,058	0,353	0,000	4,85Е-06	3,77Е-05	1,83Е-10
Эл-ты коммутации:	363,34	0,50	4,5	12	1,9Е-06	2,5Е-06	2,1Е-07	2,0Е-08	0,095	0,000	0,000	1,3Е-05	1,7Е-04	8,63Е-10
Предохр./выключатели	457,4	0,5	2	3	5,00Е-07	9,98Е-07	8,20Е-08	7,79Е-09	0,095	0,000	0,000	5,36Е-06	6,82Е-05	3,66Е-10
Переключатели	387,6	0,5	6	2	4,20Е-07	4,16Е-07	3,42Е-08	3,25Е-09	0,095	0,000	0,000	2,24Е-06	2,85Е-05	6,36Е-11
Разъемы	316,1	0,5	8	3	1,00Е-06	1,09Е-06	8,91Е-08	8,47Е-09	0,095	0,000	0,000	5,83Е-06	7,42Е-05	4,33Е-10
Клеммы, зажимы	316,1	0,5	2	4	2,00Е-09	2,90Е-09	2,38Е-10	2,26Е-11	0,095	0,000	0,000	1,56Е-08	1,98Е-07	3,08Е-15
Электродвигатели:	0,70	4,25	0	1	1,2Е-05	0,0Е+00	0,0Е+00	0,0Е+00	0,500	0,100	0,300	0,0Е+00	0,0Е+00	0,0Е+00
-асинхронные	346,9	0,7	3	0	8,60Е-06	0,00Е+00	0,00Е+00	0,00Е+00	0,500	0,100	0,300	0,0Е+00	0,0Е+00	0,00Е+00
-шаговые	302,3	0,7	6	0	1,00Е-06	0,00Е+00	0,00Е+00	0,00Е+00	0,500	0,100	0,300	0,0Е+00	0,0Е+00	0,00Е+00
-синхронные	314,5	0,7	6	0	3,60Е-07	0,00Е+00	0,00Е+00	0,00Е+00	0,500	0,100	0,300	0,0Е+00	0,0Е+00	0,00Е+00
-вентиляторы	306,5	0,7	2	0	2,25Е-06	0,00Е+00	0,00Е+00	0,00Е+00	0,500	0,100	0,300	0,0Е+00	0,0Е+00	0,00Е+00
Оптико-электрон.приборы:	297,32	0,57	4	9	5,4Е-06	2,2Е-06	1,0Е-07	3,0Е-08	0,090	0,050	0,200	6,7Е-06	2,6Е-04	8,35Е-10
-светодиоды	297,60	0,50	2	6	9,10Е-07	1,05Е-06	5,24Е-08	1,52Е-08	0,09	0,05	0,200	3,43Е-06	1,33Е-04	4,56Е-10
-кинескопы	372,50	0,50	8	1	4,00Е-06	9,57Е-07	4,77Е-08	1,38Е-08	0,09	0,05	0,200	3,12Е-06	1,21Е-04	3,78Е-10
-фотоприемники	258,90	0,70	2	2	4,70Е-07	1,65Е-07	2,48Е-09	7,19Е-10	0,09	0,05	0,200	1,62Е-07	6,30Е-06	1,02Е-12
Соединит-ные элементы:	315,63	0,50	2	520	1,6Е-06	1,0Е-06	6,1Е-08	1,2Е-08	0,192	0,027	0,000	4,0Е-06	1,0Е-04	2,52Е-10
- проводники печатных плат	317,1	0,5	1	509	7,00Е-09	3,97Е-07	7,27Е-09	1,40Е-09	0,192	0,027	0,000	4,76Е-07	1,22Е-05	5,83Е-12
-провода	232,5	0,5	1	7	1,50Е-08	5,11Е-08	6,91Е-09	1,33Е-09	0,192	0,027	0,000	4,52Е-07	1,16Е-05	5,26Е-12
-кабели	274,6	0,5	4	4	4,75Е-07	5,70Е-07	4,68Е-08	8,98Е-09	0,192	0,027	0,000	3,06Е-06	7,87Е-05	2,41Е-10
-волноводы	450,00	0,5	2	0	1,10Е-06	0,00Е+00	0,00Е+00	0,00Е+00	0,192	0,027	0,000	0,00Е+00	0,0Е+00	0,00Е+00
Пайки:	314,60	0,50	1	1018	5,1Е-08	1,5Е-06	2,0Е-07	9,9Е-08	0,400	0,400	0,100	1,3Е-05	8,7Е-04	4,883Е-09
-печатного монтажа	317,1	0,5	1	972	1,00Е-09	8,45Е-07	1,14Е-07	5,72Е-08	0,400	0,400	0,100	7,48Е-06	5,01Е-04	3,75Е-09
-навесного монтажа	232,5	0,5	1	14	3,00Е-08	2,04Е-07	2,77Е-08	1,38Е-08	0,400	0,400	0,100	1,81Е-06	1,21Е-04	2,19Е-10
-объемного монтажа	274,6	0,5	1	32	2,00Е-08	4,18Е-07	5,65Е-08	2,83Е-08	0,400	0,400	0,100	3,70Е-06	2,48Е-04	9,17Е-10
Платы печатной схемы:	276,43	0,5	3	7	9,0Е-07	1,1Е-06	1,5Е-07	2,9Е-08	0,192	0,027	0,000	9,9Е-06	2,5Е-04	2,33Е-09
-однослойные	298,4	0,5	2	7	7,00Е-07	1,07Е-06	1,45Е-07	2,79Е-08	0,192	0,027	0,000	9,51Е-06	2,45Е-04	2,33Е-09
-многослойные	232,5	0,5	1	9	9,00Е-08	4,38Е-08	5,93Е-09	1,14Е-09	0,192	0,027	0,000	3,88Е-07	1,0Е-05	3,68Е-12
Модуль термозащиты МТ-2,в т.ч.:				12		8,5Е-07								2,2Е-09
- микросхемы	368,7	0,85	14	1	1,30Е-08	1,92Е-08	5,56Е-10	1,13Е-08	0,370	0,240	0,220	4,9Е-06	9,94Е-05	4,84Е-10
- тиристоры	507,8	0,35	3	1	5,00Е-07	1,18Е-07	3,36Е-10	1,02Е-08	0,047	0,264	0,040	2,9Е-06	8,97Е-05	2,64Е-10
- стабилитроны	256,3	0,35	2	1	2,10Е-07	1,82Е-07	1,05Е-09	1,59Е-08	0,047	0,264	0,040	9,2Е-06	1,39Е-04	1,28Е-09
- резисторы	253,0	0,55	2	5	4,50Е-08	9,34Е-08	1,61Е-10	2,52Е-09	0,027	0,192	0,000	1,4Е-06	2,21Е-05	3,12Е-11
- конденсаторы	224,3	0,60	2	2	5,20Е-08	2,18Е-08	1,41Е-10	4,48Е-09	0,130	0,000	0,075	1,2Е-06	3,92Е-05	4,86Е-11
- разъемы	358,2	0,65	4	1	1,00Е-06	1,90Е-07	5,20Е-11	1,81Е-08	0,095	0,000	0,000	4,6Е-07	1,58Е-04	7,22Е-11
- позистор	507,8	0,65	5	1	1,25Е-06	2,30Е-07	3,29Е-11	2,19Е-08	0,095	0,000	0,000	2,9Е-07	1,92Е-04	5,53Е-11
Всего по изделию:				418		2,76Е-05								7,15Е-08
Стандартное отклонение						7,0Е-06								1,9Е-08
Безотказность / пожарная														
устойчивость:						0,739								0,9992057
Технический (пожаро-безопасный) ресурс, лет:						5,54								11

Таблица 4.3. Надежность и безопасность телевизора «Садко» с МСТЭЗ

Телевизор "Садко" (44ТЦ-6002)														
Микросхемы	429,07	0,90	21	12	1,4E-07	8,8E-07	7,4E-08	4,4E-08	0,370	0,240	0,220	4,8E-06	3,8E-04	6,703E-10
-малой интеграции	405,2	0,9	8	6	1,20E-07	4,92E-07	3,31E-08	1,95E-08	0,370	0,240	0,220	2,16E-06	1,71E-04	3,70E-10
-средней интеграции	368,7	0,9	20	4	1,30E-08	1,44E-07	1,51E-08	8,93E-09	0,370	0,240	0,220	9,90E-07	7,82E-05	7,75E-11
-большой интеграции	621,4	0,9	36	2	1,00E-08	2,43E-07	2,57E-08	1,51E-08	0,370	0,240	0,220	1,68E-06	1,33E-04	2,23E-10
Транзисторы	312,08	0,20	3	13	3,5E-06	2,3E-06	3,1E-07	1,4E-07	0,077	0,227	0,230	2,0E-05	1,2E-03	1,059E-08
-маломощные	316,1	0,2	3	7	8,40E-07	9,10E-07	1,23E-07	5,63E-08	0,077	0,227	0,230	8,06E-06	4,93E-04	3,98E-09
-средней мощности	256,3	0,2	3	3	7,40E-07	2,35E-07	3,17E-08	1,45E-08	0,077	0,227	0,230	2,08E-06	1,27E-04	2,64E-10
-большой мощности	358,5	0,2	3	3	1,91E-06	1,15E-06	1,56E-07	7,11E-08	0,077	0,227	0,230	1,02E-05	6,23E-04	6,35E-09
Диоды	252,34	0,40	2	42	8,7E-07	4,1E-06	5,8E-07	1,1E-07	0,061	0,193	0,093	3,8E-05	1,0E-03	1,89E-08
-маломощные	256,3	0,5	2	26	1,57E-07	2,35E-06	3,18E-07	9,22E-08	0,090	0,050	0,200	2,08E-05	8,08E-04	1,68E-08
-средней мощности	256,3	0,5	2	12	2,10E-07	1,45E-06	1,96E-07	1,71E-08	0,047	0,264	0,040	1,28E-05	1,50E-04	1,92E-09
-большой мощности	214,7	0,2	2	4	5,00E-07	3,18E-07	6,42E-08	5,58E-09	0,047	0,264	0,040	4,20E-06	4,89E-05	2,05E-10
Резисторы	262,21	0,50	2	150	2,1E-07	2,0E-06	1,6E-07	5,0E-08	0,264	0,171	0,000	1,1E-05	4,4E-04	1,96E-09
-композиционные	303,9	0,5	2	66	4,30E-08	9,73E-07	7,98E-08	3,99E-08	0,500	0,150	0,000	5,22E-06	3,50E-04	1,83E-09
-пленочные	256,3	0,5	2	15	3,10E-08	1,28E-07	1,05E-08	2,84E-10	0,027	0,192	0,000	6,89E-07	2,49E-06	1,72E-12
-проволочные	436,7	0,5	2	4	8,70E-08	2,12E-07	1,74E-08	8,72E-09	0,500	0,150	0,000	1,14E-06	7,64E-05	8,72E-11
-угольные	210,5	0,5	2	65	4,50E-08	6,51E-07	5,34E-08	1,44E-09	0,027	0,192	0,000	3,49E-06	1,26E-05	4,42E-11
Конденсаторы:	461,00	0,50	2	119	2,4E-07	6,1E-06	5,0E-07	1,0E-07	0,130	0,000	0,075	3,3E-05	9,0E-04	1,443E-08
-металлобумажные	316,1	0,5	2	26	5,20E-08	4,89E-07	4,02E-08	8,24E-09	0,130	0,000	0,075	2,63E-06	7,22E-05	1,90E-10
-керамические	490,6	0,5	2	34	1,50E-07	3,89E-06	3,19E-07	6,55E-08	0,130	0,000	0,075	2,09E-05	5,74E-04	1,20E-08
-электролитические	507,8	0,5	2	59	3,50E-08	1,69E-06	1,39E-07	2,84E-08	0,130	0,000	0,075	9,07E-06	2,49E-04	2,26E-09
Трансформаторы:	265,00	0,50	5	5	7,5E-07	1,2E-06	2,6E-07	1,5E-08	0,058	0,353	0,000	1,7E-05	1,3E-04	8,62E-10
-высокочастотные	302,4	0,5	4	2	4,50E-08	2,38E-07	5,31E-08	3,08E-09	0,058	0,353	0,000	3,48E-06	2,70E-05	9,39E-11
-низкочастотные	258,5	0,5	5	2	1,00E-07	3,46E-07	7,73E-08	4,48E-09	0,058	0,353	0,000	5,05E-06	3,93E-05	1,99E-10
-силовые	203,2	0,5	6	1	6,00E-07	5,87E-07	1,31E-07	7,59E-09	0,058	0,353	0,000	8,56E-06	6,65E-05	5,70E-10
Дроссели:	264,41	0,50	2	11	4,6E-07	1,7E-06	3,9E-07	2,3E-08	0,058	0,353	0,000	2,5E-05	2,0E-04	2,046E-09
-высокочастотные	302,4	0,5	2	4	2,00E-08	2,12E-07	4,72E-08	2,74E-09	0,058	0,353	0,000	3,09E-06	2,40E-05	7,42E-11
-низкочастотные	258,5	0,5	2	5	1,00E-07	8,66E-07	1,93E-07	1,12E-08	0,058	0,353	0,000	1,26E-05	9,82E-05	1,24E-09
-силовые	203,2	0,5	2	2	3,40E-07	6,65E-07	1,48E-07	8,60E-09	0,058	0,353	0,000	9,70E-06	7,54E-05	7,32E-10
Эл-ты коммутации:	359,61	0,50	4,5	18	1,9E-06	5,0E-06	4,1E-07	3,9E-08	0,095	0,000	0,000	2,7E-05	3,4E-04	4,02E-09
Предохр./выключатели	457,4	0,5	2	2	5,00E-07	6,66E-07	5,46E-08	5,19E-09	0,095	0,000	0,000	3,57E-06	4,55E-05	1,63E-10
Переключатели	387,6	0,5	6	7	4,20E-07	1,46E-06	1,20E-07	1,14E-08	0,095	0,000	0,000	7,82E-06	9,96E-05	7,79E-10
Разъемы	316,1	0,5	8	8	1,00E-06	2,90E-06	2,38E-07	2,26E-08	0,095	0,000	0,000	1,55E-05	1,98E-04	3,08E-09
Клеммы,зажимы	316,1	0,5	2	1	2,00E-09	7,24E-10	5,94E-11	5,65E-12	0,095	0,000	0,000	3,89E-09	4,95E-08	1,93E-16
Электропроводятели:	0,70	4,25	0	0	1,2E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,500	0,100	0,300	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
-асинхронные	346,9	0,7	3	0	8,60E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,500	0,100	0,300	0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00
-шаговые	302,3	0,7	6	0	1,00E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,500	0,100	0,300	0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00
-синхронные	314,5	0,7	6	0	3,60E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,500	0,100	0,300	0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00
-вентиляторы	306,5	0,7	2	0	2,25E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,500	0,100	0,300	0,0E+00	0,0E+00	0,00E+00
Опτικο-электрон.приборы:	306,65	0,57	4	4	5,4E-06	1,4E-06	6,6E-08	1,9E-08	0,090	0,050	0,200	4,3E-06	1,7E-04	4,287E-10
-светодиоды	297,60	0,50	2	2	9,10E-07	3,51E-07	1,75E-08	5,06E-09	0,09	0,05	0,200	1,14E-06	4,44E-05	5,07E-11
-кинескопы	372,50	0,50	8	1	4,00E-06	9,57E-07	4,77E-08	1,38E-08	0,09	0,05	0,200	3,12E-06	1,21E-04	3,78E-10
-фотоприемники	258,90	0,70	2	1	4,70E-07	8,26E-08	1,24E-09	3,59E-10	0,09	0,05	0,200	8,11E-08	3,15E-06	2,56E-13
Соединит-ные элементы:	315,89	0,50	2	526	1,6E-06	1,2E-06	7,1E-08	1,4E-08	0,192	0,027	0,000	4,6E-06	1,2E-04	3,85E-10
- проводники печатных плат	317,1	0,5	1	516	7,00E-09	4,03E-07	7,37E-09	1,42E-09	0,192	0,027	0,000	4,83E-07	1,24E-05	5,99E-12
-провода	232,5	0,5	1	5	1,50E-08	3,65E-08	4,94E-09	9,48E-10	0,192	0,027	0,000	3,23E-07	8,31E-06	2,69E-12
-кабели	274,6	0,5	4	5	4,75E-07	7,12E-07	5,85E-08	1,12E-08	0,192	0,027	0,000	3,83E-06	9,84E-05	3,77E-10
-волноводы	450,00	0,5	2	0	1,10E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,192	0,027	0,000	0,00E+00	0,0E+00	0,00E+00
Пайки:	314,75	0,50	1	1083	5,1E-08	1,6E-06	2,1E-07	1,1E-07	0,400	0,400	0,100	1,4E-05	9,3E-04	5,776E-09
-печатного монтажа	317,1	0,5	1	1033	1,00E-09	8,98E-07	1,22E-07	6,08E-08	0,400	0,400	0,100	7,95E-06	5,32E-04	4,23E-09
-навесного монтажа	232,5	0,5	1	10	3,00E-08	1,46E-07	1,98E-08	9,88E-09	0,400	0,400	0,100	1,29E-06	8,66E-05	1,12E-10
-объемного монтажа	274,6	0,5	1	40	2,00E-08	5,22E-07	7,07E-08	3,53E-08	0,400	0,400	0,100	4,62E-06	3,10E-04	1,43E-09
Платы печатной схемы:	276,43	0,5	3	7,9E-07	1,1E-06	1,5E-07	2,9E-08	0,192	0,027	0,000	9,9E-06	2,5E-04	2,33E-09	
-однослойные	298,4	0,5	2	7,00E-07	1,07E-06	1,45E-07	2,79E-08	0,192	0,027	0,000	9,51E-06	2,45E-04	2,33E-09	
-многослойные	232,5	0,5	1	9,00E-08	4,38E-08	5,93E-09	1,14E-09	0,192	0,027	0,000	3,88E-07	1,0E-05	3,868E-12	
Модуль термозащиты МТ-2,в т.ч.:				12		8,5E-07								2,2E-09
- микросхемы	368,7	0,85	14	1	1,30E-08	1,92E-08	5,56E-10	1,13E-08	0,370	0,240	0,220	4,9E-06	9,94E-05	4,84E-10
- тиристоры	507,8	0,35	3	1	5,00E-07	1,18E-07	3,36E-10	1,02E-08	0,047	0,264	0,040	2,9E-06	8,97E-05	2,64E-10
- стабилитроны	256,3	0,35	2	1	2,10E-07	1,82E-07	1,05E-09	1,59E-08	0,047	0,264	0,040	9,2E-06	1,39E-04	1,28E-09
- резисторы	253,0	0,55	2	5	4,50E-08	9,34E-08	1,61E-10	2,52E-09	0,027	0,192	0,000	1,4E-06	2,21E-05	3,12E-11
- конденсаторы	224,3	0,60	2	2	5,20E-08	2,18E-08	1,41E-10	4,48E-09	0,130	0,000	0,075	1,2E-06	3,92E-05	4,86E-11
- разъемы	358,2	0,65	4	1	1,00E-06	1,90E-07	5,20E-11	1,81E-08	0,095	0,000	0,000	4,6E-07	1,58E-04	7,22E-11
- позистор	507,8	0,65	5	1	1,25E-06	2,30E-07	3,29E-11	2,19E-08	0,095	0,000	0,000	2,9E-07	1,92E-04	5,53E-11
Всего по изделию:				399		2,93E-05								6,46E-08
Стандартное отклонение						7,4E-06								1,7E-08
Безотказность / пожарная														
устойчивость:						0,725								0,9992852
Технический (пожаро-безопасный) ресурс, лет:						5,20								12,2597

Следовательно, если «превратить» телевизоры и холодильники, электросчетчики и сплит-системы в автономные пожарные извещатели, то появляется возможность:

- предотвратить 38,08% пожаров, которые произошли по электротехническим причинам;

- осуществить с их помощью раннее обнаружение, а следовательно и сокращение социально-экономических потерь 24,98% пожаров.

Дальнейшее повышение эффективности «интеллектуализации» бытовых электроприборов, как это отмечалось выше, возможно путем расширения функций МСТЭЗ металлооксидными (например, электрохимическими) датчиками на бытовой газ и ультразвуковыми доплеровскими датчиками обнаружения проникновения (перемещения) в помещения, при соответствующей дифференциации сигналов вызова «аварийных служб» (пожарной, газоаварийной и вневедомственной охраны) по радиоканалу [30].

Таким образом, «интеллектуализация» превращает бытовые электроприборы, оснащенные микропроцессорами, в изделия двойного применения, которые помимо основных функций (холодильник, телевизор и т.д.) реализуют функции изделий «пожарно-сторожевого» назначения (пожаро-взрыво извещателей, датчиков охраны), т.е. «превращаются», таким образом, в *радиоизвещатели техносферной безопасности и её навигации* (РИТОН) с помощью пассивной локализации источника радиоизлучения [22].

Тогда в соответствии с Федеральным Законом «О пожарной безопасности» (ФЗ-69, ст. 26 и 29) указанные изделия освобождались бы от налога на добавленную стоимость и от налога на прибыль, что создавало бы благоприятные условия для скорейшего внедрения этой инновационной технологии и продукции. Однако, благодаря законотворчеству Российских чиновников и депутатов, новый Налоговый Кодекс «положил конец этим льготам», и продукция, которая могла бы предотвратить пожары и смерть от них – не появилась до сих пор.

Глава 5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КВАЛИМЕТРИИ ЭП, РЭА И СВТ

Изложенные выше принципы интеллектуализации бытовых электроприборов позволяют поставить задачу синтеза автоматизированной системы квалиметрии электроприборов (АСКЭ).

5.1. Модель контроля производителя электроприбора

Контроль производителя ЭП можно осуществить с помощью радио-электронной этикетки-лейбла (РЭЛ), представляющей собой устройство, защищенное Патентом РФ (№ 2152076 от 27.06.2000), в состав которого входят: генератор кодов с логикой управления, дешифратор, индикатор, таймер, схема питания [34].

Конструктивно «этикетка» выполнена в корпусе с индикатором, аналогично наручным электронным часам (рис.5.1).

ЭЛЕКТРОННЫЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ТОВАРОВ ОТ ПОДДЕЛОК
Электронная этикетка

Рис. 5.1. Структурная схема электронной этикетки

Множество электронных этикеток, предназначенных для маркирования одной партии товара после изготовления программируются одинаковым образом. Всё программирование заключается в записи одного кодового слова для 4-х знакового индикатора 16-ти разрядного, для 8-ми знакового индикатора – 32 разрядного и т.д. Алгоритм смены кодов программируется при изготовлении ЧИПа. При этом на индикаторах электронных этикеток отображается буквенно-цифровой код, например, **5U4F**. Каждый разряд индикатора отображает цифры **0,1,2...9**, и латинские буквы **A,C,E,F,U,P**.

После программирования все электронные этикетки крепятся несъёмным способом на партию товара (непосредственно на сам товар). Генераторы кодов с заданной периодичностью, например один раз в сутки, синхронно с выбранным часовым поясом, например в 12-00 по Московскому времени производят смену кода. Поскольку синхронизация всех генераторов кодов происходит по единому времени, на всех электронных этикетках происходит одновременная, с учетом погрешности рассинхронизации, смена кодов с одного значения на другое, где бы эти этикетки не находились (рис.5.2).

Следовательно, на каждой единице товара из одной партии, где бы он ни находился, на индикаторе электронной этикетки, прикрепленной к этому товару произойдёт смена значения кода, например **5U4F** на **A7P9**. Покупатель, приходя в магазин и выбрав товар, может сравнить значение динамического кода с контрольным значением кода, которое изготовитель для каждой партии своего товара для каждой даты, включая дату продажи товара, распространяет через СМИ: радио, телевидение, Интернет и т.д. (рис.5.2).

Рис. 5.2. Реализации электронной защиты товаров

Приобретя товар, потребитель может ежедневно, в течение гарантийного срока идентифицировать свой товар на предмет подлинности его конкретному производителю. Срок службы элемента питания выбирается исходя из гарантийного срока конкретного вида товара, а в электроприборе может рассчитываться с учётом его подзарядки от блока питания ЭП. Разрядность индикатора и точность генератора определяются необходимой степенью защиты. Частоту смены динамического кода можно изменить (через час, через 12 часов, через 2 суток и т.д.).

Использование РЭЛ и её доработка, на предмет фиксации времени работы, числа включений и выключений, наработки на отказ и причины отказа, *создает принципиально новую информационную среду для автоматизации квалиметрии ЭП в реальном масштабе времени и защиты от контрафактной продукции* [22].

5.2. Модель контроля наработки и отказов ЭП, РЭА и СВТ

Действительно, учитывая, что РЭЛ имеет встроенный таймер, остается добавить в его ЧИП:

- микросхемную реализацию «контроля включения/выключения ЭП» (например, через «триггер подзарядки» элемента питания – рис.1.11),
- сумматор и «память» (для хранения времени непрерывной работы, «отдыха» и количества включения и выключений),
- порт ввода-вывода данных (например, ИК или RS 485, для ввода причин отказа в гарантийной или обыкновенной мастерской), включая сопряжение с радиоканалом и выдачей итогового блока данных по запросу.

5.3. Синтез автоматизированной системы квалиметрии ЭП, РЭА и СВТ

Принимая за основу синтеза автоматизированной системы квалиметрии электроприборов (АСКЭ) вышеизложенные модели, методы и средства, АСКЭ можно представить в виде следующей макроструктуры (рис.5.3):

- **сети автоматизированных комплексов диагностики** и испытаний электрорадиоматериалов (АКДИ) в испытательных пожарных лабораториях МЧС РФ и в сертификационных центрах Ростехрегулирования, формирующих единую базу данных вектор-функций жизненных циклов электрорадиоматериалов;

- **сети автоматизированных систем термоэлектропрогона** изделий (с использованием термоэлектроциклирования и тепловой локации с помощью МСТЭЗ), реализующих вероятностно-физическую методологию ускоренных испытаний на всех предприятиях любых форм собственности, выпускающих электроприборы;

- **комплекса нормативных документов в области надежности и пожарной безопасности**, регламентирующих методологию и обработку результатов ускоренных испытаний;

- **«Интернет-доступа» к данным РЭЛ** производителей ЭП (для «отслеживания» отказов и статистического анализа надежности), **органов надзора** (например, пожарного – для контроля за «истечением» пожаробезопасного ресурса и автоматизированного формирования предписаний по выводу ЭП из эксплуатации) и экспертов (аудиторов) систем качества (для подтверждения показателей качества ЭП).

Рис. 5.3. Структура АСКЭ

Легко видеть, что создание «образов» каждого ЭРЭ и ЭП для диагностики по предлагаемой методологии, **позволит сформировать количественный подход в их квалиметрии** – проблеме количественного измерения качества,

т.к. именно минимизация потерь (материальных и моральных) **в общественном производстве и потреблении** продукции и услуг (в широком смысле) при оптимизации их надежности и безопасности - **есть максимально достижимое качество**, искусственное деление которого на качество продукции, как сорт (класс), и на качество, как способность удовлетворить общественную потребность, уже давно не отвечает достигнутому уровню науки и техники, а вводит только путаницу в менеджмент качества [20,22,30,32].

5.4. Тиражирование системы

Взяв за основу синтеза вышеизложенные модели, методы и средства, получим следующую структуру автоматизированной системы предотвращения и обнаружения происшествий (АСПОП) - пожаров, взрывов и несанкционированного доступа в жилые объекты в АТЕ (рис.5.4).

Рис. 5.4. Модель АСПОП

Очевидна интеграция в АСПОП ещё двух служб жизнеобеспечения: энергетиков и коммунальщиков (при «интеллектуализации электросчетчиков», счетчиков горячей воды и центрального отопления и счетчиков холодной

воды), а также введение её подсистемой в АСУ (рис.1.15), так называемых, «интеллектуальных зданий» [22,35].

Радиочастотная часть АСПОП может быть построена в стандарте GSM, с использованием имеющихся технологий и оборудования сотовой связи. При этом появляется возможность не только приёма сигналов «происшествий» от «извещателей техносферной безопасности» - интеллектуальных ЭП, но и передача на их звуковоспроизводящие модули (пьезомодули сигнализации о пожаре или утечке газа) различных «звуковых» предупреждений, например, о пожаре в соседней квартире или доме, об утечке газа в доме и т.д., в т.ч. и сигналов ГО, **что может принципиально изменить всю систему оповещения МЧС России** [35].

Рис. 5.5. Схема «умного дома»

Список литературы

1. Буловский П.И., Зайденберг М.Г. Надежность приборов систем управления /Справ. пос./, Л: Машиностроение, 1975. -238с.
2. ГОСТ 12.1.004 Пожарная безопасность. Общие требования. - М.: Изд. стандартов, 1992. -77с.
3. ГОСТ 12.1.044 (МЭК 79-4; ИСО 1182 и др.) Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения - М.: Изд. стандартов, 1990. -143с.
4. ГОСТ 27.410-87 Методы контроля показателей надежности и планы контроля испытаний на надежность - М.: Изд. стандартов.
5. Груничев А.С. и др. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность, М: Сов.радио,1969.

6. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ - М.: Радио и связь, 1988. -168с.
7. Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств - М.: Наука, 1989. -160с.
8. Белозеров В.В., Топольский Н.Г. Термодинамический метод оценки объектов повышенной опасности и риска поражения ими ноосферы // «Информатизация систем безопасности»: материалы 2-й межд. конф. ИСБ-93. - М.: ВИПТШ МВД РФ (МАИ), 1993. с.45-51.
9. Белозеров В.В., Топольский Н.Г., Смелков Г.И. Вероятностно-физический метод определения пожарной опасности радиоэлектронной аппаратуры // «Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ»: материалы XII Всероссийской науч.-практ. конф. - М.: ВНИИПО, 1993. с.23-27.
10. Концепция общей опасности техногенной сферы /Белозеров В.В., Волошин В.А., Белозеров В.В. /отчет о НИР № НИР 4.65 от 15.02.1996 (Министерство образования и науки РФ) – Ростов н/Д: РГУ, 1998. -33с.
11. Методика оценки пожарной опасности растровых дисплеев СМ-7238 /Белозеров В.В., Волошин В.А.. – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 1992. – 140с.
12. Техничко-экономическое обоснование ЛАС ПЗ Кольской АЭС //Белозеров В.В., Волошин В.А., Удовиченко Ю.И. / отчет о НИР по Договору № 6124/6 от 01.04.93 – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ (Полярные Зори: КАЭС), 1993. – 62с.
13. Методика оценки пожарной опасности холодильника термоэлектрического (ХТ-25) /Белозеров В.В., Волошин В.А., Белозеров В.В., отчет о НИР № 4.65 МНТП от 12.01.1996 – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 1997.
14. Методика оценки надежности и пожарной опасности мини электропечи лабораторной (МПЛ - 6) //Белозеров В.В., Волошин В.А., Белозеров В.В. /отчет о НИР № 4.65 от 12.01.1996 – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 1998
15. Методика оценки пожарной опасности и надежности смесителя лабораторного с электромагнитным приводом (СЛЭП - 1) //Белозеров В.В., Волошин В.А., Белозеров В.В. /отчет о НИР № 4.65 от 15.01.1996 – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 1999.
16. Методика оценки пожарной опасности виброанализатора (А - 200) //Белозеров В.В., Волошин В.А., Белозеров В.В. /отчет о НИР № 4.65 от 16.01.1996 – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 1999.
17. Методика оценки пожарной опасности и надежности ультразвукового измерителя уровня жидкости /Белозеров В.В., Пляка П.С., Белозеров В.В. – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 2000. – 57с.
18. Методика оценки пожарной опасности и надежности блока индикации уровнемера /Белозеров В.В., Пляка П.С., Белозеров В.В. – Ростов н/Д: НИИ физики РГУ, 2000. – 61с.

19. Методика оценки пожарной опасности и надежности холодильников-морозильников «STINOL» //Белозеров В.В. /отчет о НИР с ЗАО "СТИНОЛ" от 14.01.2000 – Ростов н/Д: РГУ, 2001. -56с.

20. 12. Белозеров В.В., Загускин С.Л., Прус Ю.В., Самойлов Л.К., Топольский Н.Г., Труфанов В.Н. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ - Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 8, С. 34.

21. 13. Иыуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. - М.:Выш.шк.,1989. -216с.

22. 10. Белозеров В.В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью /дис...д-ра тех. наук – Ростов н/Д: ЮФУ, 2012. -382с.

23. 14. Патент РФ на изобретение № 2060566 от 20.05.96 / Белозеров В.В., Гольцов Ю.И., Кулешова Н.И., Шпак Л.А. Способ получения полупроводникового керамического материала на основе титана бария, легированного ниобием.

24. 15. Белозеров В.В., Гольцов Ю.И., Шпак Л.А., Юркевич В.Э. ПОЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СТЕНДА ТЕРМОЭЛЕКТРОПРОГОНА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ - Известия Российской академии наук. Серия физическая. 1993. Т. 37. № 6. С. 155.

25. 16. Белозеров В.В. Экспериментальные методы оценки качества, надежности и безопасности электроприборов - Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. - № 5 (27).-2009.- 9 с. –URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/> (дата обращения: 27.09.15).

26. 17. Белозеров В.В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛОВ С КОНТРОЛЕМ ИХ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ /дис....канд. тех. наук - Академия государственной противопожарной службы. Москва, 2008

27. 18. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. (пер.с англ.)- М.: Наука,1976. -736 с.

28. 19. 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: в сб. докл. "Семинара по проблемам пожарной безопасности АЭС"/Хмельницкая АЭС,г.Неттежин,28.09-02.10.92/- М.: Интератомэнерго, 1992, с.18-27.

29. 20. Патент США 4352239 МКИ НОИЛ 21/447, опубл. 05.101982 НАСТ-методика.

30. 21. Белозеров В.В., Тетерин И.М., Топольский Н.Г. Модульные системы безопасности электроприборов - Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. - Вып. 4. -2005. - 3 с. - URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/> (дата обращения: 27.09.15)

31. 22. Белозеров В.В., Олейников С.Н. О пространственно-временном статистическом анализе пожаров - Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 4; URL: www.science-education.ru/110-9805 (дата обращения: 27.09.15).

32. 23. Белозеров В.В., Борков П.В., Кобелева С.А., Олейников С. Н., Насыров Р.Р., Даминев Р.Р. Новые технологии и материалы в производстве и строительстве: вопросы проектирования, разработки и внедрения /ISBN 978-5-91940-493-4.- М.: Издательство Перо, 2012. -148 с.

33. 24. Белозеров В.В., Гапкало Н.И. «Интеллектуализация» бытовых электроприборов -«Строительство-2008»: Материалы межд. науч.-практ. конф.- Ростов н/Д: РГСУ, 2008, с.263-267.

34. 25. Летнев О.В., Тесля Э.П. Способ динамической идентификации различного рода объектов и система для его осуществления /Патент РФ № 2152076 от 27.06.2000/.

35. 26. Белозеров В.В. Синергетика безопасной жизнедеятельности /монография – Ростов н/Д: Изд. центр ЮФУ, 2015. – 420с.

РАЗДЕЛ II

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВРЕДА ОТ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Глава 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ «ВРЕДА»

6.1. Существующие способы и устройства обнаружения опасностей техносферы

Известно много способов и устройств обнаружения различных опасностей техносферы, таких как пожары, аварии, токсические выбросы [1,2]:

дымовые – ионизационные и оптические;

тепловые – пороговые и аналоговые;

пламенные – оптико-электронные, использующие ультрафиолетовое или инфракрасное излучение пламени;

газовые – на продукты выбросов и горения.

6.1.1 Дымовые сенсоры

Дымовые датчики наиболее чувствительны и делятся на два основных класса: ионизационные и фотоэлектрические.

Принцип действия ионизационных сенсоров основан на регистрации изменений ионизационного тока, возникающих в результате воздействия на него продуктов выбросов и горения. При этом ионизационные датчики делятся на радиоизотопные и электроиндукционные.

Радиоизотопные сенсоры срабатывают вследствие воздействия продуктов выбросов и горения на ионизационный ток внутренней рабочей камеры прибора. Принцип действия радиоизотопного датчика основан на ионизации воздуха камеры при облучении его радиоактивным веществом. При введении в такую камеру противоположно заряженных электродов возникает ионизационный ток. Заряженные частички «прилипают» к более тяжелым частичкам дыма, снижая свою подвижность — ионизационный ток уменьшается и его уменьшение до определенного значения воспринимается как сигнал «тревога». Такой сенсор эффективен при регистрации дыма любой природы, в т. ч. «черных» видов дыма, характеризующихся высоким уровнем поглощения света [3].

Рис. 6.1. Схемы дымовых датчиков:

а — световой СИ-1: 1 — счетчик фотонов; 2 — крышка; 3 — основание; б — комбинированный КИ-1.

Однако наряду с описанными выше достоинствами радиоизотопные датчики имеют существенный недостаток, о котором не следует забывать. Речь

идет об использовании в их конструкции источника радиоактивного излучения. В связи с этим возникают проблемы соблюдения мер безопасности при эксплуатации, хранении и транспортировке, а также их утилизации после окончания срока эксплуатации.

Фотоэлектрический сенсор определяет наличие дыма, путем обнаружения поглощения оптического излучения в специальной камере, где расположена пара «светодиод-фотоэлемент» (рис.6.2). Двухпроводная схема подключения к панели через адресную линию. Диагностика нормальной работы электронной схемы и чувствительности датчика автоматически производится после подключения питания, а также каждые 24 часа непрерывной работы [3].

Рис. 6.2. Фотоэлектрический дымовой извещатель 5193SD.

6.1.2 Тепловые сенсоры

Тепловые датчики наиболее распространены и делятся также на два класса: пороговые и аналоговые (рис.3).

Первый электрический пожарный извещатель был тепловым. Одними из первых создателей тепловых извещателей были Фрэнсис Роббинс Аптон и Фернандо Диббл, которые получили патент США (№ 436961) 23 сентября 1890 года. В конструкции были электрические батареи, колокольный купол, магнит в разомкнутой цепи, и термостатическое устройство. Термостатическое устройство обнаруживало аномальное количество тепла. После того, как устройством зафиксировано превышение максимальной температуры, контур между батареей и магнитом замыкается. При этом молоточек ударяет по колокольному куполу, предупреждая находящихся в помещении [3].

Рис. 6.3. Тепловые датчики.

В современных пороговых тепловых датчиках используют сплав Вуда или магнитоуправляемые герконы, а в аналоговых – различные датчики температуры (термисторы, позисторы и т.д.).

6.1.3. Датчики пламени

Пламенные или оптические датчики применяются в основном на промышленных объектах и реагируют на электромагнитное излучение пламени или тлеющего очага – ультрафиолетовой или инфракрасной области излучения.

Датчики пламени (рис.6.4) применяются, как правило, для защиты зон, где необходима высокая эффективность обнаружения, поскольку обнаружение пожара или пламени вспышки происходит в начальной фазе аварии или пожара, когда температура в помещении ещё далека от значений, при которых срабатывают тепловые датчики.

Рис.6.4. Извещатель пламени

Датчики пламени обеспечивают возможность защиты зон со значительным теплообменом и открытых площадок, где невозможно применение тепловых и дымовых сенсоров.

Датчики пламени применяются для обнаружения перегретых поверхностей агрегатов при авариях, например, для обнаружения пожара в салоне автомобиля, под обшивкой агрегата, контроля наличия твердых фрагментов перегретого топлива на транспорте и т.д. [3].

6.1.4. Газовые сенсоры

Газовые сенсоры – реагируют на различные газы, которые представляют опасность для персонала или технологического процесса (например, метан в жилом секторе и другие предельные углеводороды в шахтах или в выбросах автомобилей), оксид углерода (при тлении или горении материалов, в т.ч. в производственных печах).

Газоанализаторы обнаруживают многие опасные газы (хлор, водород, аммиак и т.д.) и взрывоопасные газовые среды в промышленности (метанола, бензина, спирта и т.д.).

6.1.5. Мультидатчики

Наиболее эффективными сенсорами считаются комбинированные датчики, сочетающие в себе фотоэлектрические и тепловые чувствительные элементы. Подобные типы мультидатчиков применяются уже длительное время, используя очень простую систему принятия решения "или-или", когда сигнал тревоги подается, в случае срабатывания одного или другого датчика [3].

Совершенствование технологии дало возможность внедрить в мультидатчики микропроцессоры, что определило эффективность успешного обнаружения разных опасностей [4].

6.1.6. Результаты испытаний и сертификации способов обнаружения и сенсоров, их реализующих

В Европе тестовые очаги пожаров для испытаний были разработаны для разбивки сенсоров по категориям в зависимости от их характеристик, регистрируемых в управляемых условиях (стендах), предназначенных имитировать многие различные виды аварий и пожаров, которые могут происходить в реальных условиях (рис.6.5).

Рис. 6.5. Европейские тестовые пожары. TF1 - горение древесины, TF2 - тление древесины, TF3 - тление хлопка, TF4- горение пенополиуретана, TF5- горение гептана, TF6 - горение спирта.

Для того чтобы дымовой датчик был сертифицирован по европейским нормам, он должен вписываться в нормативы, определенные для испытаний категорий TF2, TF3, TF4 и TF5. Как видно из рис. 6.5, фотоэлектрический извещатель лучше всего подходит для категории TF2, в то время как ионизационный - для испытаний по категориям TF4 и TF5. Аварии и пожары категорий и TF4, и TF5 вызывают образование меньшего количества вредных частиц, но одновременно значительного объема тепла, поэтому включение теплочувствительного элемента вместе с фотоэлектрической камерой, настроенных на требуемые алгоритмы, дает возможность получить мультидатчик, аналогичный по своим характеристикам - ионизационному при пожарах категорий TF4 и TF5, но превосходящий последний при категории TF2, поскольку он является фотоэлектрическим.

Общие характеристики комбинированного фото-теплового мультидатчика лучше, чем просто ионизационного или просто фотоэлектрического, что подтверждено его показателями в испытаниях по авариям и пожарам других категорий (TF1 и TF6), которые не включены в европейские стандарты на детекторы дыма. Комбинированный фото-тепловой мультидатчик способен пройти оба этих испытания и остается оценить его устойчивость к ложным срабатываниям [4].

Известно [4], что лучшим оружием противодействия подаче ложных сигналов является применение задержки по времени срабатывания, так как феномен всех ложных сигналов кроется в их временном характере. Взрывы и пожары с пламенем в своем развитии значительно более быстры, как и

создаваемые ими угрозы для жизни, по сравнению с тлеющими источниками, т.к. именно пламя создает высокую температуру. Следовательно, у комбинированного фото-теплового мультидатчика алгоритмы определения опасности должны иметь существенную задержку по времени в ситуациях, когда не наблюдается сколько-нибудь значительного изменения температуры.

Явление ложного сигнала, воздействующее на датчик дыма, никакого тепла не генерирует, вот почему до того как были разработаны мультидатчики, тепловые сенсоры были единственной альтернативой дымовым там, где наблюдались проблемы с ложными сигналами. Создание режима задержки по времени в фотоэлектрических датчиках - единственная возможность для их использования в тех местах, где их альтернативой мог бы стать - ионизационный. Таким образом, фото-тепловые мультидатчики могут с успехом заменить ионизационные в более сложных средах.

Тем не менее, чем больше различных сенсоров содержит мультидатчик, тем лучше его способность обнаружения опасности. Любые алгоритмы, реализованные в нём, должны постоянно обеспечивать компромисс между обнаружением опасности и подачей ложного сигнала. Чем больше сенсоров в датчике, тем больше шанс приблизиться к 100% обнаружению опасности со 100%-ным исключением ложных тревог.

Считается [4], что определение типа газа является альтернативной технологией для дымовых и тепловых датчиков. Известны технические решения и электрохимические датчики CO, недавно с успехом, вышедшие на мировой рынок. Их изготовители заявляют о превосходстве этого класса сенсоров по параметру ложных тревог. Однако как одно сенсорное устройство они не могут отвечать всем критериям обнаружения аварии или пожара, т.к. выигрыш в подавлении ложных тревог оборачивается проигрышем в эффективности обнаружения.

Пожарные испытания показали, что наиболее приемлемыми для обнаружения газами являются CO и CO₂. К сожалению, как видно из рис. 6.6, ни при каком тестовом пожаре по европейским нормам (EN54) не выделяется достаточное количество газов CO или CO₂ для гарантированного выявления пожара только одним газовым датчиком.

Рисунок 6. TF1 - горение древесины, TF2 - тление древесины, TF3 — тление хлопка, TF4 — горение пенополиуретана, TF5 — горение гептана, TF6 — горение спирта.

Для эффективной работы газового датчика максимально возможные уровни газа в нормальных условиях должны быть значительно меньше, чем при обнаружении пожароопасной ситуации. Это не выполняется для показанных уровней газа, поэтому каждый датчик придется настроить на существенно больший порог, что приведет к тому, что датчик не отреагирует на тестовые пожары, а если его установить на достаточно низком уровне для прохождения испытания, может случиться так, что датчик станет реагировать на окружающий воздух и подавать ложные сигналы.

Исследовательская лаборатория ВМФ США провела ряд пожарных испытаний [4], часть которых преследовала цель установить концентрацию веществ при ложных сигналах, другая часть - при подаче сигнала о пожаре.

Конечно, иногда различие между ложным и настоящим сигналами было всего лишь делом уровня и времени; например, подгорающий в тостере хлеб обычно будет классифицирован как ложный сигнал, если только он не оставлен в тостере и не загорелся. Используя данные исследований ВМФ, можно разбить на категории способность комбинированных датчиков проводить различие между настоящим пожаром и ложным сигналом при наличии в своем составе по одному датчику: газовому, фотоэлектрическому и тепловому.

Так на рисунке (рис.6.7) показаны испытания с помеховым воздействием - горячим душем.

Рис. 6.7. Испытание: помеховое воздействие горячим душем

Наблюдаются существенные изменения теплового режима, CO_2 и фотоэлектрических датчиков, однако с примененными алгоритмами уровень сигнала для комбинации (на графике он должен превысить отметку 2,5 по правой шкале) не преодолен, что является хорошим примером указанной комбинации.

На следующем рисунке (рис. 6.8) показан небольшой пожар с горящим гептаном, тест который очень труден для фотоэлектрического датчика, т.к. его пламя не производит ощутимых изменений ни температуры, ни CO_2 . Однако совмещение фотоэлектрического выхода и выхода CO_2 оказывается достаточным для превышения их комбинацией порога, т.е. для идентификации пожара.

Рис. 6.8. Испытание: горение гептана

Результаты пожарных испытаний лаборатории ВМФ США (рис. 6.9-6.11) свидетельствуют о том, что комбинированные датчики имеют значительные преимущества.

Рис. 6.9. Вероятность определения жестких помех (%) (пескоструйная обработка, приготовление пищи, сварка, курение, душевые).

Рис. 6.10. Вероятность раннего определения пожара (%) (от тления до открытого пламени)

Рис. 6.11. Общая эффективность работы извещателей. В диаграмме допускается равнозначность воздействия пожара и помехового воздействия.

6.1.7. Аспирационные системы

Тем не менее, все перечисленные способы и датчики обладают большой инерционностью, т.е. обнаруживают опасный фактор, когда «тот дойдет» до чувствительного элемента. А в связи с тем, что датчики, как правило устанавливаются на потолках, то «приход к ним» дыма, газа или температуры составляет от нескольких до десятков минут [2,4]. Поэтому для раннего обнаружения опасных факторов пожара был разработан аспирационный способ и система его реализующая, обычно называемые «проточными» (рис.6.12).

Рис. 6.12. Структурная схема аспирационной системы

Сущность этого способа заключается в том [4], что используются те же датчики, но устанавливаются они в трубопроводе и через них «прокачивается» воздух защищаемого помещения. Иными словами, если возникают опасные факторы, то они «втягиваются в датчик» и обнаруживаются на порядок быстрее.

6.2. Способы измерения качества и количества потребляемой электроэнергии

Хорошо известно [1,5], что низкое качество потребляемой электроприборами электроэнергии уменьшает их технический ресурс и создает условия для возникновения в них пожароопасных отказов, т.е. увеличивает вероятность пожаров по электротехническим причинам. Следовательно, введение «интеллекта» и комбинированных «проточных» датчиков в электросчетчики, помимо мониторинга и возможности регулирования оплаты в соответствии с качеством электроэнергии, позволит обеспечить раннее обнаружение пожара в помещениях, где такой электросчетчик установлен, а также включить оповещение о пожаре и передать вызов в ближайшую пожарную часть, при наличии радиоканала.

В качестве способа регистрации качества получаемой и используемой электроэнергии для промышленных предприятий (3-х фазный ЭС), может быть использован отечественный прибор LPW-305 (рис.13) или стационарный анализатор количества и качества электрической энергии Circutor серии CVM, которые обеспечат не только измерение всех ПКЭ, обусловленные ГОСТ 13109-97, но также и дополнительных параметров (ГОСТ Р 51317.4.30–2008 (МЭК 61000-4-30:2008) и ГОСТ Р 51317.4.7–2008 (МЭК 61000-4-7:2002)), необходимых для вычисления и визуализации доли качественной электроэнергии:

Рис. 6.13. Блок схема подключения LPW-305

- размах изменения напряжения,
- установившееся отклонение напряжения,
- доза фликера,
- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения,
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения,
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности,
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности,
- длительность провала напряжения.
- отклонение частоты,
- коэффициент временного перенапряжения,
- импульсное напряжение,

которая и должна оплачиваться потребителем, а также доли «некачественной электроэнергии», за которую следует штрафовать производителей и поставщиков электроэнергии, т.к. она увеличивает пожарно-энергетический вред, вызывая преждевременные отказы электроприборов, в т.ч. пожароопасные.

В квартирах и частных домах (однофазный ЭС), т.е. при потребляемой мощности до 4 кВт, может быть использован недорогой (около 1000 руб.) отечественный прибор МТ4011 (рис.14) или другие аналогичные [8].

Устройство предназначено для измерения мощности электроэнергии и контроля количества потребляемой электроэнергии. Диапазон измерений – от 2 до 3680 Вт.

Измеритель имеет 3 режима отображения информации:

1. Время (в формате 24 ч), день недели, мощность электроэнергии в Вт (W) и частота Гц (Hz).
2. Текущее напряжение в вольтах (V), ток в амперах (A) и общее время потребления электроэнергии (H – в часах).
3. Общее количество потребленной электроэнергии (KWh – киловатт-час) и стоимость потребленной электроэнергии.

Рис. 6.14. Измеритель мощности электроэнергии МТ4011

Устройство может измерять стоимость электроэнергии по двум тарифам (стандартному и специальному), также можно установить время действия специального тарифа.

Таким образом, комплексирование автономного пожарного извещателя с электросчетчиком (далее - ЭС), который может регистрировать «некачественность» электроэнергии, и изменение по этой причине вероятности пожара от электроприборов, т.е. пожарно-электрического вреда, помимо мониторинга и возможности регулирования оплаты в соответствии с качеством электроэнергии, позволит обеспечить обнаружение пожара в помещении

(например, в квартире), где такой электросчетчик установлен, и включить звуковое оповещение о пожаре [6].

Глава 7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПОЖАРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО «ВРЕДА» И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОЖАРОВ ОТ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

7.1. Синтез системы определения ПЭВ

Для реализации такого электросчетчика - автономного пожарного извещателя (далее - ЭСАПИ) необходимо:

- выбрать способ обнаружения пожара и тип извещателя;
- выбрать способ контроля качества электроэнергии и тип электросчетчика;
- оптимизировать структуру электронного блока обработки сигналов;
- скомпоновать ЭС и АПИ в ЭСАПИ.

Как показали исследования [5-7], наиболее эффективным в этом случае станет сочетание фотоэлектрического, теплового и газового датчиков с аспирационным способом.

Однако с точки зрения «выделения некачественной электроэнергии», представляется целесообразным использовать «статистический способ» определения потребляемой мощности, в котором при измерении и оцифровке кривой переменного напряжения сети, осуществляется выделение отклонений от установленных ГОСТ 13109-97 значений, которые запоминаются, и по истечении любого интервала времени (час, сутки, неделя, месяц) по определенным алгоритмам определяются [9]:

$$W = W_d + W_{нд}, \quad (7.1)$$

где W – общее количество электроэнергии, отпущенной потребителю за время T , W_d – количество израсходованной электроэнергии при допустимых отклонениях, $W_{нд}$ – количество израсходованной электроэнергии при недопустимых отклонениях.

Способ определения пожарно-электрического вреда по потребляемой электроэнергии заключается в том, что с помощью электросчетчика-извещателя, синхронно измеряют и оцифровывают сетевое напряжение и потребляемый ток в реальном масштабе времени, с вычислением стандартных параметров качества электроэнергии, по которым вычисляется и отдельно визуализируется потребленная электроэнергия с допустимым качеством и - недопустимым, значения которых умножаются на соответствующие константы вероятности пожаров по электротехническим причинам, и в результате суммирования указанных результатов определяется и визуализируется пожарно-электрический вред, который подлежит налогообложению [10].

Раннее обнаружение опасных факторов пожара осуществляется с помощью прокачивания воздуха защищаемых помещений через аспирационную систему с электросчетчиком-извещателем (рис.6.15), в котором, для достоверного обнаружения опасных факторов пожара в

помещениях, где размещена аспирационная система, установлены, по меньшей мере, три разных датчика, синхронно реализующих три разных способа регистрации ОФП – тепловой, дымовой и газовый, по коррелированным значениям которых с учетом вычисленного пожарно-электрического вреда, происходит идентификация ложных сигналов или пожара, о чем выдается прерывистый звук тревоги, который может быть передан в ближайшую пожарную часть по радиоканалу (рис.16), при этом данные о потребленной электроэнергии с допустимым и недопустимым качеством по тому же радиоканалу могут быть переданы в органы энергонадзора и энергосбытовые организации [6].

Рис. 7.1. Блок-схема электросчетчика-извещателя

Рис. 7.2. Схема аспирации с ЭСАПИ

7.2. Достоверность и надежность предотвращения пожаров ЭП

Достоверность и эффективность раннего обнаружения пожара с помощью ЭСАПИ заключается в том, что ещё до появления дыма и пламени происходит обнаружение пожароопасного режима электроприборов, и, «не дожидаясь» сигналов от теплового и газового датчиков, ЭСАПИ отключает электроэнергию, если пожароопасный режим достигнет - «пожароугрожаемого».

Дело в том, что общепринятое моделирование температурного режима развития пожара с минимальной погрешностью (рис. 17) осуществляется по уравнению «стандартного пожара» [12]:

$$T = 345 \lg(8t+1) \quad (7.2)$$

где T – температура, °C; t – время, мин.,

производная от которого, является гиперболической функцией асимптотически приближающейся к оси « t », т.е. к нулевому значению скорости (производной T):

$$T' = 150/(8t+1) - \text{производная температуры, град/мин.} \quad (7.3)$$

Рис. 7.4. Графики «стандартного пожара»

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что существующие в настоящее время «пороговые извещатели» (тепловые, газовые и т.д.) имеют большие погрешности потому, что на начальной стадии загорания отсутствуют экстремумы, и таблица (таб.1) нормированных значений опасных факторов пожара (ОФП), а также графики функций их основных компонент (рис.7.5-7.7) подтверждают это.

Именно поэтому существующие системы взрывопожарной сигнализации имеют многочисленные ложные срабатывания, в связи с чем, любым узлом датчиков обнаружения концентраций газообразных продуктов термодеструкции в воздухе, окислителей, восстановителей, дыма и

температуры, невозможно идентифицировать возникновение пожара на начальной стадии, в связи с отсутствием экстремумов на ней [13].

Таблица 7.1

Нормированные значения опасных факторов пожара

№ п/п	Опасный фактор пожара	Предельное значение
1	Оксид углерода (угарный газ) – CO	1,16 г/м ³ (0,1 % объема)
2	Двуокись углерода (углекислый газ) – CO ₂	0,00011 г/м ³
3	Хлористый водород	0,000023 г/м ³
4	Температура	70 °С
5	Интенсивность теплового излучения	1,4 кВт/м ²
6	Концентрация кислорода	15 %
7	Предельная видимость в дыму	20 м

Источники. 1–4, 6 – ГОСТ 12.1.004–91; 5 – ГОСТ 12.3.047–98; 7 – Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МВД РФ, 2000.

Рис. 7.2. График зависимости среднеобъемной концентрации монооксида углерода

Рис. 7.3. График зависимости среднеобъемной концентрации кислорода

Рис. 7.4. График зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма

Примечание: приведены примеры прогнозирования динамики ОФП с использованием интегральной математической модели пожара, которую реализует программа INTMODEL, разработанная на кафедре ИТиГ Академии ГПС МЧС России, в которой для численного решения системы дифференциальных уравнений использован метод Рунге-Кутты-Фельберга 4-5 порядка точности с переменным шагом

С точки зрения применения аспирационной системы ситуация остается такой же, даже при измерении скорости изменения концентрации газа или дыма в аспирационной системе, т.к. скорость потока в трубопроводе, определяется характеристиками вентилятора, а также диаметрами и количеством «точек всасывания», число которых редко составляет менее десятка, т.к. трубопровод, как правило, «охватывает» несколько защищаемых помещений, в связи с чем, концентрация газовых компонентов пожара в одном из них, «разбавляется» в трубопроводе до прихода в измерительную камеру в несколько раз. Этот же вывод справедлив и для частиц дыма, т.к. задымленность и скорость её нарастания осуществляется путем регистрации рассеяния оптического излучения частицами дыма, о чем свидетельствует метод определения коэффициента дымообразования в ГОСТ 12.1.044 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» и принципы работы дымовых пожарных извещателей [14].

Таким образом, с точки зрения раннего обнаружения пожара ЭСАПИ имеет не конкурируемое качество в сравнении с любыми извещателями.

Иными словами, речь идет о новом понятии (характеристике) – пожарно-электрическом вреде, который призван заменить качественный (дискретный и латентный) подход в диагностике и мониторинге разных состояний контролируемого объекта - на количественный (аналитический и временной), позволяющий осуществлять непрерывный контроль за расходом пожаробезопасного ресурса электроприборов, чтобы вовремя прекратить их эксплуатацию (в т. ч. для осуществления планового ремонта, продлевающего этот ресурс), пока очередной пожароопасный отказ не привёл к возникновению

пожара в них, что является предельным значением («максимумом») функции ПЭВ.

Раскрытие общей формулы (1) показывает, что пожарно-электрический вред определяется, как сумма величин «качественной» и «некачественной» электроэнергии, потребленной и преобразованной пользователем в своих электроприборах и линейно-кабельных сооружениях, умноженной на соответствующие вероятности пожара от них, т.е. ПЭВ пропорционален потреблённой электроэнергии и имеет размерность кВт/ч, [10]:

$$\text{ПЭВ} = P_{\text{д}} \cdot W_{\text{д}} + P_{\text{нд}} \cdot W_{\text{нд}}, \quad (7.4)$$

где ПЭВ – пожарно-электрический вред за время Т, $P_{\text{д}}$ – вероятность пожара по электротехническим причинам при допустимых отклонениях параметров электроэнергии,

$P_{\text{нд}}$ – вероятность пожара по электротехническим причинам при недопустимых отклонениях параметров электроэнергии.

Указанные вероятности должен получать и обновлять энергонадзор (корректировка констант во время проверок ЭСАПИ) ежегодно, используя данные МЧС России по статистике пожаров на аналогичных объектах по электротехническим причинам. Это обусловлено тем, что указанные вероятности имеют нелинейный характер, т.к. интенсивности пожароопасных отказов описываются модифицированным уравнением Аррениуса-Эйринга (4) и системой неравенств (5) Семенова, Зельдовича и Франк-Каменецкого [15]:

$$\lambda = A(P, V, N, F) \frac{kT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \exp[f(H)] \quad (7.5)$$

где λ – текущая интенсивность отказа элемента, 1/час; $A = k_i \cdot \lambda_0$ – произведение безразмерных коэффициентов, зависящих от давления, влажности, вибраций и т.д.) на интенсивность отказов при хранении (λ_0), 1/час; k – постоянная Больцмана, $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура элемента, °К; h – постоянная Планка, $6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; E_a – эффективная энергия активации отказа, Дж; $f(H)$ – функция нетермической (энергетической) нагрузки.

$$\begin{cases} Ze = \sqrt{2\lambda_{\text{в}} \frac{RT_{\text{п}}^2}{E_a} \cdot H \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\text{п}}}\right)}; \\ Se = \frac{Q \cdot V}{S \cdot \alpha} \cdot \frac{E_a}{RT_{\text{по}}^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\text{по}}}\right); \\ F_{\text{к}} = \frac{Q \cdot r^2}{\lambda_0} \cdot \frac{E_a}{RT_0^2} \cdot K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right); \end{cases} \quad (7.6)$$

где Ze – критерий Зельдовича (критическая плотность теплового потока); λ – коэффициент теплопроводности газовой фазы; R – газовая постоянная; $T_{\text{п}}$ – 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 объём образца; S – текущая площадь поверхности образца; α – текущий коэффициент теплоотдачи образца; $T_{\text{по}}$ – температура поверхности образца; $F_{\text{к}}$ – критерий Франк-Каменецкого ($F_{\text{к}}=2,00$); r – линейный размер образца; λ_0 – коэф.теплопроводности образца; T_0 – температура образца.

Поэтому их определение возможно только при использовании баз данных статистики пожаров МЧС России в каждом конкретном регионе, а также программы её обработки методом анализа временных рядов [16,17], а реализовать это на объектах народного хозяйства, и в первую очередь в жилом секторе, можно только с помощью электросчетчика-извещателя при взаимодействии энергонадзора и госпожнадзора [18].

Учет сезонных и территориальных особенностей при возникновении пожаров и социально-экономических потерь от них может осуществляться с помощью поправочного коэффициента, вычисляемого, как отношение суммарных потерь в течение сезона (ущерба, гибели, травм и т.д. в денежном выражении) от пожаров по электротехническим причинам на аналогичных объектах в административно-территориальной единице (АТЕ), где расположен объект, к общему числу таких объектов в данном АТЕ.

Метод определения ПЭВ и ОФП с помощью ЭСАПИ следует реализовать в первую очередь в жилом секторе, т.к. именно в нём происходит более 70% пожаров, в которых погибает и травмируется более 75% всех пострадавших от пожаров [1,11].

Предлагаемый метод и ЭСАПИ позволяют в кратчайшие сроки реализовать его внедрение с помощью реинвестиционной модели системы адаптивного пожарно-энергетического налогообложения физических и юридических лиц не только в жилом секторе, но и на всех объектах промышленности, торговли, здравоохранения, образования, науки и культуры [7,10].

Литература

1. Богуславский Е.И., Белозеров В.В., Богуславский, Н.Е. Прогнозирование, анализ и оценка пожарной безопасности /Уч.пособие под ред. проф. Богуславского Е.И./ - Ростов н/Д: РГСУ, 2004. - 151с.
2. Шаровар Ф.И. Принципы построения устройств и систем автоматической пожарной сигнализации. - М.:Стройиздат,1983. -335с.
3. Членов А.Н. Автоматические пожарные извещатели. - М.: НИЦ "Охрана" ВНИИПО МВД России, 1997.-51с.
4. Федоров А.В., Членов А.Н., Лукьянченко А.А., Буцынская Т.А., Демёхин Ф.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара: Монография.-М.: Академия ГПС МЧС России. 2009.-158 с.
5. Белозеров В.В., Топольский Н.Г., Смелков Г.И. Вероятностно-физический метод определения пожарной опасности радиоэлектронной аппаратуры // Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ: Материалы XII Всероссийской науч.-практ.конф.- М.: ВНИИПО, 1993, с.23-27.
6. Белозеров В.В., Олейников С.Н. Способ определения пожарно-энергетического вреда и опасных факторов пожара с помощью

электросчетчика-извещателя –заявка на изобретение - № 2012138374 от 07.09.2012.

7. Белозеров В.В., Плахотников Ю.Г., Афанасьев Н.С., Олейников С.Н., Топольский Н.Г. К вопросу об управлении пожарной и экологической безопасностью на объектах топливно-энергетического комплекса //«Геленджик-2012. Актуальные проблемы развития ТЭК регионов России и пути их решения»: мат-лы 9-й междунар.конф. по проблеме нефтегазоносности Черного, Азовского и Каспийского морей /Геленджик, 28.05-01.06.2012/- Геленджик: ГНЦ ФГУГП «Южморгеология», 2012, с.8-16.

8. Умный измеритель мощности электроэнергии МТ4011 – <http://www.smartron.rukatalogproductssaveenergyizmeritel-moschnosti-elektroenergii-mt4011>

9. Ермаков В.Ф., Кушнарев Ф.А., Никифорова В.Н., Решетников Ю.М. Статистический анализатор качества и расхода электроэнергии - патент RU 2260842 от 20.09.2005

10. Белозеров В.В., Олейников С.Н. К вопросу об адаптивном пожарно-энергетическом налоге в обеспечении пожарной безопасности //”Совершенствование теории и методологии финансов и налогообложения”: мат-лы междунар. научно-практ. конф. /10 мая 2012 г., Йошкар-Ола, ISBN-978-5-905371-29-5/Приволжский НИЦ - Йошкар-Ола: «Коллоквиум». 2012, с.106-111.

11. Серебренников Е.А. Динамика оперативной обстановки с пожарами в Российской Федерации – в сб.мат-лов XVII Межд.науч.-практ.конф. «Пожары и окружающая среда». - М.: ВНИИПО, 2002, с.3-10.

12. Зайцев А.М., Черных Д.С. О системной погрешности аппроксимации температурного режима стандартного пожара математическими формулами - Пожаровзрывобезопасность – т.20, № 7, 2011, с.14-18

13. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. пособие – М.: Академия ГПС МВД РФ, 2000, с.21-42.

14. Федоров А.В., Членов А.Н., Лукьянченко А.А., Буцынская Т.А., Демёхин Ф.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара: Монография – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009.-158 с

15. Белозеров В.В. Экспериментальные методы оценки качества, надежности и безопасности электроприборов - Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. - Вып. 5 (27). -2009. - 9 с. - <http://ipb.mos.ru>

16. Белозеров В.В., Олейников С.Н. О пространственно-временном статистическом анализе пожаров - Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 4; URL: www.science-education.ru/110-9805.

17. Белозеров В.В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью: дисс.... д-ра тех. наук - ЮФУ, 2012. – 422

18. Олейников С.Н. Модели и алгоритмы управления пожарной безопасностью жилого сектора: дисс.... канд. тех. наук – АГПС МЧС России, 2013.-252 с.

РАЗДЕЛ III

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Глава 8. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Обеспечение надежности и безопасности СВТ в период эксплуатации в составе различных АСУ является важнейшей задачей, особенно для объектов повышенной опасности: атомные электростанции (АЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и др.

Как следует из проведенного анализа, типовая двухуровневая АСУ ТП (рис.8.1) состоит из [7 - 10]:

Рис. 8.1. Схема стандартной двухуровневой АСУ ТП

-из системы, предназначенной для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления supervisory control and data acquisition (SCADA).

- из операторской рабочей станции (ОРС), необходимой для отображения состояния технологического процесса в виде мнемосхем, отображения аварийных ситуаций с помощью световой и звуковой сигнализаций и изменения задания или установок работы системы АСУ ТП;

- из инженерной рабочей станции (ИРС), необходимой для программирования контроллеров и создания проекта SCADA системы для АСУ ТП;

- из вычислительной рабочей станции (ВРС), необходимой для выполнения сложных математических операций (задачи оптимизации и адаптации, получения и анализа спектров, Фурье-обработка);

- из сервера баз данных (БД), который осуществляет передачу данных о состоянии технологического процесса на более высокие уровни автоматизации, а также хранение архивной информации (протокол событий в системе), аварийных ситуаций, изменения режимных параметров во времени;

- из сервера человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) или Human machine interface(HMI), который необходим в том случае, когда отображение одной и той же мнемосхемы необходимо осуществить на нескольких рабочих станциях, для чего сервер HMI формирует видеокадры и передает их на дисплеи рабочих станций, которые в этом случае могут иметь небольшую вычислительную мощность;

- из СВТ уровня SCADA– ПЛК и УСО (устройства связи с объектом), которые через собственные полевые шины (ПШ) подключены к серверу сбора данных.

В последние годы практически в каждой отрасли большое внимание уделяется вопросам автоматизации систем управления [11]. Внедрение в практику сложных технических систем, таких, например, как SCADA-системы, DCS-системы, других современных средств и систем автоматики, с одной стороны, привело к качественному изменению информационного и программно-технического обеспечения автоматизированного управления, а с другой стороны, требует разработки адекватных методов анализа их надежности, так как отказ отдельных узлов системы существенно влияет на качество и количество выпускаемой продукции.

Одним из основных вопросов при анализе надежности сложных технических систем является математическое моделирование функционирования систем, разработка формализованных методов и алгоритмов расчета, и, на их основе, анализ и прогнозирование показателей надежности. Трудность решения задачи анализа надежности АСУ ТП обусловлена отсутствием универсальных методов, учитывающих сложность системы и ее особенности, такие, например, как произвольные законы распределения времени безотказной работы и восстановления элементов (блоков и узлов). Поэтому разработка методов расчета, алгоритмов и программ анализа надежности сложных технических систем при произвольных законах распределений является важной практической задачей.

С первых шагов развития СВТ решались задачи надежности и отказоустойчивости. Текущее столетие ознаменовалось новым качественным скачком в развитии СВТ - широким распространением больших и малых АСУ различного назначения. Очевидно, что новые АСУ, выполняющие ответственные функции, имеют право на существование только тогда, когда они надёжны. Рост значения проблемы надежности связан с некоторыми особенностями развития современной техники. Во-первых, существует стремление к подробному планированию хода производственных процессов, которые становятся все более сложными. Во-вторых, автоматизация все больше распространяется на многочисленные вспомогательные процессы. В-третьих, автоматизированные системы выполняют все более ответственные задачи.

Изучая вопрос развития АСУ ТП, особенности построения и структуры, сформулируем ряд причин, ввиду которых возникают проблемы надежности систем:

- рост сложности системы превышает рост надёжности элементов в этой системе;

- ГОСТы [1-6], после введения соответствующих «Технических регламентов», стали рекомендательными, в связи чем, надёжность СВТ закладывается на стадии их постановки на производство, а надёжность АСУ обеспечивается путем дублирования ряда элементов;

- функции, которые выполняют СВТ, бывают очень ответственными и их отказы могут дорого обойтись.

- исключение человека-оператора из процесса управления обусловлено скоротечностью процессов, либо вредными условиями труда.

- резкое усложнение изделий, электронной аппаратуры, большое количество элементов, входящих в состав изделия, т.к. чем сложнее и точнее аппаратура, тем менее она надёжна.

Для решения вопросов на стадии проектирования и обоснования надёжности АСУ, существующих подходов теории надёжности становится недостаточно.

В пользу применения простейших законов распределения можно привести много аргументов. Во-первых, для целого ряда компонентов и систем эти законы находят статистическое подтверждение. Кроме того, многие виды распределения с ростом числа компонентов или увеличением времени испытаний аппаратуры асимптотически стремятся к простейшим законам. Наконец, вероятностные показатели чаще всего используются для сравнительной оценки надёжности проектируемых систем, и привлечение простых моделей к инженерным расчетам наиболее оправданно.

8.1. Экспоненциальное распределение

Экспоненциальное распределение Экспоненциальный закон распределения – называемый также основным законом надёжности [12]., часто используют для прогнозирования надёжности в период нормальной эксплуатации изделий, когда постепенные отказы еще не проявились и надёжность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность. Экспоненциальное распределение находит довольно широкое применение в теории массового обслуживания, описывает распределение наработки на отказ сложных изделий, время безотказной работы элементов радиоэлектронной аппаратуры.

$$f(t) = \begin{cases} \lambda * e^{-\lambda t} & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}; p(t) = e^{-\lambda t}; m_t = \frac{1}{\lambda} \quad (8.1)$$

Плотность распределения экспоненциального закона приведена на Рис.8.2.

Рис.8.2. График плотности экспоненциального распределения

Экспоненциальный закон в теории надежности нашел широкое применение, так как он прост для практического использования. Почти все задачи, решаемые в теории надежности, при использовании экспоненциального закона оказываются намного проще, чем при использовании других законов распределения. Основная причина такого упрощения состоит в том, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

8.2. Распределение Пуассона

Распределение Пуассона играет особую роль в теории надежности, поскольку оно описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах[12]. Этот закон нашел широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

Случайная величина X распределена по закону Пуассона, если вероятность того, что эта величина примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = \frac{\lambda_m}{m!} e^{-\lambda}, \quad (8.2)$$

где λ — параметр распределения (некоторая положительная величина); $m=0,1,2,\dots$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины X для закона Пуассона равны параметру распределения λ :

$$M_x = D_x = \lambda \quad (8.3)$$

Распределение Пуассона является однопараметрическим с параметром λ . Функция распределения Пуассона представлена на Рис.8.3.

Рис.8.3. Функция распределения Пуассона.

8.3. Усеченное нормальное распределение

Усеченным нормальным распределением называется распределение, получаемое из классического нормального при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа[13].

Известно, что корректность использования классического нормального распределения наработки достигается при $T \geq 3S$.

При малых значениях T и большом S может возникать ситуация, когда функция $f(t)$ «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок Рис.8.4.

Таким образом, нормальное распределение, являясь общим случаем распределения случайной величины в диапазоне $(-\infty; +\infty)$, лишь в частности (при определенных условиях) может быть использовано для моделей надёжности.

В общем случае усечение может быть:

- левым – $(0; +\infty)$,
- двусторонним – (t_1, t_2) .

Рис. 8.4. Функция плотности вероятности усеченного нормального распределения

Для рассмотрения количественных характеристик надёжности при усеченном нормальном распределении вводится нормирующий множитель, чтобы сохранить условие нормирования плотности вероятности:

$$\int_{t_1}^{t_2} c f(t) dt = c \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1 \quad (8.4)$$

где

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2S^2}\right), \quad (8.5)$$

откуда

$$c = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt} \quad (8.6)$$

Переходя от случайной величины $T = \{t\}$ к величине $X = \{x\}$

$$x_2 = (t_2 - T)/S, \quad x_1 = (t_1 - T)/S,$$

получают

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = Q(t_2) - Q(t_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (8.7)$$

откуда

$$c = \frac{1}{\Phi(x_2) - \Phi(x_1)}, \quad (8.8)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (8.9)$$

Усеченный нормальный закон распределения применяется для описания постепенных отказов объектов, что характерно для «стареющих» объектов.

Поскольку $[\Phi(x_2) - \Phi(x_1)] < 1$, то $c > 1$, поэтому $f_1(t) > f_2(t)$. Здесь $f_1(t)$ – функция плотности распределения отказов для нормального закона распределения, $f_2(t)$ – функция плотности распределения отказов для усеченного нормального закона распределения. Кривая $f_1(t)$ выше, чем $f_2(t)$, так как площади под кривыми $f_1(t)$ и $f_2(t)$ одинаковы и равны 1 Рис. 8.5:

$$\int_{m_t - 3S}^{m_t + 3S} f_2(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt \quad (\text{с погрешностью } \leq 1 \%).$$

Рис. 8.5. Функция плотности распределения отказов для нормального закона распределения $f_1(t)$ и функция плотности распределения отказов для усеченного нормального закона распределения $f_2(t)$

8.4. Гамма распределение

Гамма-распределение времени безотказной работы описывает схему непрерывного, постепенного износа, при котором отказ не наступает вследствие первого же повреждения, а является следствием накопления повреждений. Каждое из этих повреждений происходит по схеме мгновенного повреждения.

Граничными условиями применения гамма-распределения являются следующие:

- средняя скорость износа устройства постоянна;
- средняя скорость износа подвержена случайным вариациям;
- начальное качество исследуемых устройств полностью однородно.

Случайная величина наработки до отказа T имеет гамма-распределение с параметрами α (масштабный параметр) и β (параметр формы), где $\alpha, \beta > 0$, причём β – целое число, если функция плотности распределения описывается выражением:

$$f(t) = \frac{\alpha^\beta \cdot t^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \cdot \exp(-\alpha t) \quad (8.10)$$

где $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$ – гамма-функция Эйлера.

Очевидно, что при $\beta = 1$ выражение (8.10) упрощается до вида, $f(t) = \alpha \cdot \exp(-\alpha t)$, соответствующего экспоненциальному распределению.

Гамма-распределение наиболее хорошо описывает распределение суммы независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону.

При больших значениях β гамма-распределение сходится к нормальному распределению с параметрами: $T = \beta/\alpha$, $S = \sqrt{\beta/\alpha^2}$.

Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении приведены на Рис. 8.7.

Числовые характеристики наработки до отказа:

- средняя наработка (математическое ожидание наработки) до отказа

$$T = \beta/\alpha, \quad (8.11)$$

- дисперсия наработки до отказа

$$D = \beta/\alpha^2 \quad (8.12)$$

Рис. 8.6. Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении

8.5. Распределение Вейбулла

Закон Вейбулла представляет собой двухпараметрическое распределение. Этот закон является универсальным, так как при соответствующих значениях параметров превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. Автор данного закона использовал его при описании экспериментально наблюдавшихся разбросов усталостной прочности стали, пределов ее упругости. Закон Вейбулла удовлетворительно описывает наработку до отказа СВТ и компонентов СВТ.

Это распределение эмпирическое, получено в результате исследования широкого класса распределений сроков службы:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{a}{b} * t^{a-1} * e^{-t^{a-1}} & \text{для } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}; \quad (8.10)$$

$$p(t) = e^{-t^{a-1}} \quad (8.11)$$

Плотность распределения Вейбулла представлена на Рис.8.6.

Рис. 8.7. Плотность распределения Вейбулла

8.5. Логарифмически нормальное распределение

При логарифмически нормальном распределении нормально распределенным является логарифм ($\lg t$) случайной величины T , а не сама эта величина.

Это распределение обеспечивает более точное, чем нормальное распределение, описание наработки до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости, например подшипников качения, электронных ламп и пр.

Оно используется при обработке опытных данных об усталостной долговечности металлов, времени безотказной работы некоторых объектов.

Логарифмически нормальное распределение позволяет описывать течение времени безотказной работы объектов, имеющих свойство «упрочняться» по ходу времени эксплуатации. «Упрочнение» проявляется в постепенном уменьшении скорости износа.

Плотность распределения выражается зависимостью

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln t - m)^2}{2S^2}\right). \quad (8.12)$$

Параметры m и S по результатам N испытаний принимаются:

$$m \approx \bar{m} = \sum_{i=1}^N \ln t_i / N, \quad (8.13)$$

$$S \approx \bar{S} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\ln t_i - \bar{m})^2} \quad (8.14)$$

Вероятность безотказной работы можно определить по таблице нормального распределения в зависимости от значения квантили:

$$U_p = \frac{\ln t - m}{S} \quad (8.15)$$

Математическое ожидание наработки до отказа:

$$m_t = \exp(m + 0,5S^2) \quad (8.16)$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_t = \sqrt{\exp(2m + S^2) \cdot (\exp(S^2) - 1)} \quad (8.17)$$

Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении приведены на рис. 4.9.

Рис. 8.8. Графики функций показателей безотказности при логарифмически нормальном распределении

8.7 Логико-вероятностный метод расчета надежности АСУ ТП

Такое условное название получил метод расчета надежности систем, при котором математическая модель системы описывается с помощью функций алгебраической логики (ФАЛ), т. е. функций, принимающих лишь два значения

($y=1$ ИЛИ $y=0$ и наборами двоичных аргументов, $x_1, x_2, \dots, x_n$, которые также могут находиться лишь в двух несовместных ($x_j = 1$ или $x_j=0$)[11].

Символы $x_1, x_2, \dots, x_n$ характеризуют состояния элементов, причем $x_j = 1$ соответствует работоспособности элемента, $x_j = 0$ соответствует его неработоспособности. Аналогично понимают символы $y=1, y=0$ для системы.

Функцию алгебры логики, связывающую состояния элементов с состоянием системы, называют функцией работоспособности системы. Эту функцию составляют путем анализа физических особенностей работы системы. Обычно имеют дело с монотонными ФАЛ, для которых при любых наборах $\tilde{x} = (x_1, \dots, x_n)$ и $\tilde{z} = (z_1, \dots, z_n)$, таких, что $x_j \leq z_j$, имеет место соотношение $y(\tilde{x}) \leq y(\tilde{z})$.

Монотонными являются функции работоспособности систем, в которых замена неработоспособного элемента на работоспособный не может привести к отказу системы.

От логической функции работоспособности переходят к уравнению работоспособности в символах обычной алгебры. При этом используют зависимости:

$$\text{если } x_1 \text{ и } x_2 \text{ связаны операцией конъюнкции, то} \\ x_1 \& x_2 = x_1 x_2; \quad (8.18)$$

$$\text{если } x_1 \text{ и } x_2 \text{ связаны операцией дизъюнкции, то} \\ x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2 - x_1 x_2 \quad (8.19)$$

$$\text{если } x_1 \text{ и } x_2 \text{ связаны операцией строго разделительной (исключающей)} \\ \text{дизъюнкции («исключающее ИЛИ»), то} \\ x_1 \vee\vee x_2 = x_1 + x_2 - 2x_1 x_2 \quad (8.20)$$

При использовании этих зависимостей учитывают, что $x_1 x_1 = x_1$.

В уравнение работоспособности вместо обозначения простых событий x_i подставляют вероятности этих событий p_i и вычисляют вероятность p_c нахождения системы в работоспособном состоянии (в течение заданного интервала времени).

Например, для системы из трех элементов при нагруженном резервировании, функция работоспособности имеет вид:

$$y = x_1 \vee x_2 \vee x_3, \quad (8.21)$$

где 1, 2, 3 — номера элементов. Уравнение работоспособности в символах обычной алгебры

$$y = x_1 + x_2 + x_3 - (x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3) + x_1 x_2 x_3. \quad (8.22)$$

Выражение для вероятности безотказной работы за заданное время (0, t)

$$p_c = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3 \quad (8.23)$$

Тот же результат можно получить сразу по логической схеме для расчета надежности:

$$p_c = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3) = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3. \quad (8.24)$$

Достоинства логико-вероятностного метода расчета надежности: 1) можно применять при любой логической структуре системы (не только при последовательно-параллельных логических схемах); 2) можно применять при любых распределениях наработки до отказа.

Недостатки метода: 1) не всегда удастся составить логическую функцию работоспособности, достаточно точно соответствующую рассматриваемой системе; 2) для сложных систем преобразования ФАЛ становятся очень громоздкими. Метод нашел применение для расчета надежности систем, в которых работоспособное состояние связано с наличием электрической проводимости между входом и выходом системы, в частности для судовых электроэнергетических систем.

Глава 9. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

9.1. Диффузионное монотонное распределение

Особого внимания заслуживают диффузионные распределения. Эти модели ближе остальных к реальному процессу изменения определяющего параметра. Если физический процесс деградации описывается случайным процессом с монотонными реализациями, то в качестве теоретической модели отказов следует принять диффузионное монотонное распределение (DN - распределение).

$$F(t) = DM(t; \mu; \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (9.1)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-\frac{x^2}{2}) dx$ – нормальное распределение.

μ - параметр масштаба, совпадающий с медианой распределения случайной величины t ;

ν - параметр формы распределения случайной величины t .

Если физический процесс деградации описывается случайным процессом с немонотонными реализациями, то распределение отказов будет аппроксимироваться диффузионным немонотонным распределением (DN - распределением).

$$F(t) = DM(t; \mu; \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp(2\nu^{-2}) \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) \quad (9.2)$$

Для объектов, состоящих из изделий электронной техники или частично включающих в себя такие изделия, наиболее подходящей моделью отказов представляется DN -распределение. В случае, когда не удастся установить превалирующие физические процессы деградации, приводящие к отказам, в качестве модели принимается DN -распределение. При оценках параметров DN - и DF -распределений, полученных на основе одинаковых значений исходных

данных, DN -распределение дает менее оптимистические показатели надежности по сравнению с DF -распределением.

Опишем процесс проведения испытаний. На испытания ставится группа N однородных изделий. При этом возможны действия:

- регистрация отказов изделий (фиксация номера отказа i ($i = 1, \dots, r$) и наработки до отказов t_i , где i - количество отказов за время испытания t);
- регистрация значения определяющего параметра X , характеризующего состояние изделия;
- регистрация отказов и значений определяющего параметра.

Оценку параметра масштаба и параметра формы выбранного распределения можно выполнить на основе данных о наработках до отказа и данных об изменении определяющего параметра.

Оценивание параметров распределения на основе данных о наработке до отказа

Здесь выделяются случаи вычисления оценок параметров методами:

- максимального правдоподобия;
- моментальных оценок;
- квантилей.

Максимально правдоподобные (μ_{np}, v_{np}) и моментные, оценки параметра масштаба $(\bar{\mu}, \bar{v})$ оценки параметра масштаба (μ) и параметра формы (v), например, для DN – распределения и плана испытаний [NUN], имеют следующие выражения:

$$\mu_{np} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i ; \quad (9.3)$$

$$v_{np} = \sqrt{\mu_{np} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_i} - N \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^{-1} \right]^{1/2}} ; \quad (9.4)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i ; \quad (9.5)$$

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{D}}{\bar{\mu}} , \quad (9.6)$$

Где $D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{\mu})^2$ - выборочная дисперсия, $t_i - i = (1, 2, \dots, N)$ наработка на отказ до отказа i -го изделия, N – количество изделия, поставленных на испытания.

Далее произведем оценку параметров распределения методом квантилей при планах испытаний [NUT] или [NUR]

Возможны следующие случаи решения задачи:

- одновременный расчет оценок μ и v ;
- нахождение оценки μ в предположении, что известна оценка v .

Для одновременной оценки μ и v допустим, что выбрано теоретическое распределение $F(t; \mu, v)$. При испытаниях N изделий за время t_1 зафиксировано

r_1 отказов, а за время $(t_2 - r_2)$ отказов. Тогда оценки $\bar{\mu}$ и $\bar{v}$ могут быть получены решением системы вида:

$$F(t_1; \mu, v) = \frac{r_1}{N} \quad (9.7)$$

$$F(t_2; \mu, v) = \frac{r_2}{N} \quad (9.8)$$

Оцениванием параметра масштаба μ при допущении, что известно априорное значение параметра формы и v .

Допустим, что в выбранном теоретическом распределении $F(t; \mu, v)$ априори известно значение параметра $v = v_0$. За время T испытания N изделий (план испытаний [NUT]), зафиксированы отказы r изделий. Тогда оценку параметра масштаба μ можно получить, решая уравнение:

$$F(T, \mu, v_0) = \bar{F}[T], \quad (9.9)$$

$$\text{где } \bar{F}(T) = \frac{r}{N}$$

Эту оценку можно улучшить, используя данные о наработках всех отказавших изделий за время T . Для этого уравнение типа (9.4) решается для каждого i -го отказа ($i = 1, \dots, r$).

$$F(t_i; \mu, v_0) = \tilde{F}(t_i), \quad (9.10)$$

$$\text{где } \tilde{F}(t_i) = \frac{i}{N}$$

t_i – наработка i -го отказавшего изделия. Тогда усредненная оценка параметра $\bar{\mu}$ определяется выражением:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \bar{\mu}_i \quad (9.11)$$

Где $\bar{\mu}_i$ – результаты решений уравнений (9.10) при ($i = 1, \dots, r$). Замечание. На практике вместо решения уравнений типа (9.11) используются результаты предварительного табулирования функций теоретических распределений. Для удобства табулирования вводится в рассмотрение понятие относительной наработки (x):

$$x = t / \mu \quad (9.12)$$

Например, для DN - распределения в выражении функции $F(t; \mu, v)$ делается замена $t = x\mu$. После этого табулируется полученная функция, $F_0(x; 1, v)$ устанавливающая зависимость между относительной наработкой, коэффициентом вариации и вероятностью отказа [17]. Тогда правило расчета параметра μ сводится к следующему:

- для каждого i ($i = 1, \dots, r$) вычисляется эмпирическая частота $\tilde{F}(i) = i/N$ (N – количество испытываемых изделий);
- для полученного значения $\tilde{F}(i)$ и известного $v = v_0$ по заранее сформулированной таблице функции распределения $F(x; 1, v)$ определяется соответствующее значение относительной наработки x_i ;
- определение значения $\bar{\mu} = t_i / x$;
- расчет оценки $\bar{\mu}$ по формуле (9.11).

В тех случаях, когда статистика отказов недостаточна или вовсе отсутствует, для построения функций распределения используется вероятностно-физический подход, который позволяет оценить скорость деградации параметра, вызывающего отказ, и использовать ее для прогноза отказов.

В кратчайшем изложении эта методика сводится к следующим шагам:

- принятие решения об определяющем параметре, характеризующем процесс деградации;
- оценка предельного значения определяющего параметра Π_{np} ;
- постановка на испытания группы однотипных изделий (N единиц);
- регистрация состояний изделий в начальный момент (t_n) испытаний, x_{ni} – значения определяющего параметра в момент $t = t_n$ обозначим ($i=1, 2, \dots, N$);
- фиксирование значений определяющего параметра i -го изделия в моменты t_1 и t_2 ;
- вычисление оценок средней физической скорости деградации (α) и средней нормированной скорости деградации (α_n):

$$\alpha = (X_2 - X_1) : (t_2 - t_1); \quad (9.13)$$

$$\alpha_n = \alpha / (\Pi_{np} - \Pi_n); \quad (9.14)$$

где $\Pi_n = \sum_{i=1}^N x_{ni} / N$, $X_1 = \sum_{i=1}^N x_{1i} / N$, $X_2 = \sum_{i=1}^N x_{2i} / N$;

x_{ni}, x_{1i}, x_{2i} – значения определяющего параметра i -го изделия в моменты t_n, t_1, t_2 ;

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{x_1} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_1)^2}{N-1} \right]^{1/2} + \frac{1}{x_2} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_{2i} - x_2)^2}{N-1} \right]^{1/2} \right\} \quad (9.15)$$

Полученные результаты дают возможность сделать оценку вероятности отказа изделия до произвольного момента будущего, не доводя изделия до разрушения. Расчет выполняется подстановкой заданного момента времени в предварительно сформированное распределение отказов. При этом для DN -распределения и DN -распределения параметр масштаба μ и параметр формы ν определяются [15,16] выражениями:

$$\mu = 1 / \alpha_n; \quad (9.16)$$

$$\nu = \tilde{\nu}. \quad (9.17)$$

Предлагаемые методы так же эффективны при исследовании надежности элементов конструкции радиоэлектронных приборов, в том числе паяных соединений выводов компонентов с контактными площадками коммутационных плат, наиболее распространенным является так называемый метод «физики отказов» который заключается в установлении аналитических зависимостей между показателями надежности и скоростью протекания физико-химических процессов на основании кинетических уравнений. В качестве таких зависимостей обычно используют линейное уравнение, степенное, Аррениуса, диффузии и др., при этом полагают, что полученные

детерминированные зависимости описывают усредненные явления и включают усредненные величины. Это позволяет перейти в дальнейшем к установлению зависимостей не некоторых основных показателей надежности (математического ожидания времени до отказа или интенсивности отказов) как функций физических свойств или физических параметров изделий и условий их эксплуатации.

Развитие физической (причинной) теории надежности, т. е. раскрытие механизмов отказов и их влияние на надежность изделий, имеет существенное значение и дает возможность эффективно совершенствовать технологию производства изделий и повышать их надежность. Однако чисто физический подход не позволяет непосредственно определять абсолютные значения вероятностных показателей надежности, в частности, находить закон распределения времени до отказа. Получаемые при таком подходе модели имеют частный характер — они или моделируют какой либо превалирующий процесс деградации компонента, или выявляют многочисленные коэффициенты для конкретного режима эксплуатации. Распространение результатов таких моделей даже на аналогичный объект, но в другом режиме эксплуатации, может иметь только качественный характер. Анализируя работы [13,14] по надежности радиоэлектронных приборов и систем, можно сделать

вывод, что основная масса работ по проблеме надежности посвящена постановке и решению широкого круга оптимизационных задач, а также задачам, связанным с проблемой интервального оценивания показателей надежности по результатам испытаний или эксплуатации. Известно, что при решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности — функции распределения наработки до отказа, которые, в конечном итоге, определяют точность получаемых оценок. При этом методические погрешности, обусловленные выбором теоретической модели, могут иметь существенные значения и сводить практически на нет результаты оптимизационных задач.

На протяжении многих лет расчеты надежности выполняются, как правило, с помощью однопараметрического экспоненциального распределения, поскольку использование вышеупомянутых более адекватных двухпараметрических моделей для получения точных решений встречает трудности математического характера.

Предлагаемый подход упрощает решение задач надежности, однако приводит к неадекватности результатов, так как накладывает на модель ряд существенных ограничений и делает ее весьма грубо приближенной. Например, экспоненциальное распределение абсолютно не учитывает старение и износ, т. е. не принимает во внимание возможность и необходимость выбора более качественных материалов при производстве радиоэлектронных изделий или при проведении профилактики в процессе эксплуатации. Экспоненциальное распределение имеет максимальную частоту отказов в начальный момент эксплуатации или испытания, т. е. на участке приработки, что может

наблюдаться только при очень низком качестве изготовления. Другими словами, чем ниже уровень технологии и чем хуже выполнено изделие, тем более подходящей оказывается модель экспоненциального распределения для описания его надежности.

Априорная оценка параметра формы DN-распределения (коэффициента вариации процесса деградации объекта) требует знания физических процессов, приводящих к отказу объекта, и условий нагружения, поскольку значение коэффициента вариации зависит от указанных условий. В работе [17] приведена таблица значений коэффициентов вариации для различных технических средств. Для объектов, не включенных

в приведенную таблицу, априори определяют коэффициент вариации наработки на основании анализа процессов деградации, приводящих к отказам. При этом учитываются соотношения долевых вкладов процессов деградации и значения коэффициентов вариации основных типовых процессов деградации, приведенные в таблице. 9.1.

Принимая во внимание объем и число рассмотренных данных (многих десятков выборок), на основании которых определены вышеуказанные диапазоны коэффициентов вариации, утверждается [17], что доверительная вероятность интервалов существенно выше 0,9.

Таблица 9.1. Значение коэффициентов вариации основных процессов деградации

Вид разрушения (процесс деградации)	Коэффициент вариации процессов разрушения
Статическое разрушение	0,05-0,15
Усталость: малоцикловая многоцикловая контактная	0,15-0,40 0,40-1 0,40-1,20
Износ: механо-химический абразивный старение	0,20-0,5 0,40-1 0,40-1
Электрические процессы (электролиз, миграция за рядов, электродиффузия)	0,70-1,50

При значениях коэффициента вариации v от 0,3 до 1,3 максимальное отклонение составляет 4 %. В практике измерения случайных величин это достаточно высокая точность.

Основные аналитические выражения DN-распределения для ряда характеристик приведены в формуле (9.1), причем в выражении DN-распределения присутствует нормированная функция Лапласа. Для решения поставленной задачи используем формулу (9.1).

Необходимо отметить существенное свойство, которым обладает DN-распределение, — устойчивость к операции свертки (например, отказ одного

электронного модуля произошел при времени t_1 , а другой отказ другого электронного модуля произошел при времени t_2 , обе величины подчиняются DN-распределению, и сумма величин также подчиняется DN-распределению). Это означает, что DN-распределение может быть использовано для описания отказов при нелинейном изменении значения параметра. При этом неоднородный процесс делится на однородные участки, и в результате свертки суммарное время наработки будет иметь линейный вид.

9.2. Вероятностно-кинетический подход к надежности СВТ в АСУ

В настоящее время в связи с резким усложнением радиоэлектронной аппаратуры, применением большого числа поверхностно монтируемых многовыводных компонентов новых конструкций, введением в практику ряда новых видов паяных соединений назрел вопрос о выборе адекватной модели отказов, учитываемой при расчетах в реальной практике. Ситуация усложнена еще и тем, что многие виды аппаратуры морально устаревают раньше физического износа и выводятся из эксплуатации без набора достаточных статистических данных о конкретных отказах элементов.

Функция распределения, используемая в качестве модели отказов, должна позволять выполнять расчет надежности СВТ на основе известных показателей надежности ее составных частей и обеспечивать применение единого математического аппарата, отвечающего требованиям инженерной практики для решения необходимых задач надежности на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации. В то же время модель отказов должна обладать физичностью, т. е. отражать связь с физическими явлениями, приводящими к отказу.

Приведенные выше законы распределения достаточны для описания функционирования и возможных отказов АСУ. Тем не менее, следует помнить, что автоматизированные системы это непрерывно функционирующий «организм» работающий, зачастую в условиях отличных от лабораторных и стендовых моделей.

Для прогнозирования отказов узлов ных систем следует выбрать параметр(ы), позволяющие производить реальные расчеты. Из ряда возможных параметров, влияющих на отказоустойчивость СВТ выделим температуру. Выбор температуры объясним тем, что современные микропроцессорные устройства являются комплексом радиокомпонентов, под воздействием температуры качество выполняемых данными устройствами функций изменяется, зачастую сводя их производительность к нулю. В пользу температуры выступает тот факт, что существует достаточно обширный ряд методов и технических средств, для получения данного параметра.

Для решения задачи повышения надежности СВТ непрерывно функционирующих в составе АСУ возможно применения распределения Вейбула [19,20]. Данное распределение в комплексе с уравнением Аррениуса позволит сформулировать метод расчета наработки на отказ в зависимости от

температуры окружающей среды, в которой функционируют исследуемые устройства.

В качестве объекта исследования примем СВТ, предназначенную для принятия решения оператором АСУ. Изучив особенности построения СВТ, выделим ключевые объекты исследования.

Для реализации метода, в первую очередь необходимо рассчитать наработку на отказ ключевых узлов СВТ. Как известно, основная масса современных СВТ выстраивается на принципах Фон-Неймана, из этого следует, что наиболее уязвимы с точки зрения надежности такие устройства как: системная (материнская) плата, центральный процессор, накопитель информации. Перечисленные устройства, не смотря на то, что имеют достаточный запас по наработке, при полном отказе останавливают функционирование всей СВТ, кроме того, оперативная замена данных устройств не всегда возможна.

Наработка на отказ, характеристика позволяющая определить надежность функционирования восстанавливаемого прибора технической системы или группы приборов. Определив наработку на отказ исследуемых микропроцессорных подсистем, появляется возможность прогнозирования интенсивности отказов микропроцессорных подсистем. Прогнозирование отказов позволяет производить своевременную замену и техническое обслуживание подсистем. Данные мероприятия позволяют снизить интенсивность отказов, повысить работоспособность и как следствие надежность всей системы.

Для получения этих данных применимо распределение Вейбулла. Данное распределение позволяет смоделировать работу объекта исследования в заданном участке времени, исходя из имеющихся статистических данных.

Для эффективного и оптимально точного расчета применен программный продукт SuperSmith фирмы FultonFindings [21-24], который является специализированным программным обеспечением для решения подобных задач. Данный инструмент позволяет рассчитать время в часах, за которое объект исследования выйдет из строя. Программа позволяет производить ряд расчетов, не применяя дополнительных программ математической статистики.

Программный пакет SuperSmith представляет собой модуль Weibull, и модуль Visual. В настоящей работе для расчетов нам необходим модуль Weibull. Программа, как показано на Рис.9.1, представляет собой окно, в верхней части которого расположена панель инструментов. Сама панель разбита на функциональные блоки: File (стандартные команды сохранения, вывода на печать, настройки интерфейсного окна, и т.д.), Edit (команды вырезать, копировать вставить, импорт), Options (позволяет ввести основные, необходимые для расчета параметры, скорректировать построенные графики, координировать размеры осей), Analisis (позволяет подключить дополнительные модули: уравнение Аррениуса, Монтекарло, максимальное правдоподобие), Tools (запускает опции приложения Visual). Под панелью

инструментов находятся непосредственно окно отображения результатов моделирования в числовом и графическом виде.

Рис. 9.1. Интерфейс программного пакета SuperSmith

Первое, что необходимо для решения поставленной задачи определить какое количество часов в год функционирует устройство (8160 ч. при условии непрерывного функционирования 500-та устройств). Температуру испытаний примем равной 42°C (средняя температура для допустимой и максимальной нагрузки). Для аппроксимации полученных результатов сформируем следующую плотность вероятности [9.18].

$$f_{\zeta, \beta}(x) = \frac{\beta * x^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{x}{\zeta}\right)^{\beta}}}{\zeta^{\beta}}, x > 0, \beta > 0, \zeta > 0, \quad (9.18)$$

β - коэффициент, определенный в результате расчета, исходя из статистики отказов устройства за год;

x - количество устройств, подвергнутых испытаниям;

ζ - время в течении которого выходят из строя 90% всех испытываемых устройств, в часах.

Для проведения необходимых расчетов использовался программный комплекс SuperSmith фирмы. Для рассчитанных коэффициентов провели моделирование результаты моделирования приведены на Рис.9.2, Рис.9.3, Рис.9.4.

Рис.9.2. Распределение вероятности отказа жестких дисков, исходя из распределения Вейбулла.

Рис.9.3. Распределение вероятности отказа материнских плат, исходя из распределения Вейбулла.

Рис.9.4. Распределение вероятности отказа процессоров, исходя из распределения Вейбулла.

На графиках пунктирной черной линией обозначено распределение вероятности отказа, смоделированное без учета коэффициента β , оранжевой пунктирной линией доверительная вероятность прекращения испытаний.

Данный график отражает примеры анализа по методам Weibull и WeiBayes, где:

W/mle - доверительная вероятность прекращения испытаний;

s/n – соотношение исправных устройств к вышедшим из строя;

Далее оценивается усредненная интенсивность отказов, при условии, что устройство находится во включенном состоянии 8760 часов в год, с учетом того, что 24 часа оно эксплуатировалось на заводе на этапе интеграции. С учетом результатов, приведенных выше, относительную интенсивность отказов за первый год можно рассчитать как интенсивность отказов, произошедших в период между 24 часами и 8760 часами.

Для получение численных значений коэффициента β (Таблица 9.2) воспользуемся теоремой Байеса. Данная теорема дает возможность определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие. Другими словами, по формуле Байеса можно более точно пересчитать вероятность, беря в расчет как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений. Формула Байеса может быть выведена из основных аксиом теории вероятностей, в частности из условной вероятности. Данная теорема позволяет определить

вероятность отказа узлов микропроцессорных подсистем ВЧ, при известных статистических данных. Рассчитаем коэффициент по формуле:

$$\beta = \sum_{i=1}^n P(A_i) P\left(\frac{B}{A_i}\right) \quad (9.19)$$

вероятность под знаком суммы известны, либо допускают экспериментальную оценку.

Таблица 9.2.

Величины коэффициента β , рассчитанные по теореме Байеса.

Материнская плата	Центральный процессор	Накопитель
0,764	0,893	0,673

Скорректируем расчеты с учетом реальных условий функционирования узлов СВТ. В случае расчета надежности СВТ АСУ, следует отметить, что, как правило данные устройства работают в непрерывном режиме.

Следующий этап анализа состоит в пересчете параметра ζ , полученного в результате тестов при 42°C, в значение, соответствующее нашей стандартной рабочей температуре 25°C. Опираясь на уравнение Аррениуса [27,28], рассчитав параметры β для каждой из микропроцессорных подсистем произведем моделирование с учетом выше, приведенных факторов. Для учета температурных различий получим коэффициент учащения отказов 2,2208.

На основании параметров β и ζ Weibull, полученных после температурной коррекции, в любой момент можно рассчитать суммарный процент отказов. Чтобы оценить процент устройств, которые могут выйти из строя при температуре 25°C в промежутке времени от t_1 до t_2 , достаточно произвести вычитание значений суммарного процента отказа в моменты t_1 и t_2 , затем использовать соответствующее значение ζ , с учетом усредненного коэффициента отказов. Данные представленные, в таблице 9.3 дают возможность оценить время наработки на отказ при различных температурах функционирования. Исходя из полученных данных температура в 54 °C является экстремальной для функционирования микропроцессорных подсистем, так как суммарная наработка на отказ при заданной температуре составляет значение равное или близкое к году службы, что не допустимо, с учетом выполняемых задач. Так же стоит учесть что при экстремальной температуре снижается и общая производительность системы.

Таблица 9.3.

Скорректированное время наработки на отказ узлов СВТ в зависимости от температуры функционирования

Температура, °C	Скорректированное время наработки на отказ		
	Микропроцессор	Накопитель	Материнская плата
25	38480	28480	29960
26	28990	27105	28164
30	26315	22315	25763
34	23464	18464	22635
38	21351	15351	18756

Температура, °C	Скорректированное время наработки на отказ		
	Микропроцессор	Накопитель	Материнская плата
42	17834	12824	16253
46	16757	10761	11457
50	11767	9070	10803
54	9676	7676	8635

Представленная в таблице зависимость, показывает, что с ростом температуры, жизненный цикл узлов персонального компьютера стремится к нулю. Кроме того следует отметить, что суммарная наработка на отказ при температуре 54°C составляет значение меньшее суммарной наработки за год. Следовательно, температура 54°C критическая для надежности СВТ.

Приведенный выше метод позволяет прогнозировать отказ узлов СВТ путем анализа времени наработки на отказ в зависимости от температуры, в которой функционируют узлы СВТ. Данный метод позволяет лишь частично прогнозировать отказ СВТ, исходя из наработки узлов, фактически констатируя возможность отказа через расчетный промежуток времени.

Ранее упоминалось, что большинство СВТ устроены по принципам Фон-Неймана. Вместе с тем, современные СВТ по-прежнему строятся на базе логических элементов, которые стали лишь более компактными. Проведём параллель между производительностью СВТ и надёжностью. При снижении производительности СВТ, ввиду сбоя одного из её узлов, нагрузка на работоспособные узлы увеличивается, рабочая температура узлов повышается. Возможно и другое утверждение: при повышении температуры воздуха, при которой функционирует СВТ, несмотря на стабильное функционирование всех узлов, производительность понижается.

Проанализировав процессы изменения производительности СВТ, заметим, что данные процессы носят случайный характер[20]. Спрогнозировать изменения в производительности СВТ возможно применяя аддитивно-мультипликативную модель. Выбор связан с необходимостью прогнозирования данных. Метод моделирования временных рядов является наиболее подходящим по причине:

- данных, характеризующих один объект за ряд последовательных моментов (периодов) времени;
- прогнозирование применимо к любым систематическим колебаниям;
- цикл колебаний может изменяться (как в большую, так и в меньшую сторону);
- величина сезона может быть различной и колебаться от одной недели до десяти лет и более;
- применение полиномиального тренда, вместо линейного, позволяет значительно сократить ошибку модели;
- метод даёт хорошую аппроксимацию.

Таким образом, применяя, закон распределения Вейбулла и анализ временных рядов появляется возможность разработки системы ежедневной оценки надежности СВТ с поддержкой принятия решения для оператора.

В общем виде структура метода оценки производительности представлена на Рис 9.5.

Рис.9.5. Блок-схема системы поддержки принятия решения для ежедневной оценки и принятия решения по повышению надёжности.

На Рис. 9.5: "А" – блок оценки производительности ключевых узлов вычислительной машины;

Р – шкала учёта производительности узлов;

Рзап – производительность узлов на начальном этапе запуска модуля;

tnorm – временные интервалы мониторинга производительности при минимальном отклонении от производительности;

тав – временные интервалы мониторинга производительности при резком отклонении от показателей производительности на начальном этапе запуска.

Приведена схема комплексной оценки надежности функционирования подсистем с функцией поддержки принятия решения в межрегламентные периоды. Модель запускает компоненты последовательно, что позволяет избежать загрузки системы дополнительными вычислительными процессами. В оперативном режиме функционирует только модуль «А».

Модуль «Б» запускается в момент резкого снижения производительности. Содержит в себе два модуля оценки температурных показателей с различными сценариями перехода к модулю поддержки решения оператора «В». В случае сценария «Б1» система не фиксирует резких изменений температуры узлов, что позволяет сделать вывод об отказе (как полном так и временном). В случае «Б1» происходит перераспределение вычислительных ресурсов, показатель нормальной производительности обновляется. В случае запуска сценария «Б2» при резком изменении температуры производится комплексная оценка температуры всех функционирующих узлов. В случае повышения температуры функционирования всех узлов, производится оценка наработки на отказ, формируется прогноз по аддитивно-мультипликативной модели, обновляется база прогнозов отказа в блоке «В».

Модуль «В» включается при отработке одного из сценариев блока «Б». Данный модуль производит оценку наработки на отказ, либо перераспределяет вычислительные ресурсы, обновляет базу прогнозов отказов, заменяя теоретические значения момент времени отказа одного из узлов, на реальные, полученные в ходе анализа при отказе. Кроме того производится учет наработки на отказ как вновь установленных узлов, так и узлов прошедших техническое обслуживание без замены.

Построение временного ряда происходит в каждом блоке только в случае отклонения анализируемого параметра от заданных нормальных показателей функционирования. Далее производится нахождение значения тренда и значения прогноза на следующий период. Впоследствии база реальных значений в процессе работы модели обновляется, а значения прогноза на следующий период заменяется значениями тренда на текущий период. Таким образом, предлагаемая модель, с течением времени "самосовершенствуется" непрерывным обновлением показателей.

Описанный выше подход к оценке надёжности системы с последующим формированием решения для человека-оператора отрабатывается по следующему алгоритму:

1. Нахождение итога за период колебаний при отклонении от нормы.
2. Расчёт скользящих средних.
3. Нахождение центрированных скользящих средних.
4. Оценка сезонной компоненты.

5. Подведение итогов за n -й период и за все время функционирования вычислительной системы.

6. Расчёт средней оценки сезонной компоненты.

7. В случае нулевого значения сезонной компоненты, определение корректирующего коэффициента.

8. Исключение влияния сезонной компоненты.

9. Выстраивание линейного тренда по полученному ряду.

10. Нахождение значений уровней ряда.

11. Расчёт ошибок.

12. Возведение в квадрат абсолютных ошибок.

13. Для оценки ошибки качества модели суммирование квадратов ошибок.

14. Выведение компоненты общей оценки качества.

15. Получение прогноза, оценивающего общую вариацию уровней.

Отметим, что для блока "А" при построении тренда следует исключать сезонную компоненту. Кроме того, при построении трендов при отклонении одного из показателей от нормы присущи несколько типов сезонов. При формировании отчета и прогноза в межрегламентные периоды прогноз формируется ежемесячно и сезон будет составлять 4 недели, для годового прогноза сезон будет составлять 4 квартала. Предлагаемая модель будет функционировать в соответствии с нормами регламентов обслуживания, установленными на предприятии.

Предлагаемый метод позволяет:

1. Производить мониторинг производительности и надёжности СВТ.
2. Используя предлагаемые методы и модели делать прогноз отказа СВТ.
3. Используя полученные ранее закономерности модель обрабатывает только один сценарий при отказе, либо перераспределяя вычислительные ресурсы, либо оценивает возможный отказ, уведомляя об этом человека-оператора.
4. Интеграция модели с базой знаний позволит с каждым новым отказом повышать точность прогноза, сведя количество отказов к минимуму.
5. Формирование базы знаний со статистикой отказов СВТ и их причин позволит, во-первых, формировать готовое решение по повышению производительности и надёжности СВТ, во-вторых, сформировать ежегодное техническое задание на рациональную модернизацию и техническое обслуживание СВТ.

Блок-схема алгоритма работы прогнозирующей системы приведена на Рис. 9.6.

Рис. 9.6. Блок-схема алгоритма прогнозирования и планирования обслуживания СВТ

В свою очередь построение прогнозов осуществляется по аддитивно-мультипликативной модели по следующему алгоритму Рис. 9.7.:

1. Нахождение итога за период колебаний при отклонении от нормы.
2. Расчет скользящих средних.
3. Нахождение центрированных скользящих средних.
4. Находим оценку сезонной компоненты.
5. Подводим итог за n-период за все время функционирования вычислительной системы.
6. Расчет средней оценки сезонной компоненты.
7. В случае нулевого значения сезонной компоненты определяем корректирующий коэффициент.
8. Исключаем влияние сезонной компоненты.
9. По полученному ряду выстраиваем линейный тренд.
10. Находим значение уровней ряда.
11. Рассчитаем ошибки.
12. Возведем в квадрат абсолютные ошибки.
13. Для оценки ошибки качества модели просуммируем квадраты ошибок.
14. Выведем компоненты общей оценки качества.
15. Получаем прогноз, оценивающий общую вариацию уровней.

Рис.9.7. Алгоритм прогнозирования исследуемых параметров по аддитивно-мультипликативной модели

Список литературы

1. ГОСТ 21623-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. М. Издательство стандартов 1976.
2. ГОСТ 27.002-89. Надёжность техники. М, Издательство стандартов, 1989.5.ГОСТ 15467-79 основные понятия. Термины и определения М. Издательство стандартов. 1979.
3. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники, М. Издательство стандартов. 1978
4. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции М. Издательство стандартов. 1981.
5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. -М.: Изд-во стандартов, 1990. - 38с.
6. ГОСТ 24.701-86 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения -М.: Изд-во стандартов, 1990. - 64с.
7. Антонов А.В. Об определении индивидуального ресурса изделий атомных станций. - НКК, 1996, №10, с.42-49.
8. Антонов А.В., Острейковский В.А. Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 368с.
9. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1987. - 184с.
10. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. - М.: Мир, 1980. - 606с.
11. В. М. Журавлев Методы расчета надежности систем автоматики. Учебно-методическое пособие. Г. Фрунзе 1984г.
12. Комаревич Л.В. Введение в теорию надежности сложных технических систем: учеб. пособие / Л.В. Комаревич. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1995. – 80 с. Бегун В.В., Горбунов О.В., Каденко И.Н. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАО)- Киев: НТУУ "КПИ, 2000. – 568 с.
13. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно сложных систем. – СПб.: Изд-во «Политехника», 2000.– 248 с.
14. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
15. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Основные положения. Модели отказов; Введ. 05.12.97. – К.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 45 с.
16. Погребинский С.П., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
17. Иванов Н.Н. Вероятностная модель диффузионного распределения для оценки надежности радиоэлектронных приборов – Информационно-управляющие системы: научный журнал – 2014 - №4. С. 66-69.

18. Бутузов С.Ю. Любавский А.Ю. Оценка времени наработки на отказ накопителей информации автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности - Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности", № 6 (40), 2011 – URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/> (дата обращения: 27.09.15).

19. Бутузов С.Ю., Баскаков С.В., Любавский А.Ю. Статистический анализ времени наработки на отказ накопителей информации автоматизированных систем управления - Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.9 - Воронеж: ВГТУ, 2013.

20. Любавский А.Ю. О применении методов эконометрики для комплексной оценки надежности вычислительных систем - Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности", № 1 (59), 2015 - URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/> (дата обращения: 27.09.15).

21. Abernethy, Dr. Robert B., The New Weibull handbook, Second Edition, авторское издание, 1996, глава 5.

22. Abernethy, Dr. Robert B., The New Weibull handbook, Second Edition, авторское издание, 1996.

23. Avertin F. et al. Reliability of IGBT-Modules for Traction Applications. - Power Electronics Europe, 2001, #7, pp.15-19.

24. Engineering, 2000, #12(3), pp.365-370.

25. Huei-Yaw Ke. A Bayesian/Classical Approach to Reliability Demonstration. - Quality.

26. Januszewski St. et al. Semiconductor Device Failures in Power Converter Service Conditions. - EPE Journal, 1998, #3-4, pp.12-17.

27. Lai C.D., Min Xie, Murthy D.N.P. A modified Weibull distribution. - IEEE Transactions on reliability, 2003, #1, pp.33-37.

Nelson, Wayne, Applied Life Data Analysis, John Wiley & Sons, 1982.