

УДК 536.24: 621.396

Дата подачи статьи: 16.09.16

DOI: 10.15827/0236-235X.116.171-175

2016. Т. 29. № 4. С. 171–175

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ STF–ElectronMod**

*П.И. Кандалов, научный сотрудник, petrki87@gmail.ru*

*(Центр визуализации и спутниковых информационных технологий НИИСИ РАН,  
Нахимовский просп., 36, корп. 1, г. Москва, 117218, Россия)*

В статье рассматривается программный комплекс STF-ElectronMod для моделирования стационарных стохастических трехмерных температурных полей в технических системах. Практика показывает, что реальные температурные поля технических систем носят неопределенный интервальный характер. Это обусловлено интервальным характером факторов, определяющих тепловой режим технической системы, а именно: параметрами конструкции технической системы, обладающими статистическим технологическим разбросом изготовления; факторами, возникающими при функционировании технической системы (потребляемые мощности, тепловые потоки, параметры внутренней среды); факторами окружающей среды (температуры среды, хладоносителей, скорости потоков и пр.). Вместе с тем моделирование температурных полей технических систем в настоящее время проводится в предположении, что все параметры теплового режима однозначно и абсолютно точно известны. В статье описывается структура программного комплекса STF-ElectronMod, предназначенного для моделирования интервальных стохастических температурных полей в технических системах при неопределенности входных определяющих данных. Метод и алгоритм компьютерного моделирования основаны на авторских разработках по матрично-топологическому методу, программному комплексу моделирования детерминированных трехмерных температурных полей технических систем, а также на методе статистических испытаний. Применение разработанного метода и алгоритма для моделирования интервально стохастических температурных полей рассмотрено на примере реальной электронной системы.

**Ключевые слова:** программный комплекс, математическое моделирование, температурные поля, стохастический, интервальный.

Системы теплового проектирования можно создавать только с применением современных информационных технологий компьютерного и суперкомпьютерного моделирования, являющихся инструментом проектирования и отработки новых систем. Многофункциональные высокоэффективные программные комплексы позволяют еще на этапе проектирования с высокой степенью достоверности и адекватности прогнозировать поведение, эксплуатационные характеристики и параметры будущих сложных технических систем. Решение данной проблемы особенно актуально при создании высоконадежных технических систем, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды, при тепловых, механических, химических, радиационных и космических воздействиях. Разработка многофункционального программного комплекса теплового проектирования технических систем является критически важной для создания новой конкурентоспособной техники.

Математические модели, положенные в основу современных программных комплексов теплового проектирования (Beta Soft, TGM, Thermal Analysis, Thermal Solution, ANSYS и др.), исходят из допущения, что факторы, определяющие тепловые режимы и, как следствие, температурные поля в технических системах, носят детерминированный характер. Это означает, что все исходные данные, определяющие характер протекания теплового процесса в системе, являются однозначно определенными и полностью известными. В действитель-

ности факторы, которые определяют тепловые процессы в технических системах, в частности в электронных системах, будучи интервальными [1–3], представляют собой случайные величины, принимающие значения внутри своих интервалов изменения, подчиняющиеся некоторым усеченным (ограниченными интервалами) законам распределения вероятностей. Интервальную неопределенность тепловых процессов обуславливают следующие факторы:

- статистические технологические разбросы при изготовлении технической системы и ее элементов;
- интервально стохастические параметры окружающей среды;
- стохастические факторы, возникающие в процессе функционирования технической системы.

Таким образом, для построения высокоэффективного программного комплекса компьютерного моделирования необходимо, чтобы математические модели и последующие алгоритмы, положенные в основу программы, учитывали случайный характер факторов, определяющих тепловые режимы технической системы. Такие математические модели обладают высоким уровнем достоверности и адекватности отражения реальности.

Для решения поставленной задачи были разработаны стохастическая математическая модель анализа интервально *стохастических температурных распределений* (СТР-модель) [4–6] и алгоритм компьютерного расчета распределений ста-

статистических мер (KPCM-алгоритм) стационарных интервально стохастических температурных распределений. Полученные математическая модель и алгоритм реализованы в программном комплексе STF-ElectronMod (Simulation of Temperature Fields of Electronic Modules) [7].

В статье рассматриваются структура разработанного программного комплекса STF-ElectronMod, а также процесс моделирования температурных распределений электронного модуля с этапа задания исходных данных до этапа визуализации результатов расчета. Приводится пример моделирования электронного модуля.

Разработанный программный комплекс STF-ElectronMod применяется для расчетов интервально стохастических распределений температуры при разработке и создании новых электронных систем различного назначения. Тепловое проектирование и моделирование электронных систем с помощью данного программного комплекса показали адекватные реальности результаты. На сегодняшний день как в России, так и за рубежом аналогов данному программному комплексу не существует.

### Структура программного комплекса STF-ElectronMod

Программный комплекс STF-ElectronMod предназначен для компьютерного моделирования детерминированных и интервально стохастических трехмерных температурных полей в электронных модулях, содержащих многослойную печатную плату (МПП), установленные на ее поверхности интегральные микросхемы (МС) и электрорадиоэлементы (ЭРЭ), конструктивные элементы теплоотвода, охлаждения и крепления, с учетом особенностей конструкции, реальных условий эксплуатации и монтажа МС и ЭРЭ, многослойности МПП, конструкций корпусов МС, при различных условиях теплоотвода и охлаждения.

Программный комплекс реализован с применением объектно-ориентированного программирования (ООП) на языке высокого уровня Pascal с использованием программной среды Embarcadero RAD Studio для Microsoft Windows. Применение ООП обеспечивает комплексу высокую степень модульности благодаря таким свойствам, как инкапсуляция, полиморфизм и позднее связывание. Модульность архитектуры соответствует основному базовому принципу открытости программного комплекса, что обеспечивает создание надежного и эффективного комплекса моделирования, который в случае необходимости позволяет наращивать и модернизировать отдельные модули системы, при этом производимые действия оказывают минимальное влияние на работоспособность системы в целом.

В структуру программного комплекса входят следующие элементы:

- подсистема GUI (Graphic User Interface);
- подсистема математического моделирования;
- подсистема STF Kernel;
- подсистема информационного обеспечения.

Подсистема GUI – это удобная разветвленная пользовательская оболочка, в функции которой входит предоставление пользователю гибких и удобных механизмов:

- задания исходных данных;
- графического отображения конструкции электронного модуля в соответствии с заданными исходными данными;
- визуализации рассчитанных статистических мер (математических ожиданий (МО), дисперсий (Д), среднеквадратических отклонений (СКО)) интервально стохастических трехмерных температурных полей электронных модулей в виде цветных изотерм;
- визуализации рассчитанных детерминированных трехмерных температурных полей электронных модулей в виде цветных изотерм;
- сохранения и загрузки исходных и рассчитанных данных в едином формате хранения модельных данных;
- интерактивного отображения рассчитанных данных в графическом и цифровом видах;
- представления конструкций МС, ЭРЭ и теплоотводов системы охлаждения с помощью многополюсного направленного графа тепловой схемы;
- формирования отчета и протокола результатов моделирования в удобном для пользователя виде.

Подсистема математического моделирования реализует программный модуль с алгоритмами математических моделей. В данной подсистеме реализован ряд алгоритмов, обеспечивающих расчеты:

- интервально стохастических трехмерных температурных полей в электронных модулях [4];
- детерминированных температурных полей в электронных модулях [8];
- статистических мер (МО, Д, СКО) интервально стохастических трехмерных температурных полей электронных модулей [4, 5];
- границ интервалов изменения реальных значений стохастических температур в различных точках электронного модуля [4];
- конструкций МС, ЭРЭ и теплоотводов системы охлаждения с помощью многополюсного направленного графа тепловой схемы [9, 10].

В основу подсистемы расчетного ядра STF Kernel программного комплекса STF-ElectronMod положена детерминированная стационарная модель уравнений теплопроводности [7]. STF Kernel

предоставляет общий *Application Programming Interface* (API) для подсистемы математического моделирования. На основе функции, классов и методов, предоставляемых API, реализуются все алгоритмы в подсистеме математического моделирования программного комплекса. API имеет унифицированный интерфейс и может быть предоставлен внешним приложением либо посредством DLL (Dynamic Link Library), либо в качестве COM-объекта (Component Object Model), что делает подсистему STF Kernel универсальной по отношению к сторонним приложениям.

Подсистема информационного обеспечения программного комплекса состоит из двух файловых БД: материалов и тепловых схем.

БД материалов хранится единым файлом в формате XML (eXtensible Markup Language) и содержит знания о теплопроводности материала и его названии, которые используются при задании исходных данных теплопроводностей слоев МПП, зазоров между элементами и МПП, выводов и т.д.

БД тепловых схем представляет собой совокупность файлов формата XML, каждый из которых содержит описание шаблона тепловой схемы одного элемента в виде направленного графа [10].

Хранение информации о материалах и шаблонов тепловых схем в виде файлов формата XML обеспечивает легкий доступ к операциям добавления/редактирования/удаления и не требует дополнительных манипуляций на машине пользователя, связанных с настройками полноценных СУБД. Помимо этого, файлы БД могут быть перенесены с одной машины на другую путем простого копирования на внешние носители информации.

#### Практическое применение разработанного метода и алгоритма моделирования

Рассмотрим пример применения СТР-модели для численного моделирования электронной системы, содержащей девять однотипных электронных модулей, образующих восемь вертикальных каналов, через которые нагнетается воздух. Электронные модули зажимаются по краям специальными фиксирующими устройствами. Расчеты теплового и аэродинамического режимов системы показали, что коэффициент теплоотдачи принудительного воздушного охлаждения через каналы, образованные электронными модулями, составляет  $53 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . Статистический разброс мощностей источников теплоты (МС, установленных в электронных модулях) составляет  $\pm 10^\circ\text{C}$  от номинального значения для МС (рис. 1) с номерами 1–7, 10, 14–17, 22–25, 27, 28, 31, 36, 38–48 и  $\pm 15^\circ\text{C}$  для остальных элементов. Математическое ожидание температуры воздуха в каналах между электронными модулями и ее статистический разброс составляют  $71,3^\circ\text{C} \pm 3\%$ . На крышке корпуса МС 1 (рис. 1) через эластичную теплопроводную

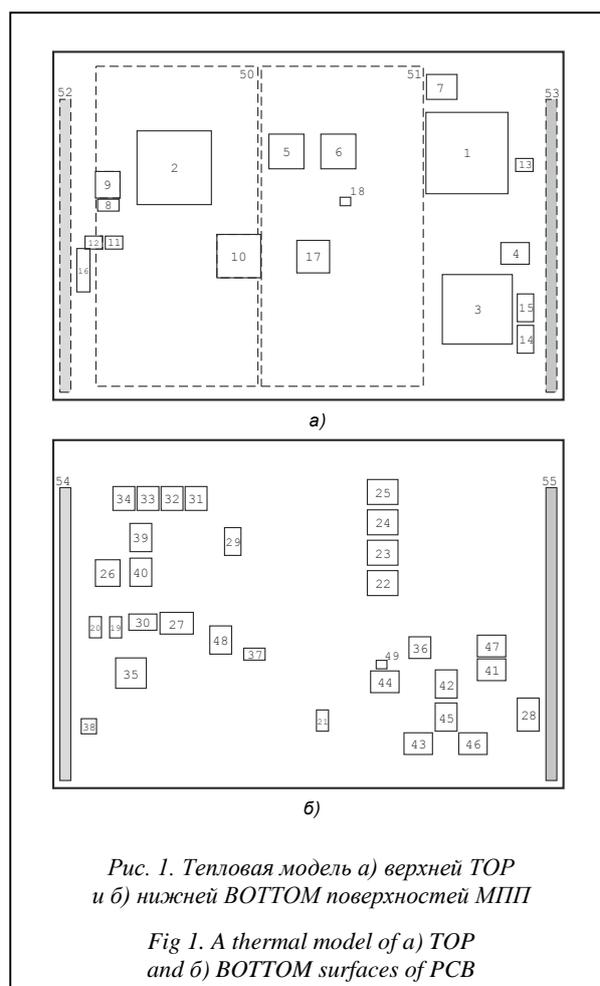


Рис. 1. Тепловая модель а) верхней TOP и б) нижней BOTTOM поверхностей МПП

Fig 1. A thermal model of a) TOP and б) BOTTOM surfaces of PCB

прокладку установлен штыревой радиатор, выполненный из меди. Многослойная структура МПП электронного модуля состоит из 31 слоя, содержащего сигнальные слои, слои полиимиды, слои заземления и распределения питания.

В конструкцию электронного модуля входят также два дополнительных мезонинных электронных модуля, электрические разъемы и металлические планки, которые прижимаются и фиксируются в направляющих системы.

Моделирование по разработанному программному комплексу показывает, что реальные значения температуры корпусов электронного модуля не являются однозначно определенными и детерминированными, а представляют собой интервально стохастические температуры, изменяющиеся в пределах своих интервалов. Гистограммы, рассчитанные для интервальных распределений температуры кристаллов и корпусов микросхемы МС 1, приведены на рисунке 2.

Максимальному разогреву подвержена МС 36: МО температуры корпуса –  $105,98^\circ\text{C}$ , СКО –  $2,83^\circ\text{C}$ , интервал изменения –  $99,33\text{--}112,74^\circ\text{C}$ . Таким образом, разброс реальной температуры МС № 36 может достигать  $\pm 7\%$  относительно ее МО ( $= 105,98^\circ\text{C}$ ).

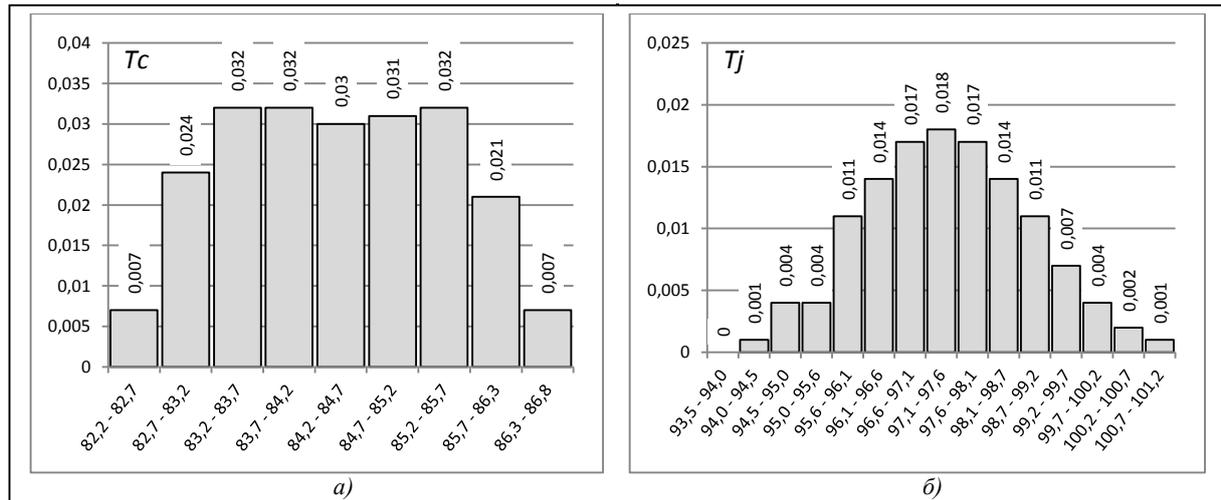


Рис. 2. Гистограммы, рассчитанные для интервальных распределений температур а) корпуса и б) кристалла для микросхемы МС 1

Fig. 2. Histograms for interval temperature distribution of a case (a) and MC 1 silicon (b)

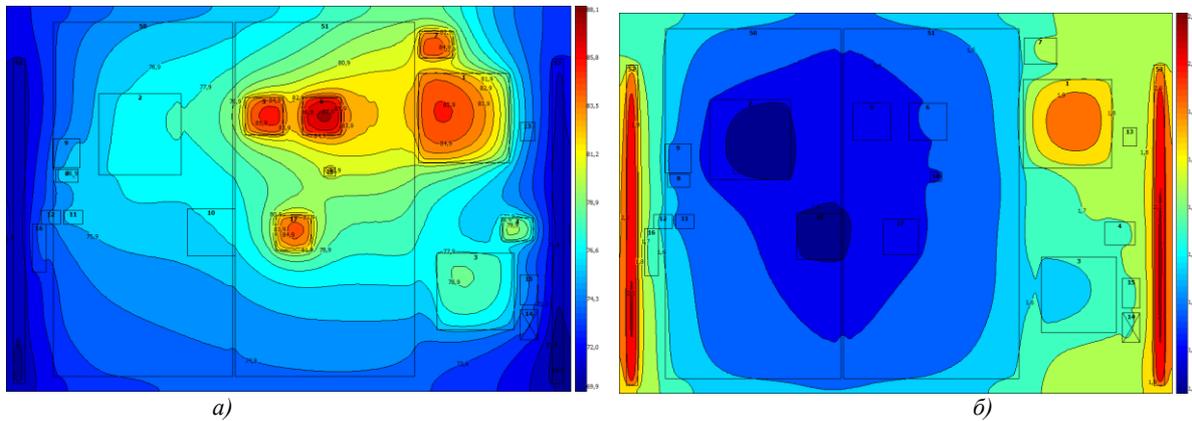


Рис. 3. Распределение температурного поля а) МО и б) СКО на верхней TOP поверхности МПП ЭМ

Fig. 3. Expected values (a) and standard deviation (б) temperature fields on TOP surface of PCB

Результаты моделирования статистических мер (МО и СКО) температурных полей на плате электронного модуля в условиях конвективного теплообмена для TOP поверхности платы приведены на рисунке 3. Минимальное значение температуры для распределения МО температурного поля электронного модуля составляет 69,96 °С, максимальное – 88,13 °С.

Разработанная математическая СТР-модель и алгоритм КРСМ стационарных интервально стохастических температурных распределений реализованы в программном комплексе STF-ElectronMod и применяются для теплового проектирования сложных электронных систем. Программный комплекс предоставляет эргономичный пользовательский интерфейс, который позволяет эффективно производить оценку мест наибольшего нагрева конструкции путем визуализации результатов моделирования в виде полей МО и СКО, а также построением гистограмм интервальных распределений

температур. Как показывает практика моделирования электронного модуля, заложенные в программный комплекс методы позволяют моделировать трехмерные температурные поля электронного модуля с высокой эффективностью.

**Литература**

1. Исаев И.П., Иньков Ю.М., Маричев М.А. Вероятностные методы расчета полупроводниковых преобразователей. М.: Энергоиздат, 1983. 96 с.
2. Чеканов А.Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2012. 440 с.
3. Keller C.J., Antonetti V.W. Statistical thermal design for computer electronics. Electronic Packaging and Production, vol. 19, no. 3, pp. 55–62.
4. Мадера А.Г., Кандалов П.И. Анализ интервально стохастических температурных полей технических систем // Программные продукты и системы. 2014. № 4. С. 41–45.
5. Кандалов П.И., Мадера А.Г. Моделирование температурных полей технических систем в условиях интервально стохастической неопределенности // VI Рос. нап. конф. по теплообмену: сб. тр. М.: Изд-во МЭИ, 2014. Т. 1. С. 191–192.

6. Решетников В.Н. Космические телекоммуникации. Системы спутниковой связи и навигации. СПб: Ленинградское изд-во, 2010. 134 с.
7. Кандалов П.И., Мадера А.Г. Прогр. для ЭВМ: Simulation of Temperature Fields of Electronic Modules 2014 (STF-ElectronMod 2014); Свид. 2015619835. Рос. Федерация. № 2015613488; заявл. 28.04.15; опубл. 15.09.15.
8. Кандалов П.И., Мадера А.Г. Моделирование температурных полей в многослойных структурах // Программные про-

дукты и системы. 2008. № 4. С. 46 – 49.

9. Мадера А.Г., Кандалов П.И. Матрично-топологический метод математического и компьютерного моделирования температурных полей в электронных модулях: программный комплекс STF-ElectronMod // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 160–164.

10. Мадера А.Г. Моделирование теплообмена в технических системах. М.: Изд-во НФ «Первая исслед. лаб. им. акад. В.А. Мельникова», 2005. 208 с.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.116.171-175

Received 16.09.16

2016, vol. 29, no. 4, pp. 171–175

## SOFTWARE MODELING OF STOCHASTIC TEMPERATURE FIELDS IN STF-ELECTRON MOD TECHNICAL SYSTEMS

*P.I. Kandalov*<sup>1</sup>, Research Associate, *petrki87@gmail.ru*

<sup>1</sup>Center of Visualization and Satellite Information Technologies SRISA, Nakhimovsky Ave. 36/1, Moscow, 117218, Russian Federation

**Abstract.** The article presents the software package “STF-ElectronMod” to simulate a steady-state stochastic 3D temperature fields in technical systems Experience has shown that the actual temperature fields of technical systems have uncertainty interval nature. This is due to the interval factors determining the thermal regime of the technical system. These factors include: the design parameters of technical systems with statistical technological manufacture spread; factors arising in the operation of technical systems ( power consumption, heat flows, internal environment parameters); environmental factors (temperature, medium, refrigerant, flows velocity, etc.). However, now modeling of temperature fields of technical systems is being conducted under the assumption of determinacy. This means that all thermal condition parameters are considered accurately known This article describes a structure of the designed software system STF-ElectronMod for modelling of interval stochastic temperature fields in technical systems under uncertainty of input determining data. The method and algorithm are based on the author's developments according to a matrix-topological method, the software complex three-dimensional deterministic modeling of temperature fields of technical systems, as well as Monte-Carlo method. The application of the method and algorithm for modeling interval stochastic temperature fields is considered on the example of a complex electronic system.

**Keywords:** software, mathematical modeling, temperature fields, stochastic, interval.

### References

1. Isaev I.P., Inkov Yu.M., Marichev M.A. *Veroyatnostnye metody rascheta poluprovodnikovykh preobrazovateley* [Probabilistic Methods of Calculating Semiconductor Converters]. Moscow, Energoizdat Publ., 1983, 96 p.
2. Chekanov A.N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoy apparatury* [Calculating and Reliability Control of Electronic Equipment]. Study guide. Moscow, KNORUS Publ., 2012, 440 p.
3. Keller C.J., Antonetti V.W. Statistical thermal design for computer electronics. *Electronic Packaging and Production*. 1979, vol. 19, no. 3, pp. 55–62.
4. Madera A.G., Kandalov P.I. The analysis of interval stochastic temperature fields of technical systems. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2014, no. 4, pp. 41–45 (in Russ.).
5. Kandalov P.I., Madera A.G. Modeling temperature fields of technical systems under interval stochastic uncertainty. *6 Ross. nats. konf. po teploobmenu* [Proc. 6th Russian National Conf. on Heat Exchange]. Moscow, MEI Publ., 2006, vol. 1, pp. 191–192 (in Russ.).
6. Reshetnikov V.N. *Kosmicheskie telekommunikatsii. Sistemy sputnikovoy svyazi i navigatsii* [Cosmic Telecommunications. Satellite Communication and Navigation Systems]. St. Petersburg, Leningradskoe izdatelstvo Publ., 2010, 132 p.
7. Kandalov P.I., Madera A.G. *Simulation of Temperature Fields of Electronic Modules 2014 (STF-ElectronMod 2014)*. Software State Registration Certificate no. 2015613488. 2015.
8. Kandalov P.I., Madera A.G. Modeling temperature fields in multi-layer structures. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2008, no. 4, pp. 46–49 (in Russ.).
9. Madera A.G., Kandalov P.I. Matrix-topological method for mathematical and computer modeling of temperature fields in electronic modules: software complex STF-ElectronMod. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2012, no. 4, pp. 160–164 (in Russ.).
10. Madera A.G. *Modelirovanie teploobmena v tekhnicheskikh sistemakh* [Heat Exchange Modeling in Engineering Systems]. Moscow, Pervaya issled. lab. im. ak. V.A. Melnikova Publ., 2005, 208 p.