

УДК 519.688, 004.942

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С РАДИАТОРАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ¹

Статья поступила в редакцию 22.11.2016, в окончательном варианте – 05.12.2016.

Семененко Александр Николаевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: matanmaniak@mail.ru

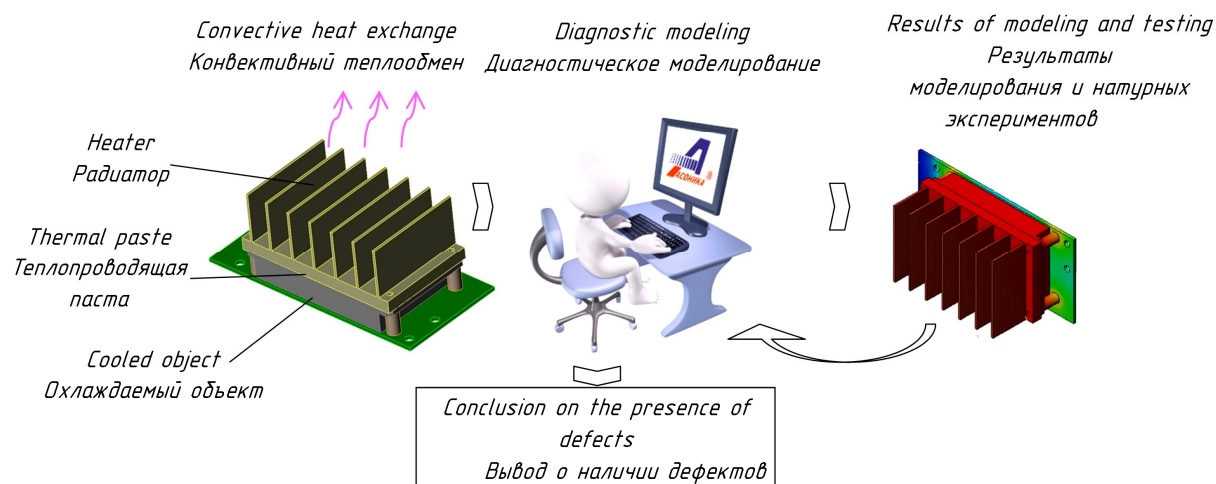
Кофанов Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: y.kofanov@gmail.com

Максимкин Александр Игоревич, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: avian4uk@gmail.com

Сотникова Светлана Юрьевна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: sveta1708@mail.ru

Современные электронные средства (ЭС), включая бортовую аппаратуру, выполняют всё большее количество функций, а их аппаратно-технические решения становятся все сложнее. При этом увеличивается плотность пространственного размещения элементов, возрастает плотность тепловыделения совокупностью радиоэлектронных компонентов (РЭК) в ЭС. Это ухудшает тепловой режим ЭС, прежде всего, из-за превышения коэффициентами фактической тепловой нагрузки предельно допустимых норм. Как следствие снижается надежность эксплуатации ЭС из-за таких факторов: появление отказов РЭК, приводящих к авариям; уменьшение сроков службы РЭК из-за более раннего появления признаков предельных состояний несущих конструкций. Поэтому перед разработчиками ЭС стоит актуальная задача снижения эксплуатационной температуры РЭК. Для этой цели обычно применяются радиаторы охлаждения – в т.ч. и в сочетании с вентиляторами (для усиления теплоотдачи от радиаторов в воздух за счет принудительной конвекции). В условиях плотного расположения РЭК в ЭС и высокого уровня тепловыделения элементов оптимальный выбор конструкций радиаторов (в т.ч. и специально проектируемых для определенной модели или группы моделей ЭС) может представлять собой достаточно сложную задачу. В данной статье рассмотрены различные типы радиаторов. Представлен метод расчёта радиаторов при их использовании для охлаждения. Показана необходимость идентификации параметров, участвующих в расчётах узлов радиаторов. Проанализированы причины появления дефектов в узлах радиаторов. Обоснована необходимость проведения диагностики и приведена методика диагностического моделирования ЭС с радиаторами при их проектировании. В заключении сделаны краткие выводы по проблемам расчетов и проведения диагностического моделирования ЭС с радиаторами охлаждения.

Ключевые слова: электронное средство, радиоэлектронные компоненты, тепловыделение, температура, радиатор, дефекты, диагностическое моделирование, модель тепловых процессов, автоматизация моделирования, подсистема АСНИКА-Т

Графическая аннотация (Graphical annotation)

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422 «Информационно-измерительная система численного моделирования и мониторинга температурных полей электронных средств»).

ELECTRONIC MEANS WITH COOLING RADIATORS:
METHODOLOGY OF DIAGNOSTIC MODELING

The article has been received by editorial board 22.11.2016, in the final version – 05.12.2016.

Semenenko Aleksandr N., post-graduate student, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: matanmaniak@mail.ru

Kofanov Yuriy N., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: y.kofanov@gmail.com

Maksimkin Aleksandr I., post-graduate student, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, 31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: avian4uk@gmail.com

Sotnikova Svetlana Yu., Ph.D. (Engineering), Researcher, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail:sveta1708@mail.ru

Modern electronic means (EM), including the onboard equipment, execute an increasing number of functions and their hardware technical solutions become more difficult. At the same time density of spatial placement of elements increases and density of heat dissipation by set of radio-electronic components (REC) in EM increases too. This worsens the thermal mode of the EM – first of all, because it exceeded the ratios of the actual heat load in comparison with maximum permissible norms. As a result operational reliability of EM reduced due to the following factors: the appearance of REC failures, leading to accidents; the reduction of the REC service life due to the earlier appearance of signs of load-carrying structures limit statuses. Therefore the developers of EM are faced by the urgent task to reduce the operation temperature of REC. Cooling heat sinks – including in combination with fans (to enhance heat transfer from the heat sink to the air by forced convection) are usually used to this purpose. In terms of dense arrangement REC in EM and a high level of elements heat dissipation the optimal choice of heat sinks designs (including specially designed for a particular model or group of models of EM) can be a daunting task. This article describes the various types of heat sinks. The calculation method of heat sinks in case of their use as cooling devices is examined in the article. Authors are shown the necessity of the parameters identification participating in calculations of nodes of heat sinks. The authors analyzed the reasons of defects appearance in nodes of heat sinks. Also authors justified the necessity of diagnostics and the technique of diagnostic modeling of EM with heat sinks in case of their design is given. In the conclusions are made short summary on the problems of calculations and the diagnostic simulation of EM with cooling heat sinks.

Keywords: electronic means, radio-electronic components, heat dissipation, temperature, heat sink, defects, diagnostic modeling, model of thermal processes, modeling automation, ASONIKA-T subsystem

Развитие современных электронных средств (ЭС) имеет тенденцию к увеличению функциональности, усложнению конструкций, уменьшению их размеров (особенно в случае бортовой аппаратуры). Одновременно, обычно, растет и энергопотребление ЭС на единицу объема. Ввиду низкого КПД большей части ЭС (5–10 %) тепловыделение в процессе их работы довольно велико. При этом для некоторых классов ЭС тепловыделение происходит в достаточно ограниченных объемах. Как следствие, может происходить перегрев функциональных узлов аппаратуры – например, радиоэлектронных компонентов (РЭК), установленных на печатных платах [4]. Нарушение теплового режима ЭС критично, в первую очередь, для аппаратуры ответственного назначения, включая бортовую [7]. Кратковременные значительные нарушения теплового режима могут приводить к выходу ЭС из строя, а повышенные тепловые нагрузки в течение длительных периодов времени могут сокращать срок службы изделий, увеличивать аварийность ЭС в целом [2, 4, 21]. Поэтому, безусловно, актуальной является задача использования средств эффективного отвода тепла в ЭС для обеспечения адекватных режимов работы РЭК. Одним из направлений решения этой задачи является применение радиаторов [5, 17, 20].

После этапа проектирования ЭС следует его изготовление и сборка. На этих этапах возможно возникновение различных дефектов, в т.ч. связанных с браком РЭК и материалов, некачественной сборкой или пайкой РЭК, дефектами печатных плат и т.д. Существенно, что такие дефекты могут носить скрытый (не определяемый визуально) характер. Выявить дефекты такого типа при проведении испытаний ЭС бывает сложно.

Поэтому следующим шагом, направленным на обеспечение надёжности ЭС, является проведение диагностического моделирования (ДМ) его конструкции [11, 18]. Применение ДМ позволяет существенно упростить поиск неисправностей аппаратуры (в том числе содержащей радиаторы) при её испытаниях. Однако эти вопросы в существующей литературе по технологиям изготовления и эксплуатации ЭС отражены слабо. Поэтому в данной статье представлен метод расчёта радиаторов для ЭС, работающих в «стесненных условиях», а также методика ДМ ЭС, содержащих радиаторы.

Типы радиаторов. Радиатор – это конструктивный узел, соединённый с охлаждаемым элементом (сухой контакт, через прокладку, при помощи специальной жидкости, теплопроводящей пасты и т.д.). Радиатор призван отводить тепловую энергию, выделяющуюся на РЭК в воздух. Отвод тепла радиатором осуществляется теплопроводностью через места крепления к РЭК; за счет естественной или принудительной (при наличии обдува) конвекции воздуха, обтекающего радиатор; излучением от поверхно-

сти радиатора на соседние конструкции или в окружающее пространство. Для увеличения теплоотдачи радиатора в воздух помимо обдува могут применяться различные конструктивные решения: увеличение количества ребер; усложнение их формы; повышение шероховатости поверхности радиатора и пр.

В данной работе рассматриваются типы радиаторов, наиболее часто используемые для охлаждения полупроводниковых РЭК. Подчеркнем следующее: радиаторы могут устанавливаться не на все РЭК – часть элементов с невысоким уровнем тепловыделения и/или большой площадью собственной поверхности в использовании радиаторов может не нуждаться; радиаторы могут устанавливаться как на отдельные РЭК, так и на их группы. Основные конструктивные типы радиаторов: ребристые (одно- и двусторонние); штыревые (одно- и двусторонние); пластинчатые.

Важнейшие требования, предъявляемые к материалам, предназначенным для изготовления радиаторов: невысокая плотность; высокая теплопроводность (небольшое тепловое сопротивление); нетоксичность; низкая стоимость. Кроме того важна и «технологичность» используемых материалов, т.е. их возможность подвергаться различного рода технологическим операциям для получения желаемой формы изделия.

Данным критериям удовлетворяет алюминий и его сплавы. Медь обладает более высокой теплопроводностью, чем алюминий. Однако её плотность и стоимость выше, чем у алюминия [9]. В то же время для изделий из меди можно получить значительно более тонкие «пластинки» (или иные элементы сложной формы), чем из алюминия. При этом площадь поверхности радиатора на единицу объема будет выше.

Если к радиатору предъявляются жёсткие требования по массе (это существенно, прежде всего, для бортовой аппаратуры), то используют магниевые сплавы. Отечественные предприятия при изготовлении радиаторов применяют материалы и сплавы, представленные в таблице 1 [14].

Таблица 1 – Материалы и сплавы, применяемые при изготовлении радиаторов

Материал	Марка	Плотность, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$	Теплопроводность, $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$
Технический алюминий	АД1, АД, АМ, АМЦ	2710 2730	218–226 180
Алюминиевые сплавы	АЛ2	2650	175
	АЛ9	2660	151
	Д16М	2780	192
	Д16Т	2780	121
Медь	М1, М2, М3	8940	385
Латунь	Л96	8850	247
Магниевые сплавы	МА-1	1700–1800	116
	МА-3		65
	МА-8		124
	ВМ-65-1		109

Кроме того, в конструкциях ЭС могут использоваться и радиаторы зарубежных фирм-производителей.

Математическая модель радиатора. Метод расчёта радиаторов. Эффективность радиатора можно оценить по его тепловому сопротивлению и суммарному теплосъёму с поверхности охлаждаемого объекта [8]. Поэтому математическую модель радиатора можно представить совокупностью аналитических выражений, определяющих его тепловое сопротивление и суммарный теплосъём.

Каждый РЭК имеет свою предельно допустимую температуру корпуса или полупроводникового перехода. Превышение фактической температурой её предельного значения может послужить причиной выхода РЭК из строя. Согласно [14] температура перехода полупроводникового прибора (ППП), установленного на радиаторе, равна:

$$t_{\text{ПЕР}} = t_{\text{С}} + \Delta t_{\text{Р max}} + \Delta t_{\text{ПТ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ПЕР}}$ – температура перехода ППП; $[\text{°C}]$; $t_{\text{С}}$ – температура внешней среды (обычно – воздуха), $[\text{°C}]$; $\Delta t_{\text{Р max}}$ – максимально допустимый перегрев радиатора, $[\text{°C}]$; $\Delta t_{\text{ПТ}} = \Delta t_{\text{К}} + \Delta t_{\text{ПК}}$ – разность температур между переходом ППП и теплоотводом (радиатором), $[\text{°C}]$; $\Delta t_{\text{ПК}}$ – разность температур между переходом ППП и корпусом, $[\text{°C}]$; $\Delta t_{\text{К}}$ – разность температур контакта, $[\text{°C}]$.

Максимально допустимый перегрев радиатора равен:

$$\Delta t_{\text{Р max}} = P_{\text{Р}} \times R_{\text{Р}} / \bar{\theta}_{\text{Р}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{Р}}$ – мощность рассеяния радиатора, $[\text{Вт}]$; $R_{\text{Р}}$ – тепловое сопротивление радиатора, $[\text{°C/Вт}]$; $\bar{\theta}_{\text{Р}}$ – усреднённый коэффициент неравномерности температурного поля.

Усреднённые коэффициенты неравномерности температурного поля для ребристых, штыревых и пластинчатых радиаторов при естественной конвекции можно определить из графиков, представленных в [14], при помощи аппроксимаций по методу наименьших квадратов, соответствующих формулам:

$$\bar{\theta}_P(L) = 1.01 \times \exp(-0.43 \times L), \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_{ш}(L) = 1.00 + 0.31 \times L - 12.94 \times L^2, \quad (4)$$

$$\bar{\theta}_П(L) = 1.00 + 0.29 \times L - 11.03 \times L^2. \quad (5)$$

Если задана допустимая температура перехода ППП, то допустимый перегрев радиатора равен:

$$\Delta t_{р доп} = t_{пер доп} - P_{ППП} \times R_{ПТ} - t_c, \quad (6)$$

где $t_{пер доп}$ – допустимая температура перехода ППП, $R_{ПТ}$ – тепловое сопротивление между переходом и теплоотводом, [$^{\circ}C/Bm$].

Если задана допустимая температура корпуса ППП, то допустимый перегрев радиатора равен:

$$\Delta t_{р доп} = t_{к доп} - P_{ППП} \times R_{КТ} - t_c, \quad (7)$$

где $t_{к доп}$ – допустимая температура корпуса ППП; $R_{КТ}$ – тепловое сопротивление между корпусом ППП и теплоотводом (контактное тепловое сопротивление), [$^{\circ}C/Bm$].

Соответственно допустимое тепловое сопротивление радиатора определяется по формулам [14]:

$$R_{р доп} = \Delta t_{р доп} / Q_p = (t_{пер доп} - P_{ППП} \times R_{ПТ} - t_c) / Q_p, \quad (8)$$

где Q_p – суммарный теплосъём с радиатора, [Bm].

Если задана предельно допустимая температура корпуса ППП, то формула (8) может быть преобразована к виду:

$$R_{р доп} = \Delta t_{р доп} / Q_p = (t_{к доп} - P_{ППП} \times R_{КТ} - t_c) / Q_p. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) позволяют определить одну и ту же величину допустимого теплового сопротивления радиатора при помощи разных параметров ($t_{пер доп}$, $R_{ПТ}$ для выражения (8); $t_{к доп}$, $R_{КТ}$ для выражения (9)). Удобнее использовать формулу (9), т.к., как правило, работают с допустимыми температурами корпусов ППП.

Для расчёта допустимого теплового сопротивления радиатора при помощи выражения (9) необходимо получить аналитические выражения для контактного теплового сопротивления (КТС) и суммарного теплосъёма с радиатора. Расчёту КТС посвящены работы [3, 13]. В данной статье метод расчёта КТС не будет рассматриваться.

Суммарный теплосъём с радиатора определяется как сумма теплосъёмов, соответствующих конвективной теплоотдаче (КТ) и излучения с поверхности радиатора. Для ребристых радиаторов КТ происходит с наружной поверхности, включая основание и рёбра; для штыревых – с наружной поверхности, включая основание и штыри; для пластинчатых радиаторов – с основания.

В рамках данной статьи будет рассмотрен метод расчёта ребристого радиатора при естественной конвекции (без искусственно обдува вентилятором).

Теплосъём с наружной поверхности радиатора Q_l вычисляется по формуле [14]:

$$Q_l = \alpha_1 \times S_{нар} \times \Delta t_p \times \bar{\theta}_P, \quad (10)$$

где α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности основания радиатора; $S_{нар}$ – площадь наружной поверхности радиатора; Δt_p – перегрев радиатора.

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_1 зависит от следующих факторов [10]:

- физических свойств среды;
- формы и геометрических размеров поверхности радиатора;
- природы возникновения движущейся по отношению к радиатору среды;
- скорости движения этой среды.

Коэффициент теплоотдачи α_1 вычисляется по формуле:

$$\alpha_1 = (Nu \times \lambda_c / L)_m, \quad (11)$$

где Nu – число Нуссельта; λ_c – коэффициент теплопроводности среды; L – длина радиатора (вдоль рёбер).

Параметры Nu и λ_c берутся при средней температуре между радиатором и воздухом:

$$t_m = (t_p + t_c) / 2 = (t_c + \Delta t_{р доп} + t_c) / 2 = (2t_c + \Delta t_{р доп}) / 2. \quad (12)$$

Как известно, число Nu_m определяется из выражения:

$$Nu_m = C(Gr \times Pr)_m^a. \quad (13)$$

Кроме числа Нуссельта, выражение (13) содержит ещё два критерия подобия: число Грасгофа (Gr) и число Прандтля (Pr).

Константы C , n определяются из таблицы 2 [14].

Таблица 2 – Данные для определения констант C , n

$(Gr \times Pr)_m$	C	n
$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^2$	1.18	1/8
$5 \times 10^2 - 2 \times 10^7$	0.54	1/4
$2 \times 10^7 - 1 \times 10^{13}$	0.135	1/3

Число Грасгофа (Gr) определяется по формуле:

$$Gr = g \times L^3 \times \beta_c \times (t_p - t_c) / \nu_c^2 = g \times L^3 \times \beta_c \times \Delta t_p / \nu_c^2, \quad (14)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\beta_c = 1 / (273 + t_c)$ – коэффициент объёмного расширения для газов; ν_c – кинематическая вязкость среды.

Число Прандтля (Pr) определяется по формуле:

$$Pr = \eta_c \times C_p / \lambda_c, \quad (15)$$

где $\eta_c = \nu_c \cdot \rho_c$ – динамическая вязкость среды; ρ_c – плотность среды; C_p – удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении.

С учётом выражения для динамической вязкости среды число Прандтля можно определить при помощи выражения:

$$Pr = \nu_c \times \rho_c \times C_p / \lambda_c. \quad (16)$$

Исходя из рисунка 1, площадь наружной поверхности радиатора определяется по формуле:

$$S_{\text{нар}} = S_{\text{вн}} + S_{\text{т}} + S_{\text{оч}}, \quad (17)$$

где $S_{\text{вн}} = n \times b \times L + 2 \times n \times b \times H_p + 2 \times H_p \times L$ – площадь внешней поверхности рёбер радиатора; $S_{\text{т}} = 2 \times L \times h + 2 \times B \times h$ – площадь поверхности торцов основания радиатора; $S_{\text{оч}} = B \times L - n \times b \times L$ – площадь поверхности основания радиатора за вычетом площади рёбер.

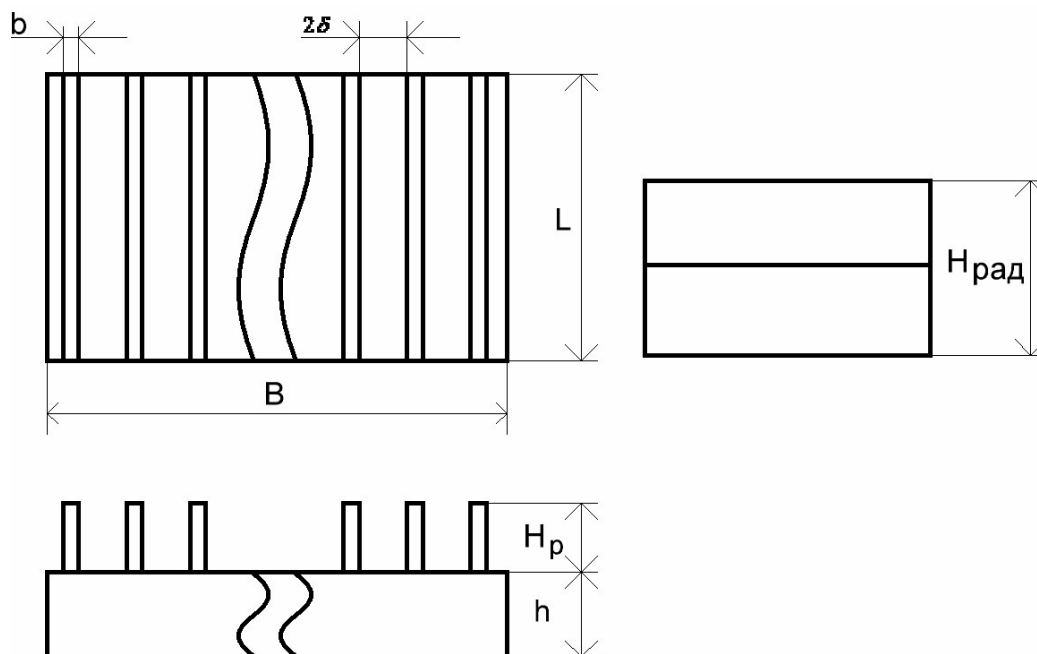


Рис. 1 – Односторонний ребристый радиатор

Итого:

$$S_{\text{нар}} = 2 \times n \times b \times H_p + 2 \times H_p \times L + 2 \times L \times h + 2 \times B \times h + B \times L, \quad (18)$$

где $n = [B / 2\delta]$ – число рёбер радиатора; B – ширина радиатора; L – длина радиатора; b – ширина ребра ребристого радиатора; H_p – высота ребра радиатора; h – толщина основания радиатора.

Конвективный теплосъём с рёбер радиатора Q_2 вычисляется по формуле [14]:

$$Q_2 = \alpha_2 \times S_p \times \Delta t_p \times \mu_p \times \bar{\theta}_p, \quad (19)$$

где α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи с внутренней поверхности ребристого радиатора; S_p – площадь внутренней поверхности радиатора; μ_p – эффективность ребра.

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_2 вычисляется по формуле:

$$\alpha_2 = Nu_\delta \times \lambda_c / \delta, \quad (20)$$

где Nu_δ – число Нуссельта; λ_c – коэффициент теплопроводности среды; δ – половина межрёберного расстояния для радиатора.

Согласно [14] для определения числа Нуссельта Nu_δ необходимо оценить величину комплекса $Gr_\delta \times \delta / L = (g \times \delta^3 \times \beta_c \times \Delta t_p) \times \delta / \nu_c^2 \times L$. Если $Gr_\delta \times \delta / L \leq 22$, то число Нуссельта определяется при помощи уравнения:

$$Nu_\delta = (6 \times Gr_\delta \times \delta / L) / [(12,84 + Gr_\delta \times \delta / L) \times (1 + \sqrt{1 + (51,4 \times Gr_\delta \times \delta / L) / (12,84 + Gr_\delta \times \delta / L)^2})] \quad (21)$$

Согласно рисунку 1 площадь внутренней поверхности радиатора S_p определяется по формуле:

$$S_p = 2 \times (n-1) \times H_p \times L. \quad (22)$$

Эффективность ребра μ_p можно определить с помощью уравнения [14]:

$$\mu_p = th(2 \times \sqrt{\alpha_2 / (\lambda_p \times b)} \times H_p) / 2 \times \sqrt{\alpha_2 / (\lambda_p \times b)} \times H_p, \quad (23)$$

где λ_p – коэффициент теплопроводности материала радиатора.

Теплосъём за счёт излучения с поверхности радиатора Q_L определяется по формуле [14]:

$$Q_L = \alpha_L \times S_n \times \Delta t_p \times \bar{\theta}_p, \quad (24)$$

где α_L – лучистый коэффициент теплоотдачи; S_n – площадь поверхности радиатора, с которой осуществляется излучение.

Лучистый коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha_L = \varepsilon_{\text{пр}} \times C_0 \times (T_p^4 - T_c^4) \times 10^{-8} / (T_p - T_c), \quad (25)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты системы (радиатор – среда); $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела; T – температура в Кельвинах.

Лучистый коэффициент теплоотдачи также можно определить с помощью выражения, полученного в процессе аппроксимации графика, представленного в [14] по двум переменным:

$$\alpha_L = (2,4 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-4} \times t_c) \times \Delta t + 3,96 + 0,04 \times t_c + 2 \times 10^{-4} \times t_c^2 \quad (26)$$

Согласно рисунку 1 площадь поверхности радиатора, с которой осуществляется излучение, определяется по формуле:

$$S_n = 2 \times n \times b \times H_p + 2 \times H_p \times L + 2 \times L \times h + 2 \times B \times h + B \times L. \quad (27)$$

Найдя теплосъёмы Q_1 , Q_2 , Q_L , можно найти общий теплосъём с радиатора, просуммировав рассчитанные значения. Однако, ввиду того, что конвективная теплоотдача зависит от давления окружающей среды (обычно воздуха), то необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий данную зависимость [14, 16]. Этот коэффициент для ребристого одностороннего радиатора можно определить при помощи выражения, полученного аппроксимацией по методу наименьших квадратов для графика, представленного в [14]:

$$A_p = 0,44 + 1,26 \times 10^{-3} \times P_{\text{мм рт ст}} - 7,13 \times 10^{-7} \times P_{\text{мм рт ст}}, \quad (28)$$

где $P_{\text{мм рт ст}}$ – давление в мм рт ст.

Итого, суммарный теплосъём с радиатора Q_P равен:

$$Q_P = (Q_1 + Q_2 + Q_L) \times A_p. \quad (29)$$

Таким образом, выражения (9) и (29) определяют математическую модель радиатора. Эта модель и метод расчёта заложены в разработанную авторами компьютерную программу определения параметров радиатора. Рассчитанные параметры будут являться исходными данными при описании характеристик радиатора в программе теплового моделирования ЭС. Если в ЭС есть несколько РЭК, для которых необходимо использовать радиаторы, то расчёт параметров проводится отдельно для каждого радиатора.

Сферами применения выражений (формул), приведенных в данном разделе, являются те области науки и техники, где остро стоит задача по обеспечению требуемого теплового режима: машиностроение, приборостроение, радиотехника, электроника и т.д. Преимуществами описанной математической

модели радиатора является возможность её удобной интеграции в программу расчёта – ввиду того, что она (модель) состоит исключительно из аналитических выражений, описывающих процессы теплоотдачи с радиатора.

Программа расчёта параметров радиаторов. Для разработки программы вначале был составлен алгоритм расчёта радиаторов. На рисунке 2 представлена общая схема выполнения расчёта для ребристых радиаторов.

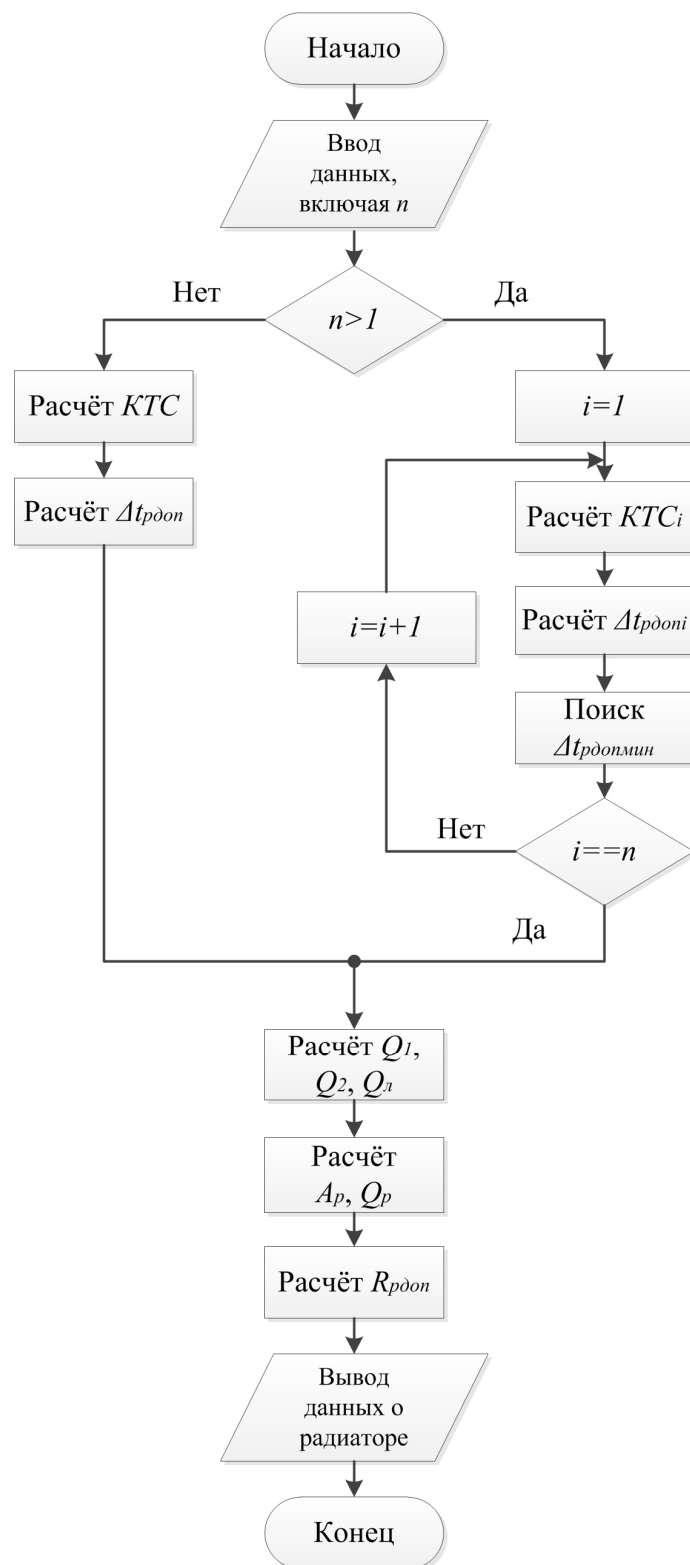


Рис. 2 – Схема алгоритма расчёта ребристых радиаторов (n – число РЭК, устанавливаемых на радиатор, KTC – контактное тепловое сопротивление между РЭК и радиатором)

Вначале вводятся исходные данные, такие как: количество охлаждаемых элементов, материал радиатора, высота, ширина радиатора, межреберное расстояние, толщина ребра, класс чистоты обработки поверхности радиатора и охлаждаемого объекта, тип контакта и т.д. Если на радиатор устанавливается один ($n = 1$) охлаждаемый элемент (РЭК), то расчёт производится по левому плечу алгоритма с использованием формул, приведенных в предыдущем разделе. Если на радиатор устанавливается более одного охлаждаемого элемента ($n \geq 2$), то расчёт производится по правому плечу алгоритма с использованием соответствующих формул. При этом, как видно из рисунка 2, если в ЭС устанавливается более одного РЭК, требующих использования радиаторов, то в расчёте сначала определяется минимально допустимый перегрев радиатора $\Delta t_{\text{доп}}$ для каждого РЭК в отдельности. Далее находится минимальный из них. Затем дальнейший расчёт производится именно с этим значением допустимого перегрева радиатора $\Delta t_{\text{доп, мин}}$. После выполнения всех необходимых расчётов программа выводит результаты.

Программа по расчёту параметров радиаторов разработана в среде *Microsoft Visual Studio 2008* на языке C++.

Созданная программа позволяет разработчику проводить расчёты стандартных типов радиаторов (ребристых, штыревых и пластинчатых) по ОСТ 5.8794-88. В случае если разработчику нужен радиатор нестандартных размеров, он может задать его характеристики и произвести соответствующий расчёт по программе.

При заданных входных данных программа позволяет определить для радиатора следующие параметры:

- КТС между радиатором и охлаждаемым объектом;
- суммарный теплосъём с поверхности радиатора;
- тепловое сопротивление радиатора;
- остаточная мощность на охлаждаемом элементе (оставшаяся мощность, рассеиваемая РЭК в окружающее пространство помимо радиатора).

По окончании расчёта программа выдаёт результат о пригодности применения выбранного радиатора при заданных условиях. На рисунках 3–5 представлен интерфейс программы для модуля расчёта ребристых радиаторов. На них же представлен пример работы программы. Имеется РЭК, имеющий корпус из сплава Д16, параметры РЭК, окружающей среды и типа контакта представлены на рисунке 3. Необходимо определить, какие из стандартных радиаторов, описанных в ОСТ 5.8794-88, смогут удовлетворить требованиям по необходимому тепловому режиму в условиях, указанных на рисунке 3. Материал радиаторов – сплав Д16.

Входные данные

Число приборов	1
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	169,8
Коэффициент теплопроводности корпуса, Вт/(м·°C)	169,8
Температура воздуха, °C	50
Давление воздуха, мм рт ст	760
Предел прочности, Па	183000000
Скорость потока воздуха, м/с	0
Мощность рассеивания, Вт	5
Допустимая мощность рассеивания, Вт	4
Допустимая температура корпуса, °C	100
Площадь основания корпуса, м ²	0,01
Контактное давление, Па	4000000
Класс чистоты обработки поверхности радиатора	5
Класс чистоты обработки поверхности корпуса	5
Контакт в пастообразной среде	▼

Рис. 3 – Интерфейс модуля расчёта для односторонних ребристых радиаторов (входные параметры расчёта)

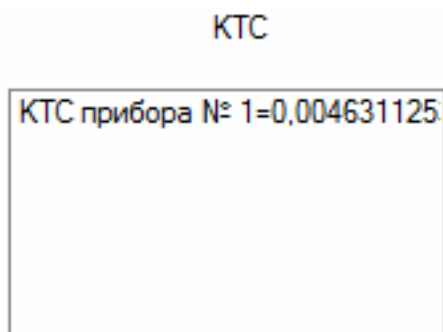


Рис. 4 – Интерфейс модуля расчёта для односторонних ребристых радиаторов (выходные параметры расчёта)

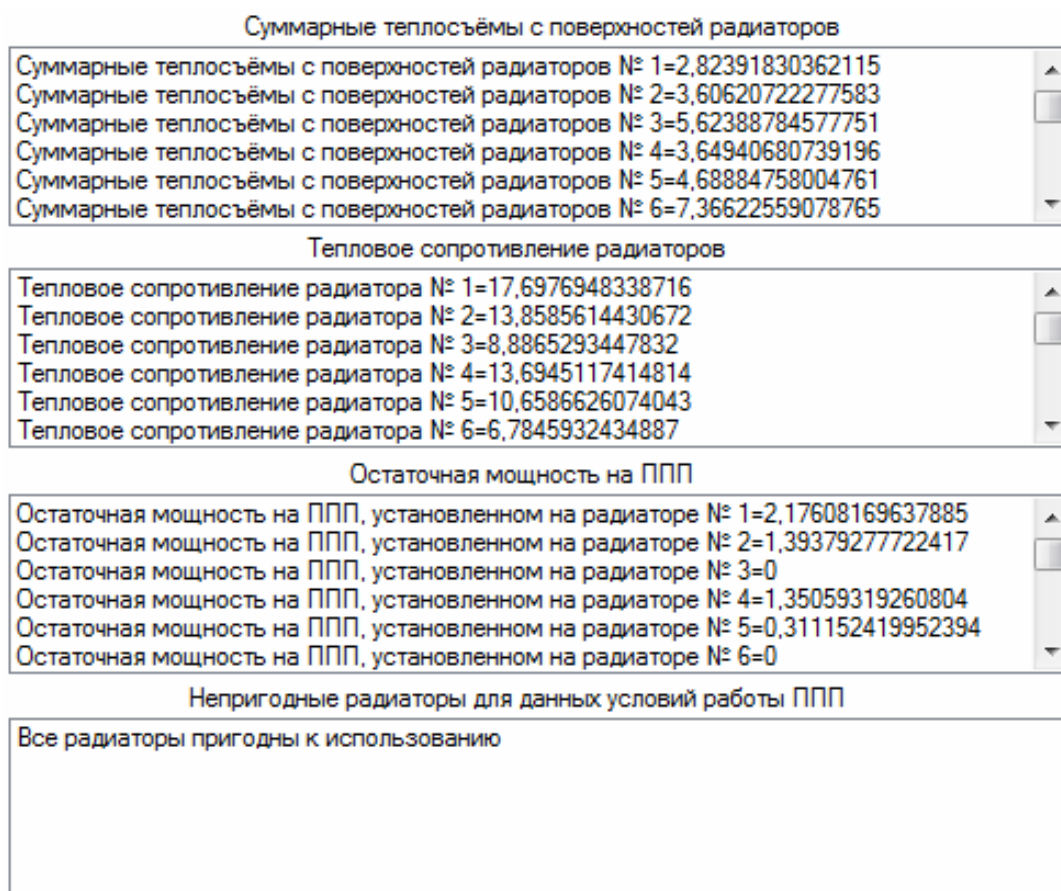


Рис. 5 – Интерфейс модуля расчёта для односторонних ребристых радиаторов (выходные параметры расчёта)

Диагностическое моделирование. Применение диагностического моделирования позволяет выявить недопустимые отклонения теплового режима РЭК от их штатных режимов работы в составе ЭС. Нарушение тепловых режимов может происходить из-за разброса параметров, которые рассмотрены выше при расчёте радиатора, а также тех параметров, которые могут появиться в различных вариантах схмотехнического построения ЭС [15].

Для электрической изоляции полупроводниковых приборов от охладителя (радиатора) следует применять изоляционные прокладки, оксидированный алюминий, лавсан, либо пленки ПТЭФ, имеющие минимальные тепловые сопротивления. Для снижения контактного теплового сопротивления необходимо применять смазку из невысыхающего масла или тонкую фольгу из мягкого материала. Здесь пригодна бериллиевая смазка КПП-8 и полиметиленаксановая жидкость ПМС-200.

При использовании изоляционных прокладок увеличивается общее тепловое сопротивление системы «корпус-теплоотвод-окружающая среда», что может приводить к повышению температуры $p-n$ переходов и выходу их из строя. В качестве прокладок используют слюду, различные пленки из пластмассы, керамику.

Таким образом, лучше крепить полупроводниковый прибор к теплоотводу без изоляционных прокладок, но со смазкой, а охладитель изолировать от шасси.

Фактические толшины всех этих прокладок, паст и жидкостей надо уметь диагностировать в условиях «прижимающих нагрузок». Кроме того, необходимо анализировать возможные причины отказов при использовании радиаторов. Для решения этих задач целесообразно использовать предлагаемую авторами методику диагностического моделирования ЭС с радиатором, схема которой представлена на рисунке 5. Ее можно подразделить на три этапа.

Первый этап методики предусматривает получение результатов теплового моделирования для ЭС, содержащих радиаторы (без каких либо дефектов) – при наличии воздействия теплового дестабилизирующего фактора. Результаты моделирования заносятся в базу данных (БД) расчетов.

На втором этапе моделируют то же ЭС, но с разными дефектами (отсутствие какого-либо РЭК, крепежа, неправильный материал, некачественная пайка, плохой контакт радиатора с охлаждаемым узлом и т.д.) – при воздействии того же дестабилизирующего фактора. Результаты также заносятся в БД для каждого из вариантов дефектов. Данный этап позволяет найти такой тепловой дестабилизирующий фактор, при котором тот или иной дефект будет наиболее ярко выражен.

На третьем этапе осуществляется сравнение итогов реальных испытаний ЭС при воздействии того же дестабилизирующего фактора с результатами моделирования, занесёнными в БД на первых двух этапах – это позволяет выявить наличие дефекта и его характер.

Рассмотрим перечисленные этапы подробнее.

Первый этап заключается в выполнении следующих шагов.

1.1. Анализ технического задания (ТЗ) и документации на ЭС. Это необходимо для понимания назначения и условий работы ЭС; фактических или допустимых габаритных размеров устройства; применяемых материалов; совокупности используемых РЭК; конструкции радиатора и т.д.

1.2. На основе полученных данных разрабатывается математическая модель ЭС, в которой используется информация о конструкции, совокупности РЭК, применяемых радиаторах и т.д. Полученная модель импортируется в САПР, позволяющую моделировать тепловые режимы ЭС (например, в систему АСОНИКА-Т [6, 23]). При разработке моделей параметры материалов следует брать из справочников или из результатов проведения идентификации [1, 12]. Идентификация – это установление соответствия между объектом, представленным некоторой совокупностью экспериментальных данных о его свойствах, и моделью объекта [1, 21]. Иными словами требуется сопоставить экспериментальные данные и данные математического моделирования, и, на основе этого, определить неизвестные тепловые параметры конструкций ЭС. Наиболее плодотворными и перспективными являются методы идентификации, построенные на принципе настраиваемой модели [1, 21].

1.3. Проводится моделирование ЭС в условиях, указанных в ТЗ.

1.4. Выполняется анализ результатов моделирования по двум критериям: физической адекватности и соответствия ТУ на ЭС. Под физически неадекватными результатами следует понимать такие, которые в реальности не могут получиться (например, чрезмерно высокое значение температуры РЭК, размещенного на печатном узле).

Если результаты моделирования не удовлетворяют данным критериям, то проверяется корректность модели ЭС. В случае необходимости в модель вносятся необходимые исправления, носящие методический характер (в частности проверяется правильность введения исходных данных, граничных условий и т.д.). Затем расчёт проводится заново.

Если полученные данные снова не удовлетворяют заданным критериям, то изменяется конструкция ЭС, конструкция радиатора, применяемые материалы и/или РЭК. В этом случае изменения уже носят конструктивный характер, связанный с корректировкой компоновки ЭС, его конструкции, применяемых компонентов и материалов [19]. Затем заново получают модель ЭС и повторяют расчёт.

Если результаты моделирования удовлетворяют заданным критериям, то переходят к следующему шагу. Если результаты моделирования вновь не удовлетворяют критериям, то необходимо или вновь пересматривать конструкцию ЭС, радиатора, применяемых материалов и/или РЭК, или совместно с заказчиком изменить ТЗ на ЭС и вернуться к пункту 1.2.

1.5. Полученные расчетные результаты, соответствующие полностью исправному ЭС, заносятся в БД.

На втором этапе разрабатываемой методики в модель ЭС, отработанную на первом этапе, вводятся возможные дефекты. Далее проводится расчёт для полученной модели с дефектом (дефектами). Результаты, соответствующие введению того или иного дефекта, заносятся в БД.

Третий этап заключается в выполнении следующих шагов.

3.1. Получение (определение) тепловых режимов в результате проведения натурных испытаний ЭС при заданных температурных воздействиях.

3.2. Поиск в БД результатов моделирования, соответствующих нормальному режиму работы выbranного ЭС при заданном температурном воздействии.

3.3. Сравнение результатов (тепловых режимов ЭС) полученных по 3.1 и 3.2. При этом возможны два варианта. (А) Если тепловые режимы совпадают (находятся в пределах заданного допуска, учитывающего технологический разброс параметров), то диагностика считается завершённой, а ЭС с радиатором можно считать соответствующим требованиям ТЗ по заданному температурному воздействию. (Б) Иначе – переходят к следующему шагу (3.4).

3.4. Поиск в БД результатов моделирования, в наибольшей степени соответствующих работе ЭС с дефектом (или с несколькими дефектами) при заданном температурном воздействии. Для оценки совпадения результатов задается определенный допуск – он может быть иной, чем для пункта 3.3.

Если в допуск укладывается единственный вариант расчетов для ЭС с дефектами, то можно считать, что дефект (или их совокупность) диагностирован.

Если в допуск укладывается два или более вариантов расчетов, то возможны такие решения: (а) дефект определяется по результату, наиболее близкому к фактическому (из числа тех, которые попали в пределы допуска); (б) для всех результатов для «ЭС с дефектами», попавших в пределы допуска, рассчитывается распределение вероятностей (исходя из близости к фактическому результату) – при этом может быть использована разная метрика для оценки близости к фактическому результату.

Если в пределах допуска не находится ни одного варианта расчетов для «ЭС с дефектами», то считается, что дефект в ЭС есть, но специфицировать его не удалось.

В наглядной форме совокупности действий для отдельных этапов изображены на рисунке 6.

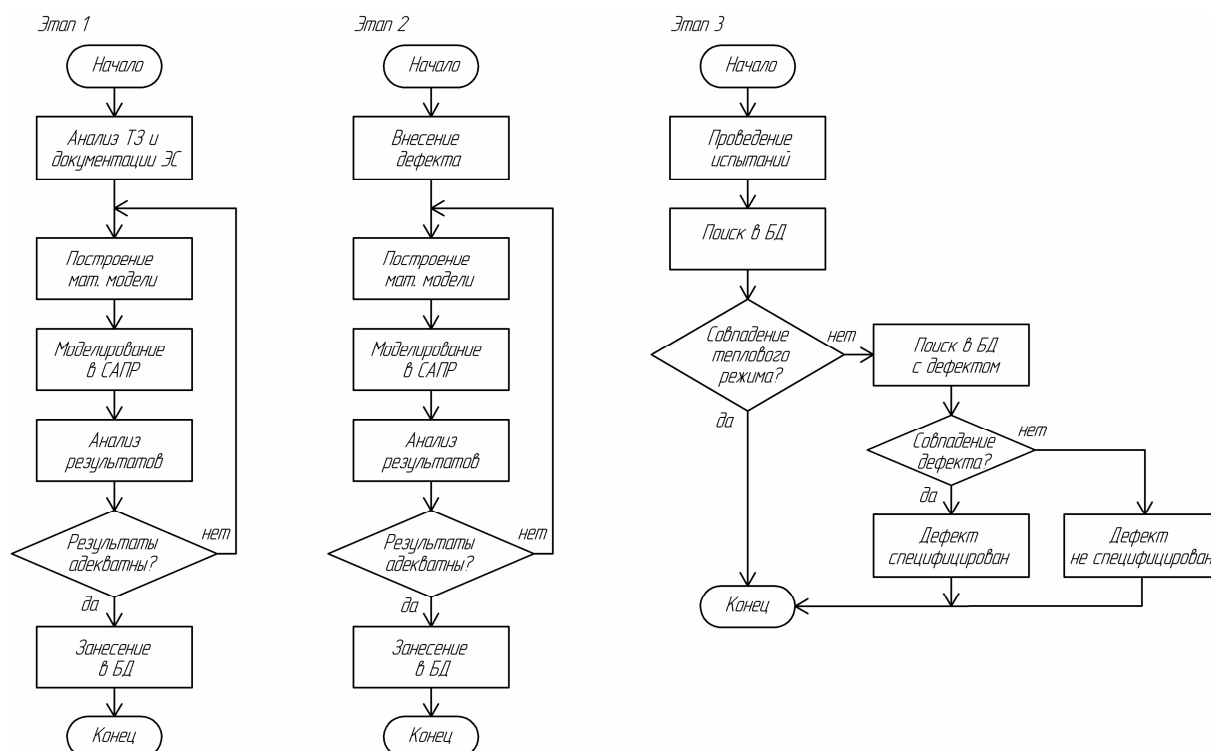


Рис. 6 – Общая схема алгоритма диагностического моделирования

Выводы. В результате проведённых исследований были получены следующие результаты.

1. Показана продуктивность использования радиаторов для обеспечения требуемого теплового режима ЭС, в том числе при использовании только естественной конвекции.

2. Рассмотрены основные типы радиаторов и материалы, применяемые при их изготовлении; требования, предъявляемые к материалам.

3. Разработана математическая модель радиатора, представляющая собой совокупность аналитических выражений, описывающих происходящие физические процессы, связанные с работой радиатора. Модель учитывает все процессы теплопередачи (кондукция, конвекция, излучение). Эта модель используется для теплового расчета радиаторов.

4. На основе метода расчета, отраженного в ОСТ4.012.001-77, и математической модели разработана компьютерная программа расчёта радиаторов. Метод может рассматриваться как методическое обеспечение программы, а модель – математическое обеспечение. Программа позволяет давать обоснованные заключения о пригодности/непригодности применения выбранных радиаторов для охлаждения

определенных РЭК в конкретных случаях. При этом учитывается следующее: условия окружающей среды; параметры материалов радиатора и охлаждаемого элемента; тип контакта между радиатором и охлаждаемым элементом и т.д.

5. Разработанные метод и программа легли в основу методики диагностического моделирования ЭС с радиаторами. Данная методика содержит три этапа. Первые два этапа базируются на математическом моделировании ЭС без дефекта и с различными дефектами при помощи САПР (например, АСОНИКА-Т). Третий этап заключается в проведении натурных испытаний реального ЭС с целью получения его теплового режима. Затем результаты натурального и математического моделирования сравниваются. По итогам сравнения делается один из трех выводов: дефект отсутствует; есть определенный дефект; дефект есть, но его не удается специфицировать.

Список литературы

1. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем: учебник / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблёв, М. Ю. Шестопапов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2009. – 352 с.
2. Аминев Д. А. Метод расчёта погрешностей измерений температур электрорадиоэлементов печатного узла / Д. А. Аминев, А. И. Манохин, А. Н. Семененко, С. У. Увайсов // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 45–47.
3. Аппаратура радиоэлектронная. Расчёт контактного теплового сопротивления элементов и узлов. – ОСТ4-Г0.012.014-69. Москва : Стандартинформ, 1969. – 22 с.
4. Брумштейн Ю. М. Анализ некоторых моделей группового управления рисками / Ю. М. Брумштейн, О. Н. Выборнова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 64–72.
5. Глушицкий И. В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники / И. В. Глушицкий. – Москва : Машиностроение, 1987. – 184 с.
6. Гольдин В. В. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования : монография / В. В. Гольдин, В. Г. Журавский, В. И. Ковалёнок и др. ; под ред. А. В. Сарафанова. – Москва : Радио и связь, 2003. – 456 с.
7. Давыдов Д. Н. Тепловой расчёт и оптимизация конструкции модуля распределённой системы электропитания ракет (СЭПР) / Д. Н. Давыдов, А. Н. Албутов, К. В. Бологов // Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО : сборник докладов Четвёртой научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Научные чтения к 105-летию со дня рождения академика А. А. Расплетина», Москва, 26–28 сентября 2013 г. / под общ. ред. П. А. Созинова. – Москва : ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2013. – С. 22–32.
8. Ершов А. Б. Определение теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых диодов по переходной функции термочувствительного параметра / А. Б. Ершов, В. Я. Хорольский, А. Н. Хабаров, А. В. Ефанов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 3. – С. 120–129.
9. Кандырин Ю. В. Многовариантное проектирование радиаторов для микропроцессоров / Ю. В. Кандырин, С. И. Карачаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (163). – С. 51–58.
10. Керн Д. Развитие поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. – Москва : Энергия, 1977. – 462 с.
11. Колодежный Л. П. Надёжность и техническая диагностика / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – Москва : ВВА им. проф. Н. Е Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
12. Кофанов Ю. Н. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств / Ю. Н. Кофанов, А. С. Шалумов, С. У. Увайсов, С. Ю. Сотникова ; под ред. Ю. Н. Кофанова. – Москва : Энергоатомиздат, 2013. – 392 с.
13. Панасик Д. С. Зависимость контактного теплового сопротивления от силы прижима термопары к электрорадиоэлементу / Д. С. Панасик, И. А. Иванов, А. Н. Семененко, С. У. Увайсов // Надёжность и качество : труды международного симпозиума. – 2015. – Т. 2. – С. 305–306.
14. Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Методы расчёта. – ОСТ4.012.001-77. Москва : Стандартинформ, 1978. – 35 с.
15. Ройзен Л. И. Тепловой расчёт обрешённых поверхностей / Л. И. Ройзен, И. Н. Дулькин ; под ред. В. Г. Фастовского. – Москва : «Энергия», 1977. – 256 с.
16. Семененко А. Н. Разработка математических моделей радиаторов для автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА. Расчёт оптимальных параметров радиаторов / А. Н. Семененко // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ : материалы конференции. – Москва : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. – С. 116–118.
17. Семененко А. Н. Тепловая модель радиаторов модулей электропитания электронных средств / А. Н. Семененко, Ю. Н. Кофанов, А. С. Роткевич, С. У. Увайсов // Качество. Инновации. Образование. – 2015. – № 12. – С. 44–51.
18. Тихонов А. Н. Методика диагностирования электронной управляющей аппаратуры объектов тяжёлого машиностроения с применением компьютерного моделирования вибрационных процессов / А. Н. Тихонов, С. У. Увайсов, Ю. Н. Кофанов, А. Н. Семененко // Тяжёлое машиностроение. – 2015. – № 9. – С. 38–42.
19. Фролов А. Д. Теоретические основы конструирования и надёжности радиоэлектронной аппаратуры : учебник / А. Д. Фролов. – Москва : «Высшая школа», 1970. – 488 с.
20. Харпейн Ю. Выбор радиаторов для конкретных приложений / Ю. Харпейн // Электронные компоненты. – 2013. – № 10. – С. 105–109.
21. Шалумов А. С. Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов : учебное пособие / А. С. Шалумов. – Ковров : КГТА, 2000. – 233 с.

22. Юрков Н. К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 220–231.
23. Shalumov A. Accelerated Simulation of Thermal and Mechanical Reliability of Electronic Devices and Circuits / A. Shalumov, E. Pershin. – Moscow : Printing by PrintLETO.ru, 2013. – 128 p.

References

1. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu. *Identifikatsiya i diagnostika sistem* [Identification and diagnostics of systems], Moscow, "Akademiya" Publ., 2009. 352 p.
2. Aminev D. A., Manokhin A. I., Semenenko A. N., Uvaysov S. U. Metod rascheta pogreshnostey izmereniy temperatur elektroradioelementov pechatnogo uzla [A method of calculating the errors of measurements of the temperatures of radio-electrical components of a printed circuit]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2015, no. 5, pp. 45–47.
3. Radio-electronic equipment. The calculation of contact thermal resistance of elements and nodes. OST4G–0.012.014-69. Moscow, Standartinform Publ., 1969. 22 p.
4. Brumshteyn Yu. M., Vybornova O. N. Analiz nekotorykh modeley gruppovogo upravleniya riskami [Analysis of some models for group risk management]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 64–72.
5. Glushitskiy I. V. *Okhlazhdenie bortovoy apparatury aviatsionnoy tekhniki* [Cooling of the onboard equipment of aviation technique], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 184 p.
6. Goldin V. V., Zhuravskiy V. G., Kovalenok V. I., Kofanov Yu. N., et al. *Issledovanie teplovykh kharakteristik RES metodami matematicheskogo modelirovaniya* [Research of RES thermal characteristics by methods of mathematical modeling], Moscow, Radio i svyaz Publ., 2003. 456 p.
7. Davydov D. N., Albutov A. N., Bologov K. V. Teplovoy raschet i optimizatsiya konstruktssii modulya raspredelennoy sistemy elektropitaniya raket (SEPR) [Thermal calculation and optimization of construction of the module of rockets power supply distributed system (SEPR)]. *Aktualnye voprosy razvitiya sistem i sredstv VKO : sbornik dokladov Chetvertoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov «Nauchnye chteniya k 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. A. Raspletina», Moskva, 26–28 sentyabrya 2013 g.* [Topical Issues of Development of Systems and Means of VKO. Proceedings of the Fourth Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Experts "Scientific Readings to the 105 anniversary since the birth of the academician A. A. Raspletin", Moscow, on September 26–28, 2013], Moscow, OAO «GSKB «Almaz-Antey» Publ., 2013, pp. 22–32.
8. Yershov A. B. Opredelenie teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus silovykh poluprovodnikovyykh diodov po perekhodnoy funktsii termochuvstvitelnogo parametra [Determination of thermal resistance transition-the case of the power semiconductor diodes on the transition function of temperature-sensitive parameter]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 3, pp. 169–182.
9. Kandyrin Y. V., Karacharov S. I. Mnogovariantnoe proektirovanie radiatorov dlya mikroprotsessorov [Radiators for multiple designing the microprocessor]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University], 2015, no. 6 (163), pp. 51–58.
10. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [Extended surfaces of heat exchange], Moscow, Energiya Publ., 1977. 462 p.
11. Kolodezhnyy L. P., Chernodarov A. V. *Nadezhnost i tekhnicheskaya diagnostika* [Reliability and technical diagnostics], Moscow, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Publ. House, 2010. 452 p.
12. Kofanov Yu. N., Shalumov A. S., Uvaysov S. U., Sotnikova S. Yu. *Informatsionnye tekhnologii proektirovaniya radioelektronnykh sredstv* [Information technologies of radio-electronic means design], Moscow, Energoatomizdat Publ., 2013. 392 p.
13. Panasik D. S., Ivanov I. A., Semenenko A. N., Uvaysov S. U. Zavisimost kontaktnogo teplovogo soprotivleniya ot sily prizhima termopary k elektroradioelementu [The dependence of the contact thermal resistance from the force of the clamp the thermocouple to electroradioelements]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2015, vol. 2, pp. 305–306.
14. Cooling radiators of semiconductor devices. The calculation methods. OST4.012.001-77. Moscow, Standartinform Publ., 1978. 35 p.
15. Royzen L. I., Dulkan I. N. *Teplovoy raschet orebrennykh poverkhnostey* [Thermal design of finned surfaces], Moscow, "Energiya" Publ., 1977. 256 p.
16. Semenenko A. N. Razrabotka matematicheskikh modeley radiatorov dlya avtomatizirovannoy sistemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva apparatury ASONIKA. Raschet optimalnykh parametrov radiatorov [Development of mathematical models for the automated system to ensure reliability and quality equipment ASONIKA. Calculation of optimal parameters of radiators]. *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov NRU HSE : Materialy konferentsii* [Scientific and Technical Conference of Students, Post-graduates and Young Specialists of the HSE. Proceedings of the Conference], Moscow, MIEM NRU HSE Publ. House, 2014, pp. 116–118.
17. Semenenko A. N., Kofanov Yu. N., Rotkevich A. S., Uvaysov S. U. Teplovaya model radiatorov moduley elektropitaniya elektronnykh sredstv [Thermal model of heat radiators of the power supply modules electronic means]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2015, no. 12, pp. 44–51.
18. Tikhonov A. N., Uvaysov S. U., Kofanov Yu. N., Semenenko A. N. Metodika diagnostirovaniya elektronnoy upravlyayushchey apparatury obektov tyazhelogo mashinostroeniya s primeneniem kompyuternogo modelirovaniya vibratsionnykh protsessov [Diagnostics method of electronic control equipment of heavy machinery using computer simulation of vibration processes]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2015, no. 9, pp. 38–42.

19. Frolov A. D. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury* [Theoretical foundations of design and reliability of electronic equipment], Moscow, "Vysshaya shkola" Publ., 1970. 488 p.
20. Kharpeyn Yu. Vybory radiatorov dlya konkretnykh prilozheniy [The choice of radiators for specific applications]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2013, no. 10, pp. 105–109.
21. Shalunov A. S. *Modelirovanie mekhanicheskikh protsessov v konstruktivnykh RES na osnove MKR i analiticheskikh metodov* [Modelling of mechanical processes in designs of RES on the basis of MKR and analytic methods]. Kovrov, KGTA Publ. House, 2000. 233 p.
22. Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Petryanin D. L. K probleme modelirovaniya riska otkaza elektronnoy apparatury dlitelnogo funktsionirovaniya [To a problem of modeling of risk of failure of the electronic equipment of long functioning]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 220–231.
23. Shalunov A., Pershin E. *Accelerated simulation of thermal and mechanical reliability of electronic devices and circuits*, Moscow, Printing by PrintLETO.ru Publ., 2013. 128 p.