

Моделирование температурных полей электронных модулей в программном комплексе STF-ElectronMod

Александр Мадера, Пётр Кандалов (Москва)

В статье приведены результаты моделирования трёхмерных температурных полей электронных модулей на основе программного комплекса STF-ElectronMod. Положенный в основу моделирования матрично-топологический метод позволяет осуществлять расчёты температурных полей сложных модулей с учётом реальных конструктивных особенностей и технологий монтажа компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Разработки современных электронных систем бортового и наземного назначения – микроэлектронных изделий, компьютеров и систем управления – постоянно сталкиваются с проблемой охлаждения и отвода тепла. Это обусловлено зависимостью от температуры электрических, механических и надёжных характеристик электронных компонентов (микросхем, МС) и электрорадиоэлементов (ЭРЭ), претерпевающих существенные изменения при возникновении температурного поля в системе.

Температурные изменения параметров электронных систем могут превышать допустимые значения, приводя к неправильному функционированию, снижению надёжности, быстродействия и помехоустойчивости, возникновению термомеханических напряжений и деформаций. Сложности с отводом тепла, возникающие при миниатюризации электронных систем, усугубляются ростом рабочей температуры и плотности мощности в единице объёма. Поэтому эффективность охлаждения во многом определяет конкурентоспособность электронных систем.

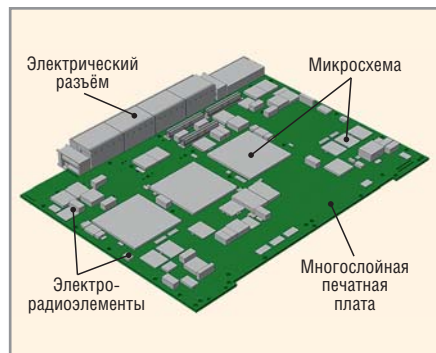


Рис. 1. Типичная конструкция ЭМ

Создание современного электронного оборудования невозможно без компьютерных технологий проектирования. Наряду со схематехническим проектированием, трассировкой сигнальных проводников в многослойных печатных платах (МПП), моделированием высокочастотных эффектов в линиях связи, проектированием конструкции и топологии МС, необходимо осуществлять *тепловое проектирование* электронной системы и её элементов. Поскольку температурные поля, возникающие в электронной системе в процессе её функционирования, оказывают значительное влияние практически на все характеристики, тепловое проектирование должно проводиться в итерационном режиме, одновременно с предварительной компоновкой элементов и системы в целом.

Основными задачами теплового проектирования электронных систем и её элементов являются: моделирование температурных полей; моделирование тепловых режимов системы в условиях испытаний и эксплуатации; конструкторско-технологическое обеспечение параметров тепловых режимов системы в требуемых пределах. Тепловое проектирование включает:

- проведение расчётов температурных полей в объёмах и на поверхностях конструкции электронной системы и её элементов:
 - распределений температуры в кристаллах и корпусах МС и ЭРЭ,
 - распределений тепловых потоков в системе;
- моделирование конвективного теплообмена между элементами системы и средой как внутри, так и снаружи;

- расчёты аэродинамических характеристик движения воздушной среды в системе.

Важнейшей структурной единицей электронной системы является электронный модуль (ЭМ). Он представляет собой конструктив, содержащий МПП с установленными на ней МС и ЭРЭ, включая дискретные диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, электрические разъёмы и другие навесные элементы, а также конструктивные элементы крепления, направляющие и т.п. (см. рис. 1).

С точки зрения теплового проектирования, электронный модуль характеризуется следующими особенностями: сложной трёхмерной конструкцией МПП, содержащей большое количество разнородных слоёв; трёхмерной конфигурацией ЭМ; неоднородными включениями и полостями; пространственным размещением МС и ЭРЭ на поверхностях МПП и необходимостью учёта теплопереноса по выводам корпусов МС и ЭРЭ и в зазорах между ними и МПП; сложной динамикой рассеиваемой мощности в МС; взаимодействием и взаимовлиянием элементов. Кроме того, до сих пор остаётся нерешённой проблема конвективного теплообмена ЭМ и его элементов с воздушной средой [1].

Перечисленные особенности ЭМ, пространственный характер конструкции, большое разнообразие и количество разнородных в теплофизическом отношении МС и ЭРЭ с трёхмерной конфигурацией, а также сложность протекающих в ЭМ процессов теплопереноса и теплообмена со средой, описываемых нетривиальными математическими моделями, обуславливают тот факт, что в настоящее время отсутствуют надёжные, эффективные и адекватные методы математического и компьютерного моделирования температурных трёхмерных полей электронных модулей.

Необходимо отметить, что на рынке программных комплексов, предназначенных для моделирования распределений температуры в электронной аппаратуре и ЭМ, имеется достаточное количество как зарубежных, так и отечественных предложений. Как правило, они не позволяют моделировать температурные поля ЭМ с учётом всех конструктивных и физических особенностей электронных систем, что ограничивает их использование в профессиональной практике теплового проектирования. Так, например, ни один из существующих программных комплексов не учитывает многослойный характер конструкций МПП, число слоёв в которых может достигать нескольких десятков, а разброс теплопроводностей и толщин слоёв – четырёх порядков.

В данной статье рассматриваются результаты моделирования трёхмерных температурных полей ЭМ с помощью разработанного авторами программного комплекса STF-ElectronMod (Simulation of Temperature Fields of Electronic Modules). В его основу положен матрично-топологический подход к математическому моделированию и его компьютерная реализация в STF-ElectronMod. Такой подход позволяет рассчитывать трёхмерные температурные поля в сложных конструкциях ЭМ с учётом реальных условий монтажа МС и ЭРЭ на поверхностях МПП, особенностей крепления МПП в ЭМ, блоках и панелях электронных устройств, конструкций теплоотводов и системы охлаждения ЭМ, без ограничения числа разнородных слоёв МПП.

Программный комплекс STF-ElectronMod реализован на языке Pascal для персональных и суперкомпьютеров, имеет удобный пользовательский интерфейс с развитой пользовательской оболочкой и обеспечен средствами визуализации распределений температуры ЭМ в виде цветных изотерм. Сравнение разработанного комплекса STF-ElectronMod с существующими аналогами показало его превосходство по функциональным возможностям и степени адекватности получаемых результатов моделирования. Матрично-топологический метод моделирования температурных полей электронных систем, а также программный комплекс STF-ElectronMod разрабатываются при поддержке гранта РФФИ № 12-07-00076-а.

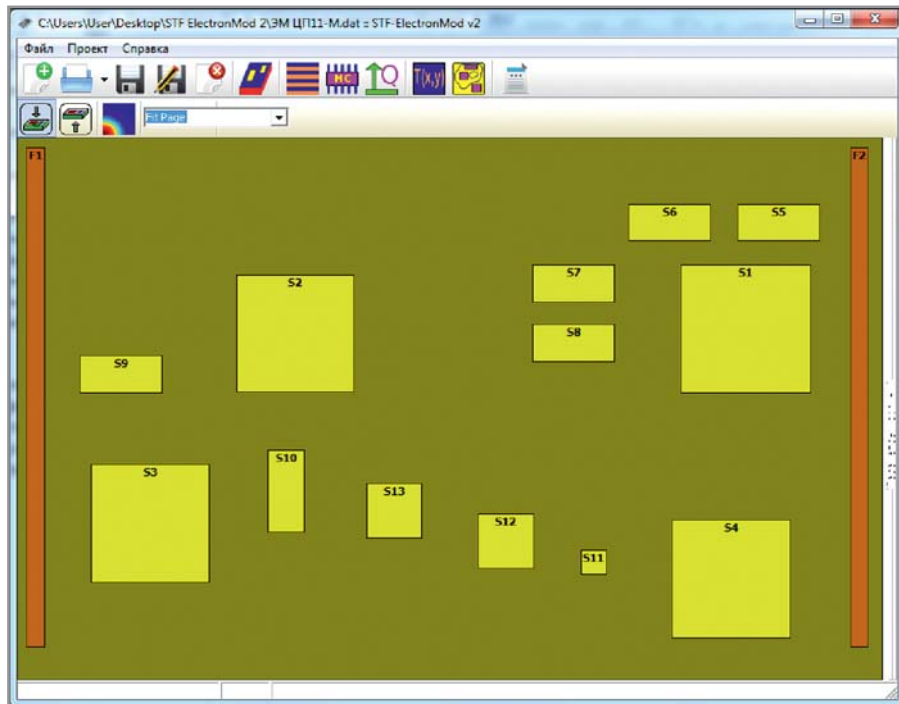


Рис. 2. Топология размещения МС на верхней поверхности ЭМ

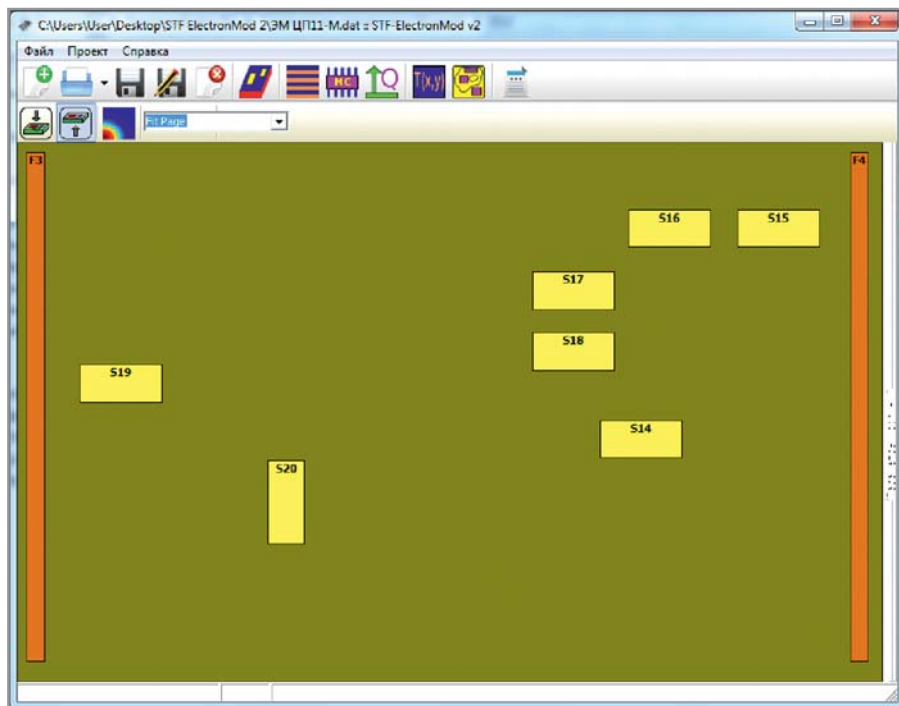


Рис. 3. Топология размещения МС на нижней поверхности ЭМ

МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЭМ

Матрично-топологический метод моделирования трёхмерных температурных полей сложных конструкций электронных модулей представляет собой систему автоматически формируемых матричных уравнений теплового баланса для тепловых моделей ЭМ и их элементов (МС и ЭРЭ) с использованием теории графов.

Тепловая модель МПП представляет собой многослойный прямоугольный

параллелепипед [2], состоящий из множества тонких разнородных в теплофизическом отношении слоёв различной толщины; на поверхностях тепловой модели МПП расположены прямоугольные площадки, соответствующие проекциям МС и ЭРЭ; с поверхностей МПП происходит конвективный теплообмен с окружающей средой.

Тепловые модели МС и ЭРЭ разделены на два вида: активные и пассивные элементы, характеризующиеся тепловыделением (МС, диоды, транзисторы,

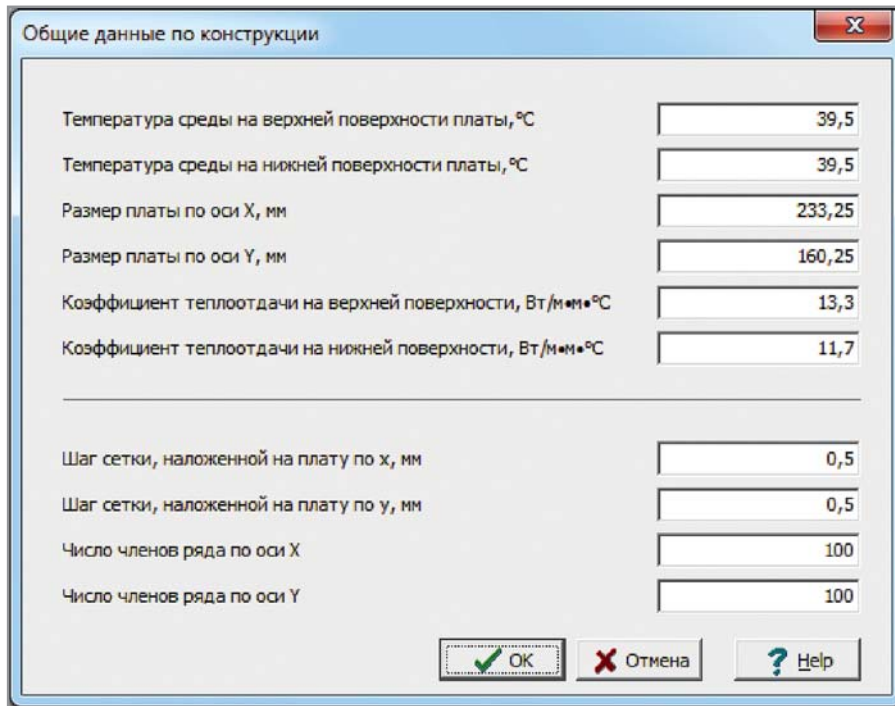


Рис. 4. Окно задания общих параметров конструкции

резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы), и механические элементы, которые не обладают собственным тепловыделением (электрические разъёмы, теплоотводы, конструктивные элементы и пр.). При тепловом моделировании активные и пассивные элементы играют роль источников тепла, а механические элементы – стоков тепла. Активные и пассивные элементы моделируются с помощью графов тепловых схем, получаемых методом электро-тепловой аналогии на макроуровне

моделирования [3]. Математическая модель активных и пассивных эле-

$$\begin{cases} T_s = R_{ss} P_s + R_{ss} \alpha_s T_s - R_{ss} \alpha_s T_{sa} - R_{sd} P_d + R_{sd} \alpha_d T_d - R_{sd} \alpha_d T_{da} + T_2(z) + T_{a1} \bar{1}_n \\ T_d = R_{ds} P_s + R_{ds} \alpha_s T_s - R_{ds} \alpha_s T_{sa} - R_{dd} P_d + R_{dd} \alpha_d T_d - R_{dd} \alpha_d T_{da} + T_2(z) + T_{a1} \bar{1}_m \\ P_s = R_1 P_{ic} - R_2 T_s + R_2 T_{sa} \\ T_d = R_d P_d + T_f \end{cases}$$

где R_{ss}, R_{dd}, R_{sd} и R_{ds} – матрицы тепловых взаимодействий между всеми источниками тепла (R_{ss}), между все-

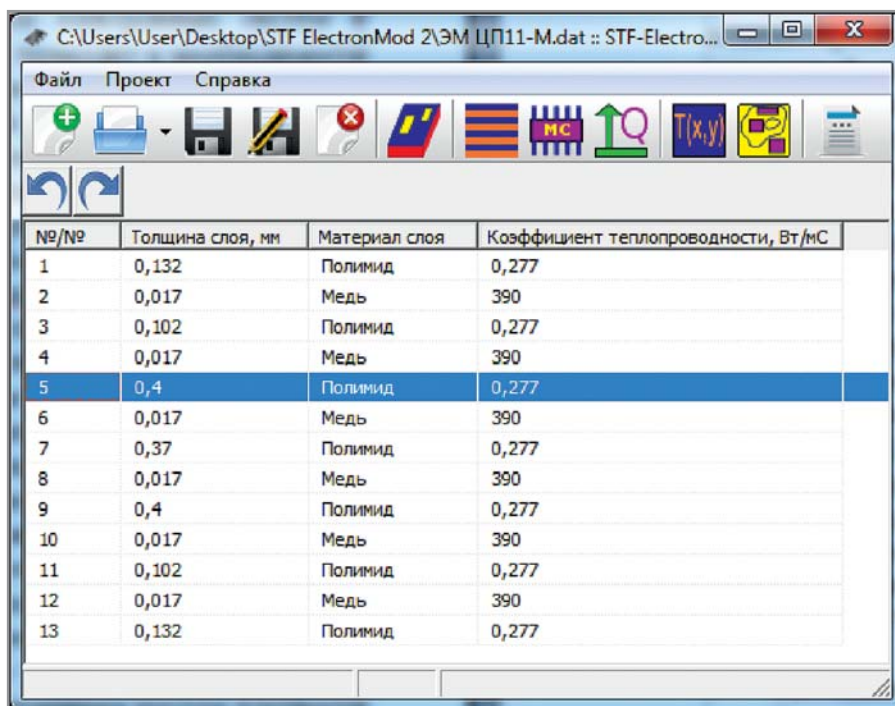


Рис. 5. Окно задания параметров слоёв МПП

ментов в матрично-векторной форме имеют вид:

$$\begin{cases} P_s = R_1 P_{ic} - R_2 T_s + R_2 T_{sa} \\ T_d = R_d P_d + T_f \end{cases}$$

где P_s, P_d, T_s, T_d – векторы мощностей и усреднённых температур активных и пассивных элементов; T_{sa}, T_{da} – векторы заданных и предварительно известных температур охлаждения МС и стоков тепла; P_{ic} – вектор мощностей, потребляемых МС; T_f – вектор конечных температур трактов стоков; R_1, R_2 – тепловые сопротивления в графе тепловой модели МС.

Матрично-топологический метод основывается на универсальной концепции коэффициентов влияния [3], принципе суперпозиции, методе двойного косинусного преобразования Фурье в конечных пределах и топологическом формировании уравнений математической модели с помощью теории графов. Матрично-топологическая модель теплопереноса в конструкции электронного модуля имеет вид:

ми источниками и стоками тепла (R_{sd}), между всеми стоками и источниками тепла (R_d) и между всеми стоками тепла (R_{dd}); α_s и α_d – матрицы коэффициентов теплоотдачи с поверхностей ЭМ в окружающую среду.

Процесс моделирования температурных полей электронных модулей в программном комплексе STF-ElectronMod осуществляется в два этапа. На первом этапе определяются все неизвестные характеристики тепловых схем элементов. К ним относятся температуры в узлах схемы и мощности в ветвях схемы. На втором этапе рассчитываются температурные поля на верхней и нижней поверхностях модуля. Решением системы уравнений математической модели являются векторы мощностей источников P_s и стоков P_d тепла тепловой модели МПП, а также значения векторов температур в любой точке конструкции и значения векторов температур T_s и T_d , усреднённых по площадям источников и стоков тепла.

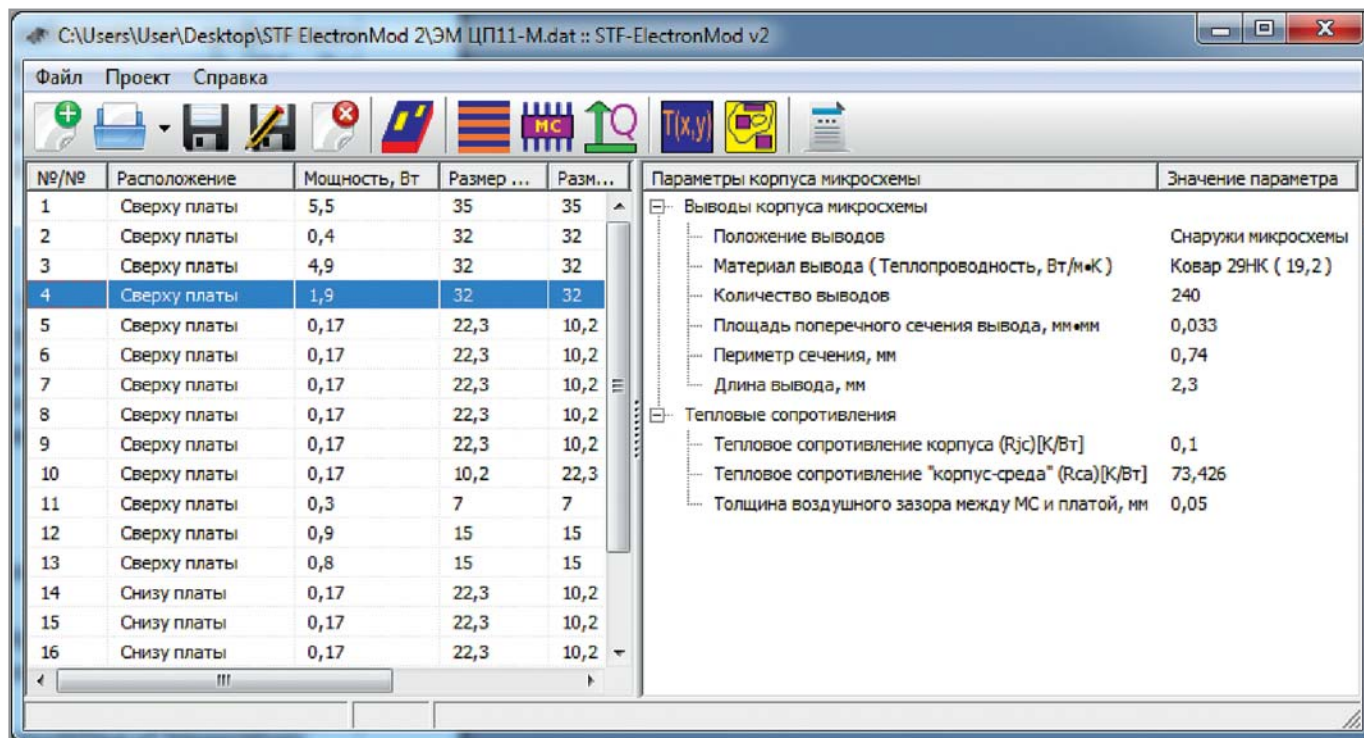


Рис. 6. Окно задания параметров МС

Для ускорения решения системы уравнений был разработан эффективный алгоритм, позволяющий рассчитывать мощности всех источников за один проход.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЭМ

Моделируемый электронный модуль содержит МПП, состоящую из 13 слоёв, на поверхностях которой установлено 20 микросхем и четыре конструктивных элемента крепления ЭМ к корпусу электронной системы (см. рис. 2 и 3).

Этапы задания исходных данных для моделирования температурных полей ЭМ в программном комплексе STF-ElectronMod приведены на рисунках 4–7. Общие параметры конструкции ЭМ, такие как температура среды, условия теплообмена и геометрические размеры конструкции МПП по осям X и Y, задаются в диалоговом окне, показанном на рисунке 4. Задание параметров слоёв (толщина, теплопроводность, последовательность) показано на рисунке 5, параметров МС – на рисунке 6 и параметров пассивных элементов – на рисунке 7.

Результаты моделирования температурных полей в виде цветных линий уровня, полученные с помощью программного комплекса STF-ElectronMod и совмещённые с топологией МС и ЭРЭ на МПП, приведены на рисунках 8 и 9.

Наибольшие значения температуры (показаны ярко-жёлтым цветом с переходом к белому), как и следовало ожидать, наблюдаются в местах расположения двух наиболее мощных микросхем (S1 и S3 на поверхности МПП) с двух сторон МПП. При этом наименьшие значения температуры (показаны тёмно-коричневым цветом) соответствуют стокам тепла, которыми являются элементы крепления МПП к корпусу электронной системы. Поля температуры, как следует из рисунков 8 и 9, довольно сильно рассеиваются от наиболее мощных микросхем к периферии, захватывая близлежащие элементы и тем самым оказывая на них тепловое влияние, приводящее к нежелательному нагреванию.

Рассеивание тепловых потоков по конструкции МПП зависит в основном от количества и толщины медных слоёв, входящих в МПП. Поэтому

на поверхности МПП за пределами зон влияния наиболее мощных МС и ЭРЭ следует располагать элементы, имеющие наибольшую чувствительность к температуре. При этом границы зон влияния для конкретной конструкции ЭМ могут быть эффективно и адекватно рассчитаны с помощью программного комплекса STF-ElectronMod.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс STF-ElectronMod успешно применяется для теплового проектирования конструкций ЭМ любой сложности, с учётом реальных особенностей конструкций МС, ЭРЭ, условий их монтажа на МПП с неограниченным числом слоёв. Особенностью программного комплекса является наличие графического редактора, упрощающего оценивание мест наибольшего нагре-

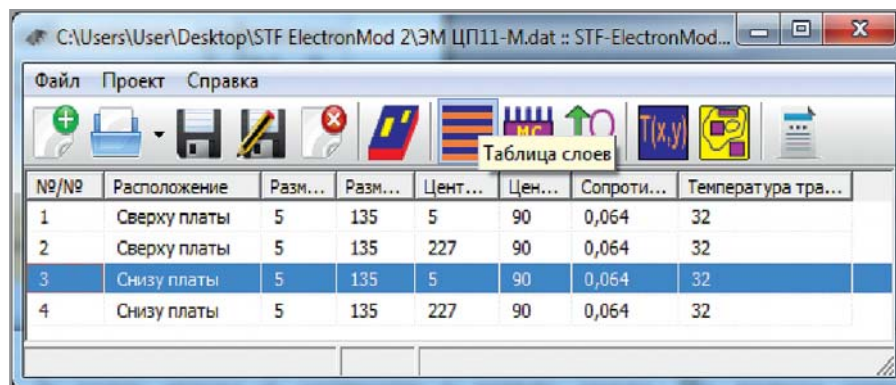


Рис. 7. Окно задания стоков тепла, расположенных на МПП

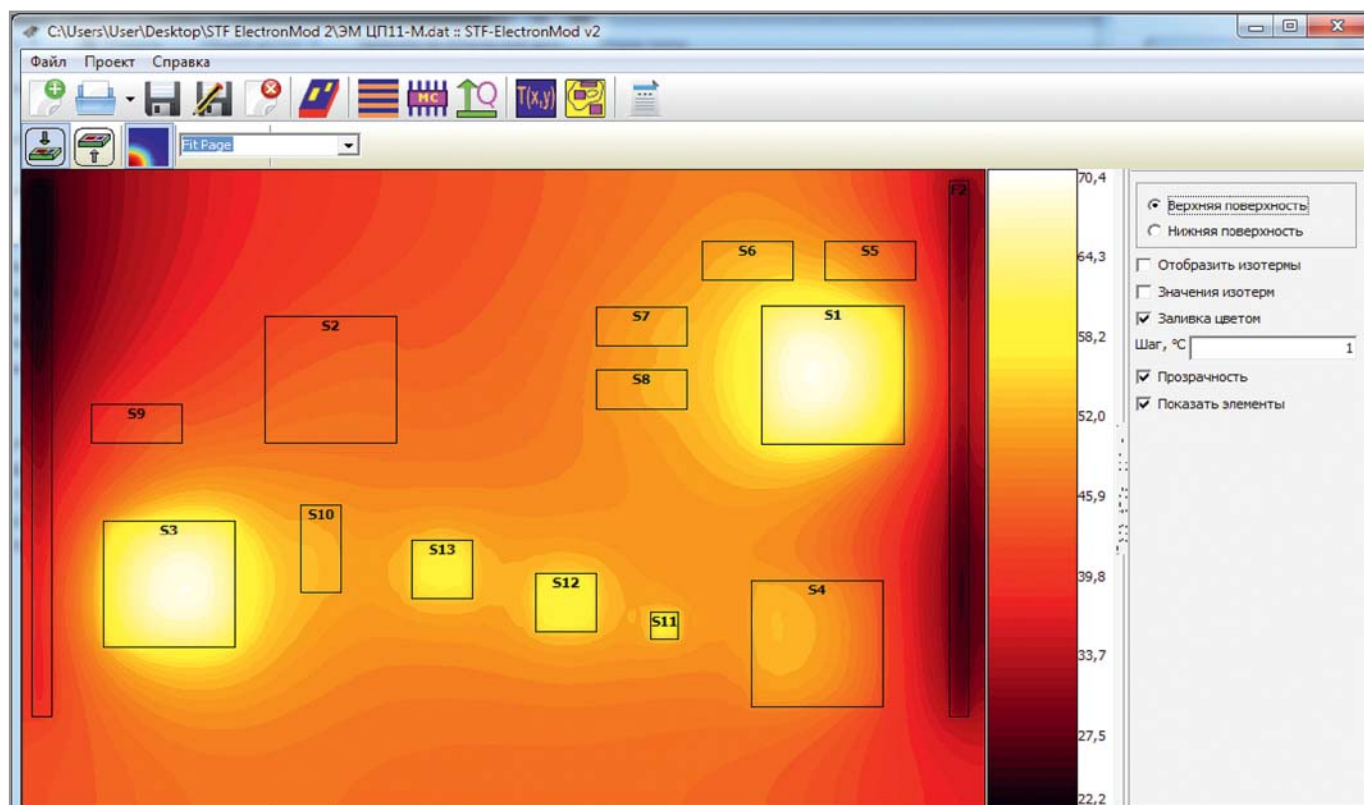


Рис. 8. Температурное поле верхней поверхности ЭМ

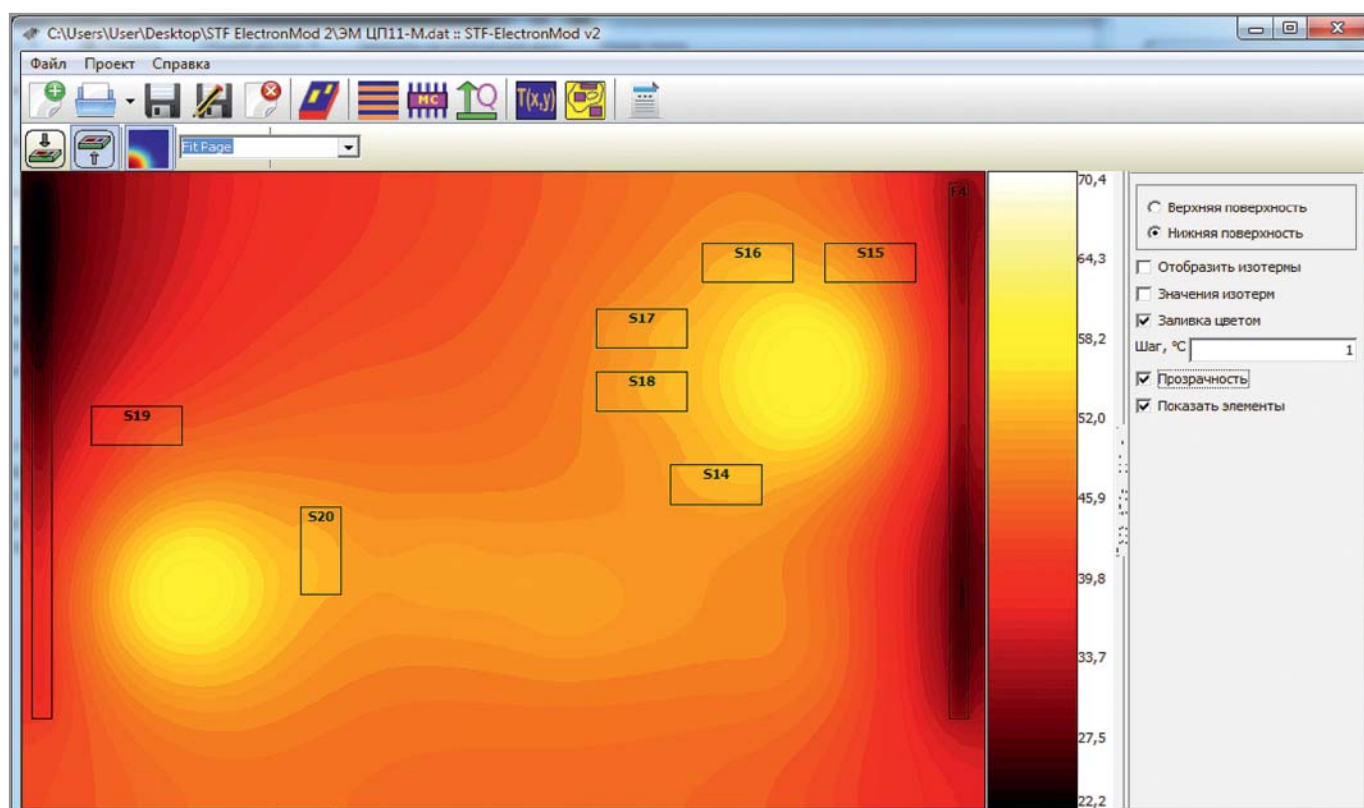


Рис. 9. Температурное поле нижней поверхности ЭМ

ва конструкции. Как показывает практика моделирования ЭМ, заложенные в программный комплекс методы позволяют моделировать трёхмерные температурные поля ЭМ с погрешностью, не превышающей 5...6%, при условии точного задания исходных данных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мадера А.Г.* Математическое моделирование конвективного теплопереноса в электронных устройствах. Программные продукты и системы. 2011. № 4. С. 46–51.
2. *Kandalov P.I., Madera A.G.* Mathematical and computing modeling of temperature fields

in electronic modules. 16th Intern. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. Barcelona, Spain. October 6–8, 2010.

3. *Мадера А.Г.* Моделирование теплообмена в технических системах. М.: Научный фонд им. академика В.А. Мельникова, 2005.

