

УДК 519.684.6 + 519.685.1 + 519.688  
DOI: 10.15827/0236-235X.119.367-372

Дата подачи статьи: 03.04.17  
2017. Т. 30. № 3. С. 367–372

## **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕПЛОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ: ТРЕБОВАНИЯ К АРХИТЕКТУРЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ВОЗМОЖНОСТЯМ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*А.Г. Мадера, д.т.н., профессор, зав. отделом, agmprof@mail.ru;*

*В.Н. Решетников, д.ф.-м.н., профессор, vrn\_@mail.ru*

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

Рассмотрены концепции математического и компьютерного моделирования, положенные в основу разработки и создания многофункционального программного комплекса для теплового проектирования сложных электронных систем. Показаны принципиальные недостатки зарубежных программных комплексов теплового проектирования, которые не позволяют использовать их в практике проектирования и создания конкурентоспособных электронных систем.

В статье обоснованы требования к многофункциональному программному комплексу для адекватного проектирования тепловых процессов и температурных распределений в электронных системах в условиях функционирования и эксплуатации, приближенных к реальным, а именно: программный комплекс должен обеспечивать возможность моделировать тепловые процессы в электронных системах, являющиеся нелинейными, нестационарными, трехмерными, интервально-стохастическими, а также учитывать влияние тепловой обратной связи, особенности конструкции и монтажа элементов в электронной системе, воздействие дестабилизирующих механических, климатических и радиационных факторов.

Архитектура многофункционального программного комплекса должна включать высокоэффективное математическое вычислительное ядро, развитую сервисную пользовательскую оболочку, отвечающую современным требованиям к сложным программным комплексам и системам. Сервисная оболочка, в свою очередь, должна обеспечивать визуальную, наглядную и удобную для восприятия форму задания исходных данных в виде цветных изображений температурных распределений и других тепловых характеристик на различных иерархических уровнях.

Программный комплекс реализуется в среде Microsoft Visual Studio, обеспечивающей объектно-ориентированный подход, на языке высокого уровня C#, под управлением семейства операционных систем Microsoft Windows. Модульность архитектуры позволяет эффективно расширять возможности и модернизацию программного комплекса.

**Ключевые слова:** программный комплекс, электронная система, тепловая модель, математическая модель, температурное распределение, стохастический, тепловая обратная связь, дестабилизирующие факторы.

Практика создания *электронных систем* (ЭлС), предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия тепловых, механических, вибрационных, химических, радиационных и космических факторов и экстремальных параметров окружающей среды, предъявляет жесткие требования к системам автоматизированного проектирования ЭлС по всем видам дестабилизирующих воздействий. Тенденция к ужесточению и повышению требований к системам автоматизированного проектирования ЭлС и элементов ЭлС диктует, в свою очередь, повышение как уровня адекватности математического и компьютерного моделирования ЭлС, так и многофункциональности проектирования. Разработка *многофункционального программного комплекса* (МФПК) автоматизированного проектирования ЭлС является критически важной для создания новых конкурентоспособных ЭлС. При этом создание отечественных МФПК для проектирования ЭлС особенно актуально на современном этапе, поскольку обеспечивает решение важнейшей задачи по импортозамещению и импортобезопасности ПО.

Среди дестабилизирующих воздействий ЭлС одним из наиболее важных и значительных является тепловое воздействие, поскольку большая часть мощности (до 98 %), потребляемой в про-

цессе функционирования ЭлС, необратимо диссипируется в теплоту, приводящую к саморазогреву элементов и всей ЭлС в целом. В силу значительной зависимости электрических параметров элементов ЭлС от температуры одновременное воздействие как саморазогрева элементов ЭлС, так и повышенных температур окружающей среды приводит к высоким уровням температуры в элементах и к таким нежелательным последствиям, как выход характеристик ЭлС за пределы допустимых значений, потеря работоспособности, снижение быстродействия, надежности, помехозащищенности, невыполнение поставленной задачи. Возникающие в ЭлС температурные распределения обуславливают появление множества других эффектов различной физической природы, например, возникновение термомеханических напряжений в конструкции ЭлС, приводящих к короблению, деформации, отслаиванию конструктивных элементов ЭлС, например, к отрыву шариковых выводов в корпусах BGA, короблению и отслаиванию слоев и токоведущих линий в слоях многослойной печатной платы, деформированию конструктивных элементов крепления и монтажа и пр. [1–3].

Таким образом, тепловые воздействия при функционировании ЭлС являются решающими ограничительными факторами на пути создания

конкурентоспособных ЭлС, а неадекватное тепловое проектирование ЭлС приводит к ошибкам при разработке ЭлС, обуславливая несоответствие параметров и характеристик ЭлС требуемым в ТЗ значениям. Поэтому важнейшей задачей при создании новых конкурентоспособных ЭлС, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям, является разработка МФПК для *теплового проектирования ЭлС* (ТП ЭлС).

МФПК ТП ЭлС предназначен для обеспечения разработчиков элементов и ЭлС в целом высокоэффективным, адекватным реальности, с развитой пользовательской оболочкой инструментом, предназначенным для проведения всестороннего многовариантного математического и компьютерного моделирования тепловых процессов и температурных распределений в ЭлС.

Необходимо отметить, что существующие в настоящее время в зарубежных компаниях *программные комплексы* (ПК) для тепловых расчетов ЭлС (Beta Soft, TGM Thermal Analysis & Electronic System Cooling, SINDA, Ansys, FLOTHERM и другие, включая отдельные тепловые модули, встроенные в различные CAD/CAM/CAE) имеют следующие серьезные системные недостатки, не позволяющие использовать их в практике ТП ЭлС, в том числе и отечественной.

- Методы и модели, как и математические и компьютерные вычислительные алгоритмы, заложенные в зарубежных ПК, непользователю неизвестны и не раскрываются, что не позволяет судить об их адекватности, валидности и релевантности. Отсутствие информации об области и диапазоне применимости моделей, заложенных в конкретном ПК, сведений о математических моделях, методах решения уравнений математических моделей, используемых в данном ПК, не позволяет разработчикам новой техники доверять получаемым в ПК результатам и выводам и ориентироваться на них при создании новых ЭлС.

- Содержащиеся по умолчанию в зарубежных ПК физические и конструкционные параметры и характеристики материалов, элементной базы, конструкций ЭлС полностью привязаны к зарубежным технологиям, конкретным компаниям, конструкциям и принятым стандартам, которые неприменимы к отечественным материалам, технологиям, конструкциям и стандартам.

- Библиотеки элементов (микросхем, электро- и радиоэлементов), «вшитые» в структуру зарубежных ПК, недоступны для анализа специалистам по теплообмену и разработчикам элементной базы ЭлС, а их существенное отличие от отечественной номенклатуры элементов ЭлС делает их неприменимыми в отечественной практике теплового проектирования.

- Многофункциональность зарубежных ПК во многом ограничена вопреки декларируемым в них возможностям и зачастую не соответствует ре-

альной практике при попытках их применения к расчетам тепловых процессов в конкретных конструкциях ЭлС. Так, в зарубежных ПК отсутствует такая важная для адекватного теплового анализа ЭлС возможность, как моделирование температурных распределений в многослойной печатной плате ЭМ, в которой на сегодняшний день может насчитываться более нескольких десятков разнородных слоев. Например, в ПК Beta Soft количество слоев в печатной плате не превосходит трех, а в других зарубежных ПК имеется возможность задания только одного усредненного слоя, причем метод приведения множества слоев к одному не приводится.

- В зарубежных ПК отсутствуют (вопреки декларациям) принципиально важные возможности, которые необходимо учитывать при тепловом проектировании ЭлС, а именно моделирование

- температурных распределений в ЭлС при интервально-стохастической неопределенности тепловых, электрических и конструктивных параметров и характеристик ЭлС и стохастической неопределенности условий реальной окружающей среды;

- тепловой обратной связи, особенно сильно проявляющейся в элементах ЭлС с повышенной мощностью потребления, дестабилизирующих воздействиях и экстремальных окружающих условиях.

Приведенные системные недостатки зарубежных ПК не позволяют рекомендовать их к безусловному применению в практике теплового проектирования ЭлС и их элементов, что наряду с решением проблемы импортозамещения ПО еще больше повышает актуальность разработки и создания отечественных МФПК для теплового проектирования ЭлС.

#### **Требования к функциональным возможностям моделирования МФПК ТП ЭлС**

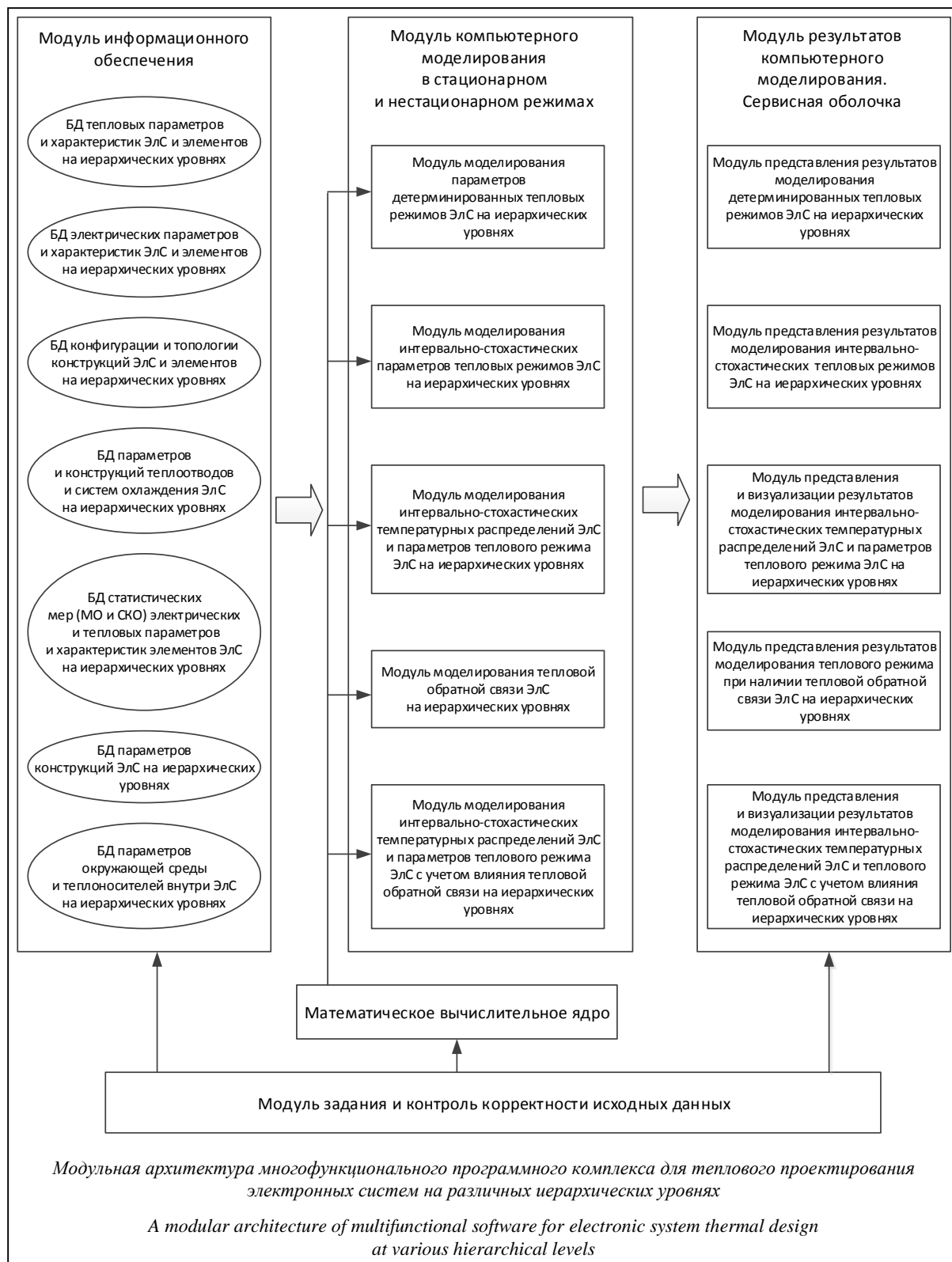
Разрабатываемый МФПК ТП ЭлС должен удовлетворять определенным требованиям и обладать следующими функциональными возможностями [4] (см. рисунок).

- Моделировать тепловые режимы и температурные распределения в ЭлС на различных иерархических уровнях, содержащих

- элементы ЭлС (микросхемы, электро- и радиоэлементы) – 1-й уровень;

- электронные модули, включающие многослойную печатную плату, установленные на ней микросхемы, электро- и радиоэлементы, теплоотводы, систему охлаждения электронных модулей, конструктивные элементы крепления и монтажа электронных модулей – 2-й уровень;

- панель (блок, субблок и т.п. по различной терминологии), объединяющая несколько электронных модулей вместе с конструктивными эле-



ментами крепления и монтажа, систему интерфейса, теплопроводы и систему охлаждения панели – 3-й уровень;

– стойку, в состав которой входят несколько панелей, элементы конструкции крепления и монтажа панелей в стойке, система интерфейса и охлаждения стойки – 4-й уровень.

При этом в МФПК ТП ЭЛС должна быть обеспечена возможность моделирования всех конструктивных и физических особенностей элементов ЭЛС и всей ЭЛС в целом при их изготовлении, установке, монтаже и эксплуатации во всем диапазоне дестабилизирующих воздействующих факторов. Принципиально важной для адекватного моде-

лирования тепловых процессов в многослойных печатных платах является возможность учета всего множества разнородных в теплофизическом отношении слоев платы.

- Учитывать нелинейный, динамический и трехмерный характер тепловых процессов [3, 5, 6], развивающихся в ЭлС, сложный характер теплообмена между элементами ЭлС, а также разнородность конструктивных и теплофизических параметров элементов на различных иерархических уровнях ЭлС.

- Обладать возможностью моделирования тепловых режимов и процессов в ЭлС с учетом тепловой обратной связи, заключающейся во взаимовлиянии и взаимодействии электрических и тепловых процессов на различных иерархических уровнях ЭлС между собой, которая возникает в силу значительной зависимости электрических параметров и потребляемой элементами мощности [7] от температуры, а температуры элементов – от изменения мощностей потребления элементов [8–12]. Причем тепловая обратная связь в ЭлС может быть как положительной, так и отрицательной. В первом случае, если не принять специальные меры по охлаждению ЭлС, будет наблюдаться лавинообразный рост мощности потребления и температуры, ведущий к перегоранию элемента, во втором – снижение мощности потребления с ростом температуры при одновременном падении быстродействия.

- Учитывать интервально-стохастический характер тепловых процессов в ЭлС, который обуславливается статистическим технологическим разбросом тепловых, электрических и конструктивных параметров ЭлС, а также случайным характером параметров окружающей среды и/или теплоносителей (температуры, скорости и направления движения среды, влажности, плотности) в системе охлаждения ЭлС [5, 6, 13] на различных иерархических уровнях ЭлС.

- Моделировать тепловой режим ЭлС при наличии взаимно-обуславливающих эффектов, таких как тепловая обратная связь, интервально-стохастический разброс тепловых и электрических параметров ЭлС, воздействие дестабилизирующих механических, климатических и радиационных факторов.

- Учитывать влияние внешних тепловых воздействий на тепловые режимы ЭлС со стороны окружающих технических систем [2, 14].

- Архитектура МФПК ТП ЭлС должна содержать высокоэффективное математическое вычислительное ядро, а также развитую сервисную пользовательскую оболочку, отвечающую современным требованиям к сложным программным комплексам и системам [15–18]. Сервисная оболочка должна обеспечивать визуальную, наглядную и удобную для восприятия форму задания исходных данных, представления полученных результатов и визуализацию результатов в виде

цветных изображений изотерм температурных распределений и других тепловых характеристик ЭлС на различных иерархических уровнях.

Разрабатываемый в настоящее время в ФНЦ НИИСИ РАН программный комплекс МФПК ТП ЭлС реализуется в среде Microsoft Visual Studio, обеспечивающей объектно-ориентированный подход на языке высокого уровня C#, под управлением семейства операционных систем Microsoft Windows. Применение объектно-ориентированного подхода обеспечивает МФПК высокую степень модульности благодаря таким свойствам, как инкапсуляция, полиморфизм и позднее связывание. Модульность архитектуры МФПК позволяет эффективно расширять возможности и модернизировать программный комплекс, оказывая минимальное влияние на работоспособность системы в целом, что соответствует основным базовым принципам построения современных программных комплексов и обеспечивает создание надежного и эффективного комплекса моделирования.

#### Тепловые и математические модели тепловых процессов в ЭлС

Математические и тепловые модели, составляющие вычислительное ядро программного комплекса МФПК ТП ЭлС, должны в общем случае обладать достаточной общностью и сложностью, чтобы обеспечить адекватное численное моделирование тепловых процессов и тепловых режимов в сложных конструкциях ЭлС на всех иерархических уровнях с учетом всех сформулированных выше требований.

В силу чрезвычайной сложности поставленной задачи в качестве главного принципа моделирования тепловых процессов в МФПК ТП ЭлС авторами принят макроуровень моделирования [5, 18]. На макроуровне моделирования тепловые модели конструкции на каждом иерархическом уровне ЭлС представляются в виде направленных графов, содержащих вершины – температуры элементов ЭлС, и ветви – тепловые проводимости, моделирующие теплообмен кондукцией, конвекцией и излучением, и теплоемкости. Математические модели формируются на каждом иерархическом уровне в виде системы компонентных уравнений элементов ЭлС и системы матрично-топологических уравнений, описывающих структуру связей элементов в ЭлС.

Математическая модель на каждом иерархическом уровне, описывающая нелинейные, стохастические, нестационарные тепловые процессы в ЭлС и ее элементах, формируется для графовой тепловой модели в виде матрично-топологической системы нестационарных, нелинейных, интервально-стохастических уравнений в обыкновенных производных для каждого элементарного события  $\omega \in \Omega$  из пространства элементарных событий  $\Omega$  [13]:

$$C(\omega) \frac{dT(t, \omega)}{dt} + AG(T, \omega)A^T T(t, \omega) = \\ = J(T, t, \omega) + AG(T, t, \omega)T_a(t, \omega),$$

$$T(t, \omega) = T(0, \omega), (t, \omega) \in [0, \tau] \times \Omega,$$

где  $T = T(t, \omega)$  – вектор нестационарных интервально-стохастических температур в узлах графа тепловой модели ЭлС;  $C(\omega)$  – интервально-стохастическая матрица тепловых емкостей;  $G(T, \omega)$  – интервально-стохастическая матрица тепловых проводимостей ветвей графа тепловой модели, нелинейно зависящая от температур в узлах графа;  $J(T, t, \omega)$  – вектор нестационарных интервально-стохастических независимых мощностей тепловыделений в элементах ЭлС, нелинейно зависящих от температур в узлах графа;  $T_a(t, \omega)$  – вектор нестационарных интервально-стохастических независимых температур среды;  $A$  – матрица инцидентий графа,  $A^T$  – ее транспонированная матрица;  $T(0, \omega)$  – вектор начальных интервально-стохастических температур в узлах графа;  $\tau$  – рассматриваемый период времени;  $\omega \in \Omega$ ,  $(\Omega, U, P)$  – вероятностное пространство с  $\sigma$ -алгеброй подмножеств  $\Omega$  и вероятностью  $P$  на  $U$ .

Тепловые модели отдельных элементов конструкции ЭлС (многослойных печатных плат, теплопроводов и др.), для которых принципиальным является знание пространственных распределений температуры, также включаются в математическую и графовую тепловые модели ЭлС. В этом случае к обобщенной математической модели ЭлС (см. выше) добавляются математические модели на микроуровне [5], описывающие физические состояния и процессы в сплошных средах, аппаратом которых служат уравнения математической физики в частных производных – уравнения теплопроводности, гидро- и газовой динамики, полей электрического потенциала, диффузии носителей и пр. [19–21]. Тепловая обратная связь, моделирующая взаимодействие и взаимное влияние между собой теплового и электрического режимов ЭлС, учитывается в математической модели ЭлС в виде нелинейных зависимостей мощностей тепловыделений в элементах ЭлС, входящих в вектор  $J(T, t, \omega)$ , от температур элементов в векторе  $T = T(t, \omega)$  в узлах графа тепловой модели.

### Заключение

Разработанные концепции ТП ЭлС, математические и тепловые модели, положенные в основу МФПК ТП ЭлС – многофункционального программного комплекса для ТП ЭлС, позволяют создавать на практике методы математического и компьютерного моделирования сложных тепловых процессов в ЭлС и в их элементах, с помощью которых осуществляется полный цикл ТП сложных ЭлС различного назначения. Тепловая и математическая модели, описывающие тепловые процессы на различных иерархических уровнях ЭлС, учиты-

вают различные реальные аспекты тепловых процессов, с которыми сталкивается разработчик при создании и проектировании ЭлС: нелинейный, динамический, стохастический и нестационарный характер температурных распределений в элементах ЭлС и во всей ЭлС в целом; интервально-стохастический разброс электрических и тепловых параметров элементов ЭлС; воздействие тепловой обратной связи на тепловые и электрические режимы ЭлС; стохастический характер параметров окружающей среды. Сформулированные в статье основные требования к архитектуре и функциональным возможностям моделирования в МФПК ТП ЭлС позволяют создать высокоэффективный многофункциональный программный комплекс для ТП ЭлС и элементов ЭлС на всех иерархических уровнях.

### Литература

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры; [под общ. ред. В.А. Шахнова]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 568 с.
2. Чеканов А.Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. М.: КНОРУС, 2012. 440 с.
3. Ellison G.N. Thermal computations for electronics. Conductive, radiative, and convective air cooling. NY, CRC Press, 2011, 416 p.
4. Мадера А.Г. Концепция математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в электронных системах // Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 79–86.
5. Мадера А.Г. Моделирование теплообмена в технических системах. М.: Науч. фонд «Первая исслед. лаборатория», 2005. 208 с.
6. Мадера А.Г., Кандалов П.И. Математическое моделирование интервально-стохастических тепловых процессов в технических системах при интервальной неопределенности определяющих параметров // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 3. С. 501–520.
7. Бобков Г.Н., Мадера А.Г. Энергетические затраты, быстроедействие и проблема тепловода в микропроцессорах // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 29–35.
8. Camarchia V., Capuleti F., Pirola M., Guettieri S.D.G., Ghione G. Self-consistent electrothermal modeling of class A, AB, and B power GaN HEMTs under modulated RF excitation. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2007, vol. 55, no. 9, pp. 1824–1831.
9. Kuuse M., Loikkanen M., Bognar Gy. Theoretical investigation of thermal feedback effects in low power circuits. Therminec-2005, September, Belgirate, Italy, 2005.
10. Keller C.J., Antonetti V.W. Statistical thermal design for computer electronics. Electronic Packaging and Production, 1979, vol. 19, no. 3, pp. 55–62.
11. Rinaldi N., D'Alessandro V. Theory of electrothermal behavior of bipolar transistors: part II-two-finger devices. IEEE Transactions Electron Devices, 2005, vol. 52, no. 9, pp. 2022–2033.
12. Mueller O. Internal thermal feedback in four-poles especially in transistors. Proc. of the IEEE, 1964, vol. 52, pp. 924–930.
13. Madera A.G. Simulation of stochastic heat conduction processes. Intern. Jour. of Heat and Mass Transfer, 1994, vol. 37, no. 16, pp. 2571–2577.
14. Решетников В.Н. Космические телекоммуникации. Системы спутниковой связи и навигации. СПб: Ленинград. изд-во, 2010. 132 с.
15. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб: Питер, 2004. 560 с.
16. Кандалов П.И. Программный комплекс моделирования стохастических температурных полей в технических системах STF-ElectronMod // Программные продукты и системы. 2016. № 4. С. 171–175.
17. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.

18. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 430 с.  
 19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1999. 735 с.  
 20. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения: теория и ее

- приложения к акустике, гидродинамике и радиофизике. М.: Физматлит, 2008. Т. 1–2.  
 21. Алиев А.В., Мищенко О.В. Математическое моделирование в технике. Ижевск.: Изд-во Ин-та комп. исслед., 2012. 456 с.

Software &amp; Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.119.367-372

Received 03.04.17

2017, vol. 30, no. 3, pp. 367–372

### A SOFTWARE COMPLEX FOR ELECTRONIC SYSTEM THERMAL DESIGN: REQUIREMENTS FOR ARCHITECTURE AND FUNCTIONAL POSSIBILITIES OF MODELING

A.G. Madera<sup>1</sup>, Dr.Sci (Engineering), Professor, agmprof@mail.ru

V.N. Reshetnikov<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, rvn\_@mail.ru

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

**Abstract.** The paper considers fundamental concepts of mathematical and computer modeling, which are the basis of the development and creation of a multifunctional software package for thermal design of complex electronic systems. It shows the basic flaws of foreign thermal design software systems, which are not applicable in practice of designing and creating competitive electronic systems.

The article establishes the requirements for a multifunctional software package for adequate design of thermal processes and temperature distributions in real electronic systems under real conditions of operation and functioning. Namely, the software package should provide the ability to model thermal processes in electronic systems that are nonlinear, nonstationary, three-dimensional, interval stochastic, as well as take into account the influence of thermal feedback, design and installation of elements in electronic systems, effects of destabilizing mechanical, climatic and radiation factors.

The architecture of the multifunctional software package should contain a highly efficient mathematical computing core, a developed service user interface that meets modern requirements for complex software packages and systems. The service shell, in turn, should provide a visual, intuitive and easy-to-understand form of setting initial data in the form of color images of temperature distributions and other thermal characteristics at different hierarchical levels.

The software package is implemented in Microsoft Visual Studio that provides an object-oriented approach in the high-level language C# powered by Microsoft Windows operating system family. Modular architecture allows expanding the possibilities and upgrading the software complex effectively.

**Keywords:** software package, electronic system, thermal model, mathematical model, temperature distribution, stochastic, thermal feedback, destabilizing factors.

#### References

1. *Konstruktorsko-tehnologicheskoe proektirovanie elektronnoy apparatury* [Electronics Design and Engineering]. V.A. Shakhnov (Ed.). Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005, 568 p.
2. Chekanov A.N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoy apparatury* [Electronics Calculations and Reliability Control]. Moscow, KNORUS Publ., 2012, 440 p.
3. Ellison G.N. *Thermal computations for electronics. Conductive, radiative, and convective air cooling*. NY, CRC Press, 2011, 416 p.
4. Madera A.G. The concept of mathematical and computer simulation of thermal processes in electronic systems. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2015, no. 4 (112), pp. 79–86 (in Russ.).
5. Madera A.G. *Modelirovanie teploobmena v tekhnicheskikh sistemakh* [Heat Exchange Simulation in Engineering Systems]. Moscow, Nauch. fond "Pervaya issled. lab.", 2005, 208 p.
6. Madera A.G., Kandalov P.I. Mathematical modeling of the interval stochastic thermal processes in technical systems at the interval indeterminacy of the determinative parameters. *Computer Research and Modeling*. 2016, vol. 42, no. 3, pp. 257–268.
7. Bobkov G.N., Madera A.G. Energy costs, speed and heat sink in microprocessors. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2013, no. 4, pp. 29–35 (in Russ.).
8. Camarchia V., Capuleti F., Pirola M., Guettieri S.D.G., Ghione G. Self-Consistent Electrothermal Modeling of Class A, AB, and B Power GaN HEMTs Under Modulated RF Excitation. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2007, vol. 55, no. 9, pp. 1824–1831.
9. Kuuse M., Loikkanen M., Bognar Gy. Theoretical investigation of thermal feedback effects in low power circuits. *Therminic-2005*. Belgirate, Italy, 2005.
10. Keller C.J., Antonetti V.W. Statistical thermal design for computer electronics. *Electronic Packaging and Production*. 1979, vol. 19, no. 3, pp. 55–62.
11. Rinaldi N., D'Alessandro V. Theory of electrothermal behavior of bipolar transistors: part II-two-finger devices. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2005, vol. 52, no. 9, pp. 2022–2033.
12. Mueller O. Internal thermal feedback in four-poles especially in transistors. *Proc. of the IEEE*. 1964, vol. 52 (8), pp. 924–930.
13. Madera A.G. Simulation of stochastic heat conduction processes. *Int. Jour. of Heat and Mass Transfer*. 1994, vol. 37, no. 16, pp. 2571–2577.
14. Reshetnikov V.N. *Kosmicheskie telekommunikatsii (sistemy sputnikovoy svyazi i navigatsii)* [Space Telecommunications (Satellite Communication and Navigation Systems)]. St. Petersburg, 2010, 132 p.
15. Li K. *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)* [CAD Basics (CAD/CAM/CAE)]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004.
16. Kandalov P.I. Software modeling of stochastic temperature fields in stf-electron mod technical systems. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2016, no. 4 (29), pp. 171–175 (in Russ.).
17. Koryachko V.P., Kureychik V.M., Norenkov I.P. *Teoreticheskie osnovy SAPR* [CAD Theoretical Basis]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987.
18. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [The Basis of Automated Design Engineering]. 4th ed., Moscow, Bauman MSTU, 2009.
19. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow Nauka Publ., 1999.
20. Klyatskin V.I. *Stokhasticheskie uravneniya. Teoriya i ee prilozheniya k akustike, gidrodinamike i radiofizike* [Stochastic Equations. Theory and its Applications to Acoustics, Hydrodynamics and Radiophysics]. Moscow Fizmatlit Publ., 2008.
21. Aliiev A.V., Mishchenko O.V. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical Simulation in Engineering]. Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2012.