УДК: 536.24: 621.396

Моделирование воздействия тепловой обратной связи на тепловые процессы в электронных системах

А. Г. Мадера

ФГУ ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Россия, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., д. 36, к. 1

E-mail: agmprof@mail.ru

Получено 17.04.2018, после доработки — 24.04.2018.

Принято к публикации 10.05.2018.

Статья посвящена эффекту тепловой обратной связи, возникающему при функционировании интегральных микросхем и электронных систем, использующих микросхемы. Тепловая обратная связь обусловливается тем, что потребляемая при функционировании микросхемы мощность нагревает ее и, в силу значительной зависимости ее электрических параметров от температуры, между ее электрическими и тепловыми процессами возникает интерактивное взаимодействие. Воздействие тепловой обратной связи приводит к изменению как электрических параметров, так и уровней температуры в микросхемах. Положительная тепловая обратная связь представляет собой нежелательное явление, поскольку является причиной выхода электрических параметров микросхем за пределы допустимых значений, снижения надежности и, в ряде случаев, выгорания. Отрицательная тепловая обратная связь проявляется в стабилизации электрического и теплового режимов при пониженных уровнях температуры. Поэтому при проектировании микросхем и электронных систем с их применением необходимо добиваться реализации отрицательной обратной связи. В настоящей работе предлагается метод моделирования теплового режима электронных систем с учетом воздействия тепловой обратной связи. Метод основан на введении в тепловую модель электронной системы новых модельных схемных элементов, нелинейно зависящих от температуры, количество которых равно количеству микросхем в электронной системе. Такой подход позволяет применять к тепловой модели с введенными в нее новыми схемными элементами матрично-топологические уравнения тепловых процессов и включать их в существующие программные комплексы теплового проектирования. Приведен пример моделирования теплового процесса в реальной электронной системе с учетом воздействия тепловой обратной связи на примере микросхемы, установленной на печатной плате. Показано, что для адекватного моделирования электрических и тепловых процессов микросхем и электронных систем необходимо во избежание ошибок проектирования и создания конкурентоспособных электронных систем учитывать воздействие тепловой обратной связи.

Ключевые слова: электронная система, микросхема, тепловая обратная связь, температура, электрические параметры, тепловая модель, моделирование

UDC: 536.24: 621.396

Modeling thermal feedback effect on thermal processes in electronic systems

A. G. Madera

Scientific Research Institute for System Analysis, RAS,
36/1 Nakhimovsky Prospekt 36, build. 1, Moscow, 117218, Russia

E-mail: agmprof@mail.ru

Received 17.04.2018, after completion — 24.04.2018.

Accepted for publication 10.05.2018.

The article is devoted to the effect of thermal feedback, which occurs during the operation of integrated circuits and electronic systems with their use. Thermal feedback is due to the fact that the power consumed by the functioning of the microchip heats it and, due to the significant dependence of its electrical parameters on temperature, interactive interaction arises between its electrical and thermal processes. The effect of thermal feedback leads to a change in both electrical parameters and temperature levels in microcircuits. Positive thermal feedback is an undesirable phenomenon, because it causes the output of the electrical parameters of the microcircuits beyond the permissible values, the reduction in reliability and, in some cases, burn out. Negative thermal feedback is manifested in stabilizing the electrical and thermal regimes at lower temperature levels. Therefore, when designing microcircuits and electronic systems with their application, it is necessary to achieve the implementation of negative feedback. In this paper, we propose a method for modeling of thermal modes in electronic systems, taking into account the effect of thermal feedback. The method is based on introducing into the thermal model of the electronic system new model circuit elements that are nonlinearly dependent on temperature, the number of which is equal to the number of microcircuits in the electronic system. This approach makes it possible to apply matrix-topological equations of thermal processes to the thermal model with new circuit elements introduced into it and incorporate them into existing thermal design software packages. An example of modeling a thermal process in a real electronic system is presented, taking into account the effect of thermal feedback on the example of a microcircuit installed on a printed circuit board. It is shown that in order to adequately model the electrical and thermal processes of microcircuits and electronic systems, it is necessary to take into account the effects of thermal feedback in order to avoid design errors and create competitive electronic systems.

Keywords: electronic system, microcircuit, thermal feedback, temperature, electrical parameters, thermal model, simulation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 483–494 (Russian).

Введение

Особенность функционирования электронных систем (ЭС), построенных с применением интегральных микросхем (МС), состоит в том, что большая часть потребляемой ими электрической энергии переходит в тепловую и лишь незначительная ее часть (5–15 %) — в энергию полезных сигналов [Дульнев, 1971; Мадера, Кандалов, 2010]. Иначе говоря, практически вся потребляемая электрическая энергия превращается в теплоту, приводящую к нагреванию МС и ЭС, причем возникающие при этом уровни температур зачастую становятся основным препятствием на пути создания надежных и конкурентоспособных МС и ЭС [Бобков, Мадера, 2013; Чеканов, 2012].

Физические параметры полупроводниковых материалов (подвижность носителей, электропроводность, концентрация, ширина запрещенной зоны и т. д.), из которых изготавливаются кристаллы МС, характеризуются, как известно, сильной зависимостью от температуры [Мадера, 1982; Резников, 1988; Сергеев, Хадаков, 2012]. Поскольку физические параметры полупроводникового кристалла определяют значения электрических параметров МС (быстродействие, помехоустойчивость, пороговые напряжения и т. д.), то последние также существенно зависят от температуры, обуславливая тем самым возникновение взаимного влияния между электрическим и тепловым режимами как в МС, так и во всей ЭС в целом. Другими словами, саморазогрев, возникающий в результате функционирования МС, приводит к изменению зависящих от температуры электрических параметров и, следовательно, мощности потребления МС, которая, в свою очередь, изменяет температурное поле и вновь — мощность потребления. Такой взаимно обусловленный процесс влияния параметров электрического и теплового режимов МС друг на друга носит название тепловой обратной связи (ТОС) [Мадера, 1982; Сергеев, Хадаков, 2012; Rzepka, Banerjee, 1998; Tenbroek et al., 1996]. Воздействие ТОС сопровождается функционированием любых МС и ЭС, однако в ряде случаев при незначительных мощностях тепловыделения, применении эффективных методов теплоотвода и охлаждения, внедрении новых технологий эффект ТОС в МС и ЭС может быть существенно снижен.

Как и всякая обратная связь, ТОС может быть как положительной, так и отрицательной. При положительной ТОС взаимообусловленные значения потребляемой мощности и температуры в МС увеличиваются, что может вызывать сбои, выгорание МС, выход параметров электрического и теплового режимов за пределы допустимых значений, уменьшение запаса сопротивляемости дестабилизирующим факторам. Отрицательная ТОС характеризуется снижением мощности энергопотребления с ростом температуры, обуславливая достижение установившегося устойчивого теплового и электрического режимов при пониженных уровнях температуры. Таким образом, положительная ТОС в МС вызывает повышенные уровни температуры кристалла МС и является нежелательным явлением, в то время как отрицательная ТОС, напротив, является благоприятным для работоспособности МС и ЭС явлением, поскольку ведет к достижению устойчивого электрического и теплового режимов.

Несмотря на существенное влияние, оказываемое ТОС на электрические и тепловые параметры МС и ЭС, расчеты их электрических и тепловых режимов проводятся в настоящее время при необоснованном допущении независимости температуры и потребляемой мощности между собой. Между тем, пренебрежение воздействием ТОС при тепловом проектировании ЭС приводит как к ошибкам при установлении физических механизмов, обуславливающих снижение надежности, сбои, выход ЭС из строя, так и значительным погрешностям моделирования электрического и теплового режимов МС и ЭС. Необходимо отметить, что введение эффекта ТОС в тепловую и математическую модели вносит в уравнения тепловых процессов в МС и ЭС существенную нелинейность и препятствует созданию алгоритмов автоматизированного формирования уравнений математической модели на компьютере [Мадера, 2005].

В настоящей работе предлагается метод теплового и математического моделирования ЭС с учетом воздействия ТОС, основанный на введении в тепловую модель ЭС нового схемного элемента, нелинейно зависящего от температуры. Такой подход позволяет рассматривать тепловую модель ЭС с включенными в нее новыми модельными элементами как единое целое,

применять к ней обобщенное матрично-топологическое уравнение, описывающее тепловые процессы в ЭС [Мадера, 2005; Мадера, Кандалов, 2016] и включать в существующие программные комплексы теплового проектирования ЭС [Мадера, Кандалов, 2012]. Приведен пример моделирования теплового процесса в реальной ЭС с учетом ТОС. Эффект воздействия ТОС на практике рассмотрен на примере реальной МС, установленной на печатной плате, который показывает необходимость моделирования тепловых и электрических режимов ЭС с учетом ТОС.

Тепловая и математическая модели ЭС в условиях воздействия ТОС

Тепловая модель ЭС, состоящая из множества электронных компонентов, находящихся в тепловом взаимодействии между собой и потоками жидкости (воздуха) как внутри ЭС, так и с окружающей средой, основана на концепции электротеплового моделирования системы N изотермических тел [Дульнев, 1971; Мадера, 2005; Мадера, Кандалов, 2016; Chapman, 2003; Ellison, 2011]. Компоненты ЭС, потребляющие энергию от внешних источников питания (микропроцессоры, микросхемы, резисторы и другие электрорадиоэлементы с тепловыделением) и диссипирующие ее в виде теплоты, являются *активными*, в то время как компоненты ЭС, не потребляющие электрическую энергию, относятся к *пассивным* (теплоотводы, электрические разъемы, конденсаторы, конструктивные элементы). Последние, нагреваясь от активных компонентов, участвуют в сложном кондуктивном, конвективном и лучистом теплообмене между собой и потоками жидкости (газа). Для получения тепловой модели ЭС подвергается дискретизации на отдельные элементы вплоть до получения дискретных элементов, в которых с достаточной для практики точностью можно принять изотермическое распределение температуры. При этом степень дискретизации конструкции ЭС на отдельные элементы должна соответствовать цели моделирования теплового процесса в ЭС и требуемому уровню его адекватности. Что касается жидкости (газа) внутри и вне ЭС, то распределение ее температуры внутри ЭС априори неизвестно и определяется теплообменом между компонентами ЭС и участками жидкости, имеющими различные температуры, плотности и скорости. Вместе с тем, с достаточной для инженерной практики точностью можно принять, что распределение температуры жидкости внутри ЭС незначительно отличается от изотермического, что достаточно хорошо выполняется на практике в случае воздушной среды, которая, как правило, заполняет внутренний объем ЭС, поскольку полные теплоемкости компонентов ЭС значительно превышают полную теплоемкость воздуха. В этом случае изотермическая жидкостная среда внутри ЭС включается в тепловую модель в качестве $N + 1$ -го элемента.

Полученная система $\bigcup_{i=1}^{N+1} G_i$ из $N + 1$ изотермических, взаимодействующих между собой элементов G_i с границами ∂G_i , образует тепловую модель ЭС. Элементы тепловой модели ЭС, полученные в результате дискретизации, моделируются следующими схемными элементами: активные элементы ЭС — источниками теплоты P_i , подключенными к узлу i , которые в условиях воздействия ТОС являются температурозависимыми $P_i(T_i)$; пассивные элементы — тепловыми проводимостями $g_L = g_{ik}$ в ветви L , соединяющей узлы (элементы) i и k ; температуры окружающей среды и потока жидкости, поступающей внутрь ЭС — заданными потенциалами в узлах модели; объемные теплоемкости элементов — емкостями, подключенными к узлам, равными $h_i = \rho_i c_i V_i$, где ρ_i , c_i , V_i — плотность, удельная теплоемкость, объем i -го элемента; температуры элементов T_i — потенциалами в узлах; потоки теплоты J_{ik} между двумя взаимодействующими элементами i и k — токами в ветвях, соединяющими узлы i и k . Полная тепловая модель ЭС содержит $N + 1$ узел и $M + 1$ ветвь, причем узел N соответствует оболочке (корпусу, кожуху), в которую заключена ЭС, узел $N + 1$ — жидкостной среде внутри оболочки, ветвь M моделирует теплообмен оболочки с окружающей средой, ветвь $M + 1$ — тепловой поток, переносимый жидкостью, поступающей внутрь ЭС.

Тепловой процесс в ЭС однозначно определяется следующими факторами: формой, размерами и пространственной компоновкой электронных компонентов и конструктивных элементов в ЭС; мощностями тепловыделения активных компонентов; граничными условиями на поверхностях компонентов и всей ЭС в целом; характером теплообмена (вынужденная, естественная конвекция, излучение, кондукция); температурами окружающей среды и жидкости на входе в ЭС; начальными условиями; теплофизическими характеристиками материалов конструкции компонентов ЭС и среды внутри и вне ЭС (плотность, теплопроводность, теплоемкость, вязкость, степень черноты). В силу нелинейности зависимостей от температуры факторов кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена компонентов ЭС и жидкостной среды внутри и вне ЭС, а также нелинейной зависимости мощностей тепловыделения активных компонентов ЭС от температуры, возникающей в процессе развития ТОС, тепловые процессы в ЭС будут носить нелинейный характер. Поэтому адекватная математическая модель, описывающая тепловые процессы в реальных ЭС, должна в полной мере отражать нелинейности, нестационарность, стохастический характер [Мадера, Кандалов, 2016] и воздействие ТОС.

Общая матрично-топологическая математическая модель [Мадера, 2005; Мадера, Кандалов, 2012], описывающая нестационарные температуры $T_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N+1$ в узлах тепловой модели, для обеспечения возможности моделирования воздействия ТОС, должна быть дополнена температурозависимым вектором мощностей $P(T, t)$ активных элементов ЭС. Тогда математическая модель, описывающая тепловые процессы в сложных ЭС, в условиях воздействия ТОС, будет иметь вид:

$$H \frac{dT(t)}{dt} + AG(T)A^T T(t) = P(T, t) + AG(T)T_a(t), T(0) = T_a(0), \quad (1)$$

где $T(t) = (T_1(t), T_2(t), \dots, T_{N+1}(t))^T$ — $(N+1)$ -вектор температур в узлах тепловой модели; A — прямоугольная $(N+1) \times (M+1)$ -матрица инцидентий графа тепловой модели; $G(T) = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_{M+1})$ — диагональная $(M+1) \times (M+1)$ -матрица проводимостей ветвей g_k , $k = 1, 2, \dots, M+1$; $H = \text{diag}(h_1, h_2, \dots, h_{N+1})$ — диагональная $(N+1) \times (N+1)$ -матрица полных объемных теплоемкостей $h_i = \rho_i c_i V_i$, элементов тепловой модели; $P(T, t) = (P_1(T_1, t), P_2(T_2, t), \dots, P_{N-1}(T_{N-1}, t), 0, 0)^T$ — $(N+1)$ -вектор температурозависимых источников теплоты (мощностей потребления) $P_i(T_i, t)$ активных элементов ЭС; $T(0) = (T_1(0), T_2(0), \dots, T_{N+1}(0))^T$ — $(N+1)$ -вектор известных начальных температур в узлах тепловой модели; $T_a(t) = (0, 0, \dots, T_e(t), T_{a,in}(t))^T$ — $(M+1)$ -вектор известных температур окружающей среды $T_e(t)$ вне оболочки ЭС и жидкостного потока $T_{a,in}(t)$ на входе в ЭС; $T(0) = (T_1(0), T_2(0), \dots, T_{N+1}(0))^T$ — $(N+1)$ -вектор начальных температур элементов тепловой модели, равных температуре среды в начальный момент времени $t = 0$, $T(0) = T_a(0)$; $(\cdot)^T$ — операция транспонирования.

Модельный схемный элемент тепловой модели, моделирующий воздействие ТОС

Эффект ТОС выражается в интерактивном взаимодействии теплового и электрического режимов компонентов ЭС между собой, что обусловливается значительной зависимостью мощностей тепловыделения компонентов от температуры, а возникающих при этом распределений температуры в ЭС — от мощностей потребления. Для того, чтобы иметь возможность модели-

ровать тепловые процессы в ЭС совместно с воздействием ТОС и иметь возможность включения их в существующие эффективные алгоритмы и программные комплексы, необходимо располагать единым модельным представлением различных физических воздействий и эффектов, имеющих место в реальных ЭС в процессе их функционирования. Разработанный в настоящей работе модельный схемный элемент, моделирующий ТОС в каждом компоненте ЭС и включаемый в общую тепловую модель, позволяет рассматривать тепловые процессы с учетом воздействия ТОС в едином методологическом подходе. Подобный подход применяется при моделировании интервально стохастических тепловых процессов в ЭС [Мадера, Кандалов, 2016].

Представим зависимость мощности тепловыделения i -го компонента $P_i(T_i)$ от температуры как $P_i(T_i) = P_i(T_{i0}) \pm F_i(T_i)$, где $P_i(T_{i0})$ — мощность тепловыделения i -го компонента ЭС при некоторой опорной температуре T_0 (принимается, как правило, равной 273 К или 293 К), а $F_i(T_i)$ — температурозависимая функция, удовлетворяющая равенству $F_i(T_{i0}) = 0$. Знак (+) или (–) соответствует положительной или отрицательной ТОС. Зависимость мощности потребления компонентов от температуры получают на основании данных эксперимента или теоретически [Мадера, 1982; Сергеев, Хадаков, 2012].

Соотношение для $P_i(T_i)$ может быть представлено в виде

$$P_i(T_i) = P_i(T_{i0}) \pm G_K(T_i)T_i, \quad G_K(T_i) = F_i(T_i)/T_i, \quad T_i > 0, \quad (2)$$

из которого следует модель эффекта ТОС в виде схемного элемента $G_K(T_i)$, подсоединяемого к узлу i тепловой модели ЭС (рис. 1). По своему содержательному смыслу элемент $G_K(T_i)$ представляет собой тепловую проводимость с переменным знаком, зависящую от температуры и вида ТОС — положительной или отрицательной.

Рис. 1. Фрагмент тепловой модели (а) и температурозависимая знакопеременная тепловая проводимость $G_K(T_i)$, моделирующая эффект тепловой обратной связи (б) в i -ом компоненте электронной системы, подключенная к узлу i тепловой модели

Модельный элемент в виде температурозависимой знакопеременной тепловой проводимости (ТЗТП) величиной $G_K(T_i)$ в общем случае нелинейно зависит от температуры T_i и на тепловой модели представляется ветвью K , подключенной между узлом i , моделирующим элемент ЭС, подверженный воздействию ТОС (рис. 1, б), и узлом с нулевой температурой (символ $\perp$ на тепловой модели, рис. 1). Потребляемая при температуре T_0 мощность $P_i(T_{i0})$ элемента i моделируется на тепловой модели схемным элементом в виде независимого источ-

ника тепла с постоянного величиной $P_i(T_{i0})$. Тепловой поток в ветви K с новым схемным элементом ТЗТП направлен (по умолчанию) от узла i к узлу с нулевой температурой, что соответствует отрицательной ТОС и положительному знаку ТЗТП $G_K(T_i)$, в то время как при положительной ТОС поток тепла должен быть ориентирован в обратную сторону, то есть к узлу i , что соответствует отрицательному знаку ТЗТП.

Действительно, согласно матричному уравнению (1), тепловой процесс элемента ЭС, соответствующего узлу i на тепловой модели (рис. 1), описывается уравнением

$$h_i \frac{dT_i}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^L g_{ik}(T_i, T_k)(T_i - T_k) = P_i(T_i),$$

которое с учетом соотношения (2) может быть записано в виде:

$$h_i \frac{dT_i}{dt} + T_i \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^L (g_{ik}(T_i, T_k) \mp G_i(T_i)) - \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^L g_{ik}(T_i, T_k) T_k = P_{i0}(T_{i0}),$$

где L — количество ветвей, подключенных к узлу i .

Для выполнения условий баланса потоков в каждом узле тепловой модели необходимо соблюдать правило выбора знака ТЗТП $G_K(T_i)$. А именно: вектор теплового потока в ветви K с включенным в нее ТЗТП $G_K(T_i)$ направлен от узла i (рис. 1) к нулевому узлу, поэтому для того, чтобы при отрицательной ТОС направление потока сохранилось неизменным, необходимо, чтобы выполнялось неравенство $G_K(T_i) > 0$. В случае положительной ТОС направление потока в ветви K с ТЗТП $G_K(T_i)$ должно быть обратным, однако, поскольку направление потока в ветви K соответствует тому, что принято по умолчанию (рис. 1, б), необходимо, чтобы выполнялось условие $G_K(T_i) < 0$. Таким образом, при формировании диагональной матрицы тепловых проводимостей $G(T)$ в матричной системе уравнений (1) в условиях воздействия ТОС необходимо задавать значение ТЗТП $G_K(T_i)$ для положительной ТОС с отрицательным знаком ($G_K(T_i) < 0$) и для отрицательной ТОС — с положительным ($G_K(T_i) > 0$).

Включение эффекта ТОС в моделирование тепловых процессов ЭС осуществляется путем введения в тепловую модель ЭС новых схемных элементов (ТЗТП), подключаемых ко всем узлам активных элементов ЭС. Поэтому количество модельных схемных элементов, моделирующих ТОС, равносильно подключению к тепловой модели такого же количества новых ветвей, которое равно количеству активных элементов в ЭС, подверженных воздействию ТОС. Для общего матрично-топологического уравнения (1) введение новых ветвей с ТЗТП равносильно увеличению размерности диагональной матрицы $G(T)$, вектора $T_a(t)$ и количества столбцов в матрице инцидентий A на количество новых схемных элементов. Указанное обстоятельство хотя и приводит к увеличению размерности векторов и матриц в (1), никоим образом, однако, не усложняет алгоритм автоматизированного компьютерного формирования уравнений (1) [Мадера, 2005; Чуа, Пен-Мин Лин, 1980]. При этом диагональная матрица $G(T)$ дополняется диагональными элементами с ТЗТП G_K , моделирующими ТОС, в количестве равном числу новых схемных элементов, вводимых в тепловую модель с ТОС ($i = 1, 2, \dots, M - 1$), с соблюдением правила знаков при задании $G_K(T_i)$: для положительной ТОС $G_K(T_i) < 0$, для отрицательной $G_K(T_i) > 0$.

Моделирование ТОС на практике

Рассмотрим практическое применение разработанного метода моделирования ТОС на примере реальной ЭС (рис. 2), содержащей МС (IC на рис. 2) в корпусе, припаянном своими выводами (*Leads* на рис. 2) к многослойной печатной плате (МПП — РСВ на рис. 2). С поверхностей конструкции ЭС происходит сложный теплообмен в окружающую среду (*Ambient* на рис. 2) как конвекцией, так и излучением. Тепловые процессы, протекающие в рассматриваемой ЭС, подвержены воздействию ТОС, а именно: потребляемая МС мощность $P(T_j)$, будучи связанной сильной зависимостью от температуры T_j кристалла МС, вызывает возникновение температурного распределения в элементах ЭС (МС, МПП), которое, воздействуя на мощность в соответствии с ее температурной зависимостью $P(T_j)$, приводит к новым изменениям уровней температуры. Воздействие ТОС, заключающееся во взаимодействии потребляемой МС мощности и температуры элементов в ЭС между собой, приводит либо к установлению устойчивого распределения температуры элементов в ЭС при пониженных или повышенных температурах (при отрицательной и некоторых случаях положительной ТОС), либо к расходящимся значениям температуры элементов ЭС с последующим их выгоранием (при положительной ТОС).

Рис. 2. Конструкция электронной системы (а) и ее тепловая модель (б). Электронная система содержит интегральную микросхему (IC) с кристаллом (j) в корпусе (c) с выводами (*Leads*), припаянную к многослойной печатной плате (PCB), находящейся в условиях теплообмена со средой (*Ambient*). Числа на тепловой модели означают номера узлов, числа в кружках — номера ветвей

Тепловые процессы в ЭС (рис. 2) в условиях воздействия ТОС описываются общей матричной системой уравнений (1), в которой входящие в нее матрицы и векторы, применительно к рассматриваемой ЭС, будут равны:

– матрица инциденций A

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

– диагональная матрица тепловых проводимостей $G = \text{diag}\{g_{jc}, g_{c-pcb}, G(T_j), g_{ca}, g_{pcb-a}\}$,

в которой элемент ТЗТП $G(T_j)$, моделирующий воздействие ТОС, равен

$$G(T_j) = \mp \frac{P(T_0)(1 - \delta^{T_j - T_0})}{T_j},$$

Заключение

В статье рассматривался эффект ТОС, заключающийся во взаимодействии теплового и электрического режимов в электронных компонентах ЭС, обусловленном зависимостью мощностей тепловыделения компонентов от температуры и температуры компонентов — от мощностей потребления. В результате интерактивного взаимовлияния между мощностью потребления и температурой, возникающей по цепи обратной связи, электрические и тепловые параметры компонентов ЭС претерпевают существенные изменения, которые могут приводить к нежелательным для работоспособности и надежности ЭС последствиям, являющимися, как правило, основным препятствием на пути создания конкурентоспособных и надежных ЭС.

Воздействие ТОС может быть как положительным, так и отрицательным. При этом положительная ТОС характеризуется ростом мощности с ростом температуры, а отрицательная — уменьшением мощности с увеличением температуры. Если положительная ТОС оказывает негативное воздействие на работоспособность электронных компонентов ЭС, приводя к их перегреву и выходу электрических параметров за пределы допустимых значений, то отрицательная ТОС благоприятна для обеспечения работоспособности электронных компонентов ЭС, поскольку способствует снижению как общего энергопотребления, так и установлению температуры в компонентах и всей ЭС на более низком уровне.

Эффект воздействия ТОС неустраним и всегда сопровождает функционирование электронных компонентов и ЭС. Между тем проектирование МС и ЭС, построенных с их применением, проводят, как правило, в предположении, что мощности потребления и возникающие при этом температуры независимы между собой, так что воздействием ТОС можно пренебречь. Такое предположение не соответствует реальности и приводит к серьезным ошибкам проектирования ЭС.

В данной работе рассматривается тепловая и математическая модели взаимообусловленного воздействия ТОС на тепловые процессы в МС и ЭС, которые основаны на введении нового модельного схемного элемента, включаемого в тепловую модель ЭС. Это позволяет учитывать воздействие ТОС на функционирование ЭС в едином методологическом подходе с существующими эффективными методами моделирования тепловых процессов в ЭС и программными комплексами теплового проектирования. Разработанный модельный схемный элемент представляет собой температурозависимую знакопеременную тепловую проводимость величиной $G_K(T_i)$, которая вводится в тепловую модель ЭС для каждого активного тепловыделяющего электронного компонента ЭС.

Количественный уровень воздействия и последствий, оказываемых ТОС на тепловые процессы, показаны на примере реальной ЭС, содержащей МС в корпусе, припаянном выводами к МПП. Результаты проведенных вычислений для динамики развития тепловых процессов в МС с учетом воздействия как положительной, так и отрицательной ТОС, а также их сравнение в предположении отсутствия ТОС, свидетельствуют о том, что для адекватного моделирования теплового и электрического режимов ЭС в математическую и тепловую модели необходимо включать эффект ТОС. Пренебрежение воздействием ТОС при тепловом проектировании ЭС приводит к ошибкам проектирования, снижению надежности, сбоям, выходу электрических параметров МС и ЭС за пределы допустимых значений и в конечном итоге — к созданию неконкурентоспособных МС и ЭС [Сергеев, Хадаков, 2012; Hnatec, 2005; Liu et al., 2007].

Список литературы (References)

- Бобков С. Г., Мадера А. Г. Энергетические затраты, быстродействие и проблема теплоотвода в микропроцессорах // Программные продукты и системы. — 2013. — № 4. — С. 29–35.
Bobkov S. G., Madera A. G. Energeticheskie zatraty, bystrodeistvie i problema teplootvoda v mikroprotssessorakh [Energy costs, speed and heat sink in microprocessors] // Programmnnye produkty i sistemy [Software & Systems]. — 2013. — No. 4. — P. 29–35 (in Russian).

- Дульнев Г. Н.* Тепловые режимы электронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971.
Dul'nev G. N. Teplovye rezhimy elektronnoi apparatury [Thermal regimes of electronic equipment]. — Leningrad: Energiya, 1971 (in Russian).
- Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / Под общ. ред. В. А. Шахнова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
 Konstruktorsko tekhnologicheskoe proektirovanie elektronnoi apparatury [Design and technological design of electronic equipment] / Pod obshch. red. V. A. Shakhnova. — Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2005 (in Russian).
- Мадера А. Г.* Расчет динамического режима полупроводниковых микросхем с учетом тепловой обратной связи // Микроэлектроника. — 1982. — Т. 11, № 2. — С. 175–177.
Madera A. G. Raschet dinamicheskogo rezhima poluprovodnikovyykh mikroskhem s uchetom teplovoi obratnoi svyazi [Calculation of the dynamic mode of semiconductor chips with allowance for thermal feedback] // Mikroelektronika. — 1982. — Vol. 11, No. 2. — P. 175–177 (in Russian).
- Мадера А. Г.* Моделирование теплообмена в технических системах. — М: НФ им. ак. В. А. Мельникова, 2005.
Madera A. G. Modelirovanie teploobmena v tekhnicheskikh sistemakh [Modelling of heat transfer in technical systems]. — Moscow: NF im. ak. V. A. Mel'nikova, 2005 (in Russian).
- 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.
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. 8, No. 3. — P. 501–520 (in Russian).
- Мадера А. Г., Кандалов П. И.* Моделирование трехмерных температурных полей в электронных модулях // Программные продукты и системы. — 2010. — № 2. — С. 36.
Madera A. G., Kandalov P. I. Modelirovanie trekhmernyykh temperaturnykh polei v elektronnykh modulyakh [Modeling of three-dimensionnal temperature fields in electronic modules] // Programmye produkty i sistemy [Software & Systems]. — 2010. — No. 2. — P. 36 (in Russian).
- 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. 34.
Madera A. G., Kandalov P. I. Matrichno-topologicheskii metod matematicheskogo i komp'yuternogo modelirovaniya temperaturnykh polei v elektronnykh modulyakh: programnyi kompleks STF-ElectronMod [Matrix-topological method for mathematical and computer modeling of temperature fields in electronic modules: programming complex STF-ElectronMod] // Programmye produkty i sistemy [Software & Systems]. — 2012. — No. 4. — P. 34 (in Russian).
- Резников Г. В.* Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988.
Reznikov G. V. Raschet i konstruirovaniye sistem okhlazhdeniya [Calculation and construction of computer cooling systems]. — Moscow: Radio i svyaz, 1988 (in Russian).
- Сергеев В. А., Хадаков А. М.* Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. — Ульяновск: УлГТУ, 2012.
Sergeev V. A., Khadakov A. M. Nelineinye teplovye modeli poluprovodnikovyykh priborov [Nonlinear thermal models of semiconductor devices]. — Ul'yanovsk: UIGTU, 2012 (in Russian).
- Чеканов А. Н.* Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. — М.: КНОРУС, 2012.
Chekanov A. N. Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoi apparatury [Calculations and ensuring the reliability of electronic equipment]. Moscow: KNORUS, 2012 (in Russian).
- Чуа Л., Пен-Мин Лин.* Машинный анализ электронных схем. Алгоритмы и вычислительные методы. — М.: Энергия, 1980.
Chua L. O., Lin Pen-Min. Computer-aided analysis of electronic circuits. — New Jersey: Prentice-Hall, 1974. (Russ. ed. *Chua L., Pen-Min Lin.* Mashinnyi analiz elektronnykh skhem. Algoritmy i vychislitel'nye metody. — Moscow: Energiya, 1980.)
- Chapman A. J.* Heat Transfer. — Portsmouth: MacMillan Company, 2003.
- Ellison G. N.* Thermal computations for electronics. Conductive, radiative, and convective air cooling. — N.Y.: CRC Press, 2011.

- Hnatec E. R.* Integrated Circuit Quality and Reliability. — London, N.Y.: Taylor & Francis, 2005.
- Liu Y., Dick R. P., Shang Li, Yang H.* Accurate Temperature-Dependent Integrated Circuit Leakage Power Estimation is Easy // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 16–20 April, France, 2007.
- Rzepka S., Banerjee K.* Characterization of self-heating in advanced VLSI interconnect lines based on thermal finite element simulation // IEEE Trans. Compon., Packag., Manufac. Techn.–A. — 1998. — Vol. 21, No. 3. — P. 406–411.
- Tenbroek B. M., Lee M. S., Redman-White W., Bunyan R. J. T., Uren M. J.* Self-heating effects in SOI MOSFET's and their measurement by small signal conductance techniques // IEEE Trans. On Electron Devices. — 1996. — Vol. 43, No. 12. — P. 2240–2248.