

Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ»

К. О. Петросянц^{1,2}, И. А. Харитонов¹, М. С. Тегин³

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук, г. Москва, Россия

³ООО «Компекс-Т», г. Москва, Россия

kpetrosyants@hse.ru

Аннотация. Большие скачки температуры в структурах мощных полупроводниковых приборов при их включении и выключении существенно снижают надежность работы силовых схем. Широко используемые маршруты электротеплового моделирования тепловых схем имеют ряд недостатков: использование взаимосвязанных Spice-симуляторов электрических цепей и пакета 3D численного моделирования тепловых полей требует детального описания 3D-конструкций и больших затрат компьютерного времени; использование только Spice-подобных симуляторов электрических цепей для смешанного электротеплового моделирования требует создания электротепловых моделей силовых компонентов и значительных затрат процессорного времени из-за большой разницы в постоянных времени электрической и тепловой частей. В работе предложена и реализована усовершенствованная схема многоуровневого автоматизированного электротеплового моделирования мощных электронных компонентов с использованием программного обеспечения Comsol на уровне полупроводниковых приборов, Spice-моделирования на уровне принципиальных схем и системы «Асоника-ТМ» на уровне печатных плат. Описаны разработанные дополнительные программные средства для реализации предложенного маршрута, обеспечивающие автоматизацию процессов расчета мощностей компонентов мощных схем, передачи этих значений в пакет теплового моделирования и формирования электротепловых моделей компонентов схем. Корректность рассматриваемой схемы моделирования подтверждена результатами тепловизионного анализа с помощью инфракрасной камеры. Эффективность предложенной методологии продемонстрирована на примере реальной конструкции печатной платы силовой схемы, содержащей мощные МОП-транзисторы, для управления мощным шаговым двигателем. В анализируемой схеме выявлен возможный тепловой отказ выходных ДМОП-транзисторов вследствие их перегрева. Для улучшения условий снижения значений их температуры предложено использовать более крупный радиатор с меньшим тепловым сопротивлением.

Ключевые слова: мощные компоненты, силовая схема, МОП-транзистор, печатная плата, Spice-симулятор, электротепловое моделирование, тепловые схемы, ИК-измерения

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Программы «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность» (проект № 23-22-00313).

Для цитирования: Петросянц К. О., Харитонов И. А., Тегин М. С. Моделирование электротепловых переходных процессов в мощных электронных схемах на печатных платах с использованием программного обеспечения Comsol, Spice, «Асоника-ТМ» // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 65–78. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-65-78>. – EDN: QXXHKC.

Original article

Simulation of electro-thermal transient responses in power PCB modules using Comsol, Spice, Asonika-TM

К. О. Петросянц^{1,2}, И. А. Харитонов¹, М. С. Тегин³

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³LLC “Kompex-T”, Moscow, Russia

kpetrosyants@hse.ru

Abstract. Large temperature jumps in the structures of power semiconductor devices occurring when they are turned on and off significantly reduce the reliability of power circuits. Widely used electro-thermal modeling approaches for thermal circuits have a number of disadvantages: the use of interconnected Spice simulators and numerical 3D thermal field modeling tool requires a detailed description of 3D structures and a large computer time; the use of only Spice-like simulators of electrical circuits for mixed electro-thermal modeling require the creation of electro-thermal models of power components and significant CPU time costs due to the large difference in the time constants of the electrical and thermal parts. In this work, an improved scheme of multilevel automated electro-thermal modeling and simulation of power electronic components using Comsol software at the semiconductor device level, Spice simulation at the circuit level and Asonika-TM system at the printed circuit board (PCB) level is proposed and implemented. The developed additional software tools for the implementation of the proposed route are described, providing automation of power calculation processes in capacities of components of powerful circuits, components, of obtained values transferring to a thermal simulation tool and of forming electro-thermal models of circuit components. The correctness of the proposed modeling scheme was confirmed by the results of thermal-imaging analysis using an IR camera. The effectiveness of the proposed methodology was demonstrated through the example of a real PCB design with high-power MOSFETs for power stepper motor driving. In the analyzed circuit, a possible

thermal failure of the output DMOSFETs due to their overheating was revealed. To improve conditions of their temperature value lowering it has been proposed to use larger electrode radiator with lesser thermal resistance.

Keywords: high-power component, power circuit, MOSFET, PCB, Spice simulator, electro-thermal modeling, thermal sub-circuit, IR measurements

Funding: the work has been supported by the “Priority 2030” Program within the framework of the HSE strategic project “Digital Transformation: Technology, Effects, Efficiency” (project no. 23-22-00313).

For citation: Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Tegin M. S. Simulation of electro-thermal transient responses in power PCB modules using Comsol, Spice, Asonika-TM. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 65–78. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-65-78>. – EDN: QXXHKC.

Введение. Одна из основных причин выхода из строя силовых компонентов в мощных схемах на печатных платах, предназначенных для управления двигателями и другими исполнительными устройствами, – скачки температуры в структурах полупроводниковых приборов вследствие их включения и выключения. Соответственно, для обеспечения надежности работы силовых схем, установленных на печатных платах, необходимы оценки и прогноз электротепловых переходных характеристик в мощных компонентах схем с учетом условий охлаждения. Традиционно используются два основных подхода к электротепловому моделированию на уровне печатных плат и блоков.

Первый подход – использование взаимосвязанных Spice-подобных симуляторов электрических цепей и пакетов 3D численного моделирования тепловых полей на основе пакетов AnSYS, Flotherm, Comsol и т. д. [1–4]. В данном случае обеспечивается полное решение задачи электротеплового моделирования мощных электронных схем, но его реализация весьма сложна ввиду необходимости 3D-описания конструкции и больших временных затрат на получение итерационного численного решения.

Второй подход – использование только Spice-подобных симуляторов электрических цепей для смешанного электротеплового моделирования исходной электронной схемы и электротепловых подсхем для мощных электронных компонентов. Корпуса компонентов и радиаторы охлаждения описываются тепловыми параметрами [5–8]. При этом подходе применяются более простые описания тепловых параметров компонентов, требуется меньше временных затрат, тепловые режимы компонентов схемы можно оценивать еще на этапе разработки схем, что удобно для разработчиков [8]. Данный подход используется в некоторых Spice-симуляторах [9–11], но для очень ограниченного набора компонентов. Кроме того, генерация тепловых схем электронных компонентов в работах [9–11] не автоматизирована.

Таким образом, на сегодняшний день универсальное решение для анализа электротепловых режимов компонентов мощных схем отсутствует. Цель настоящей работы – упрощение и автоматизация электротепловых расчетов мощных электронных схем, реализованных на печатных платах. Для решения поставленной задачи предлагается следующее:

– использование более быстрого программного средства «Асоника-ТМ» [12] для 2.5D теплового анализа печатных плат вместо традиционных 3D-пакетов теплового анализа;

– реализация дополнительного программного средства для автоматизации передачи значений мощности и температур компонентов между пакетом Spice-анализа и пакетом «Асоника-М»;

– автоматизация процесса расчета мощностей компонентов мощной схемы.

Программные средства и объект исследования. В качестве симулятора электрических цепей использовали LTSpice. Для упрощения процесса электротеплового моделирования мощных схем, смонтированных на печатных платах, применяли разработанные специализированные программные средства для обработки данных и их передачи между симуляторами [13–16] (рис. 1).

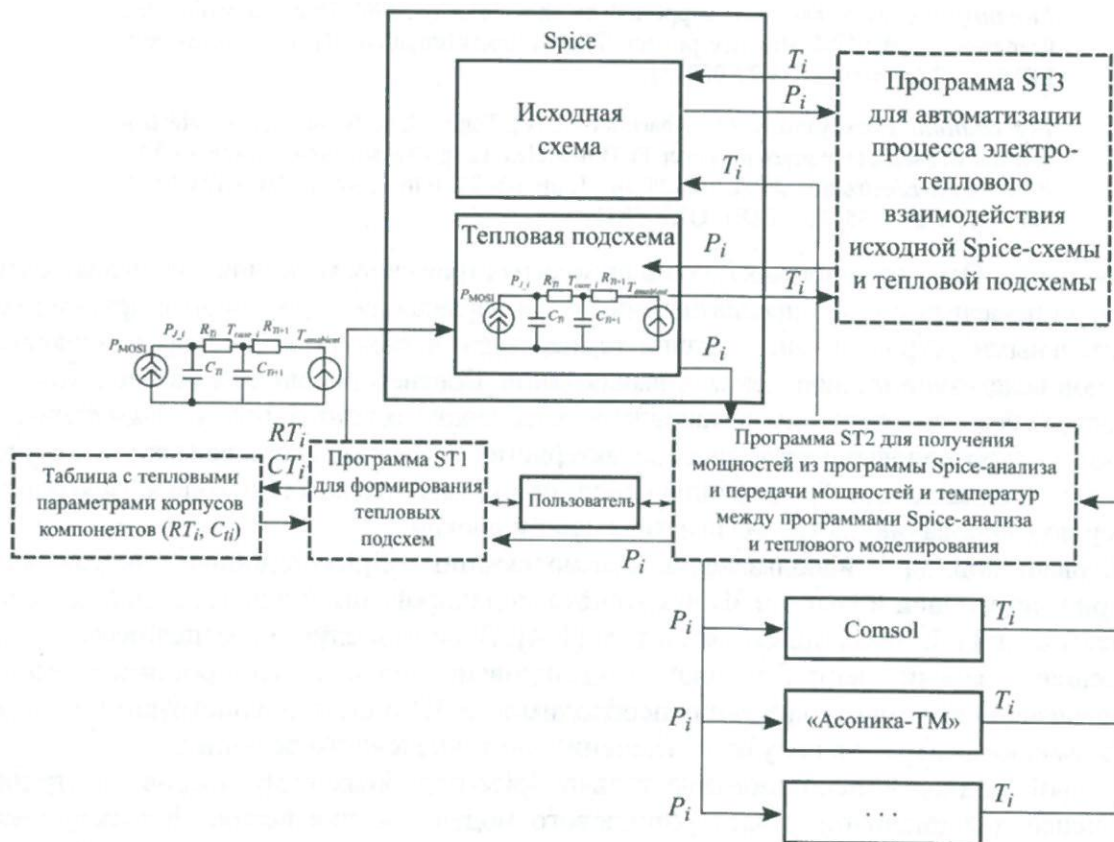


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия программных средств при электротепловом моделировании силовых схем на печатных платах (пунктиром выделены разработанные программные средства)

Fig. 1. Scheme of software tools interactions for electro-thermal modeling and simulation of power circuits on PCBs used in the present paper (the dotted line highlights the developed software tools)

Программный инструмент ST1 обеспечивает автоматическую генерацию тепловых подсхем для корпусов силовых компонентов схемы с учетом подключенного радиатора охлаждения. ST1 использует тепловые параметры корпусов компонентов из специально сформированной Excel-таблицы с подробными тепловыми параметрами широко применяемых корпусов силовых транзисторов и диодов.

Программный инструмент ST2 имеет следующие возможности: автоматизированное, управляемое пользователем определение мощностей P_i элементов схемы в программе Spice-анализа; передача мощностей P_i компонентов из Spice в пакеты теплового анализа Comsol, «Асоника-ТМ» и т. д.; передача значений температуры T_i компонентов из пакетов теплового анализа в программу Spice-анализа.

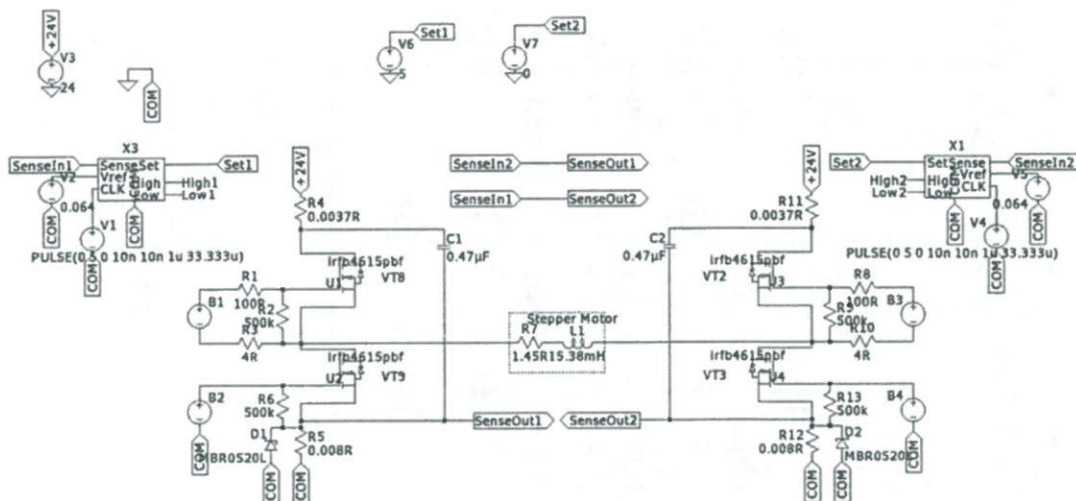
Программный инструмент ST3 обеспечивает автоматизацию двухстадийного итерационного электротеплового расчета схемы с использованием только Spice-анализа:

- запускает в симуляторе LTSpice расчет исходной схемы вместе с полной электротепловой моделью в течение нескольких тактов работы схемы, получает из нее рассчитанные средние значения мощностей силовых компонентов;

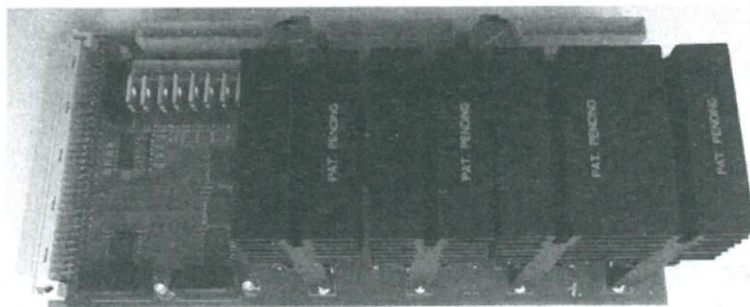
– запускает симулятор LTSpice с отдельной тепловой подсхемой для мощных компонентов с усредненными значениями мощностей компонентов, на основе результатов Spice-анализа тепловой подсхемы определяет средние температуры корпусов компонентов в установившемся тепловом режиме и передает их в исходную схему вместе с тепловой подсхемой.

Указанный итерационный процесс повторяют до достижения заданной погрешности расчета температур компонентов.

Кроме 3D-моделирования Comsol [13] использовали средство 2.5D теплового моделирования «Асоника-ТМ» [12], разработанное в Московском институте электроники и математики им. А. Н. Тихонова (НИУ ВШЭ). Программа имеет следующее преимущество: быстрый расчет теплового режима печатной платы вследствие аналитических тепловых моделей для компонентов платы. Набор программных средств (см. рис. 1) использовали для электротеплового анализа схемы управления мощным четырехфазным шаговым двигателем (рис. 2), разработанным и изготовленным ООО «Компекс-Т» (г. Москва). Схема представляет собой мост с четырьмя ДМОП-транзисторами IRFB4615 на каждую фазу двигателя [17]. Каждый ДМОП-транзистор размещали на радиаторе OMNI-UNI-30-50-D [18] с тепловым сопротивлением $R_{\theta} = 4,06 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$ при естественной конвекции. Транзистор IRFB4615 имеет типовое сопротивление канала в открытом состоянии $R_{ds\ on} = 35 \text{ мОм}$. Вся схема запитана от источника напряжения 24 В.



а



б

Рис. 2. Схема выходной части мощной схемы управления двигателем (а) и ее конструкция на печатной плате (б)

Fig. 2. Simplified schematic of output stage (a) and PCB realization (b) of stepper motor driver circuit

Электротепловое моделирование схемы драйвера шагового двигателя. Spice-моделирование. Для анализа теплового режима платы схемы управления (см. рис. 2) с использованием пакетов Comsol, «Асоника-ТМ» и других необходимы значения мощностей выходных транзисторов в установившемся температурном режиме платы вместе с радиаторами охлаждения. Мощности транзисторов зависят от их температуры, при этом схема драйвера выходит на стационарный тепловой режим примерно за 50 мин. Детальное электротепловое Spice-моделирование схемы драйвера с использованием оригинальной электронной схемы (см. рис. 2) и дополнительной тепловой подсхемы для мощных компонентов (рис. 3) не позволило добиться стационарного теплового режима вследствие неприемлемо больших затрат процессорного времени, так как временной шаг при Spice-моделировании составил около 1 мкс ввиду рабочей частоты схемы 30 кГц, но постоянная времени тепловой части на много порядков больше (из-за больших значений тепловых емкостей корпуса транзистора и радиатора). Эта проблема электротеплового моделирования схем с очень большой разницей в постоянных времени для электронной и тепловой частей хорошо известна [7, 19].

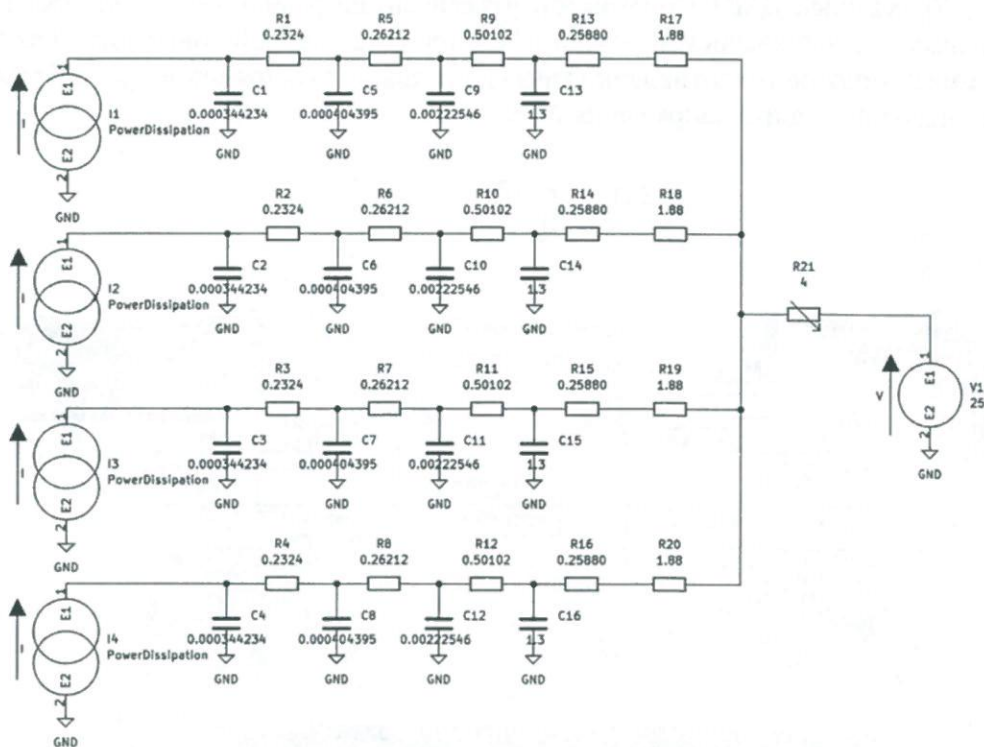


Рис. 3. Тепловая схема четырехвыходных ДМОП-транзисторов, установленных на радиаторе
 Fig. 3. Thermal subcircuit for 4 output DMOSFETs mounted on heat-sink

В работе применен следующий подход, существенно ускоряющий электротепловой расчет. При применении разработанного программного средства ST2 и подготовленной таблицы с тепловыми параметрами широко используемых корпусов силовых элементов автоматически сформирована эквивалентная тепловая подсхема для транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 с учетом их параметров корпусов и данных радиатора. Из исходной Spice-схемы управления (см. рис. 2, а) с помощью вспомогательной программы ST1 автоматически определяли средние мощности транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 при работе схемы в течение ≈ 15 мс при фиксированной температуре окружающей среды 40 °С. Далее мощности транзисторов подставляли в сгенерированную тепловую схему

(см. рис. 3) и рассчитывали температуру транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 в установившемся тепловом режиме, используя Spice-анализ только с тепловой схемой. Простая тепловая RC-цепь моделируется очень быстро. Затем итерационно с использованием программы ST3 в исходную схему управления (см. рис. 2, а) передавали значения температуры транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9, рассчитанные по тепловой схеме (см. рис. 3), и определяли новые значения мощности этих транзисторов. Процесс передачи значений температуры и мощности повторяли несколько раз. Этот итерационный процесс заканчивался, когда от итерации к итерации достигались заранее заданные небольшие изменения значений мощности и температуры силовых транзисторов (десятые доли градуса). Таким образом, потребовалось четыре итерации. На рис. 4 показаны смоделированные с помощью Spice температурные зависимости корпусов выходных силовых транзисторов от времени после четвертой итерации.

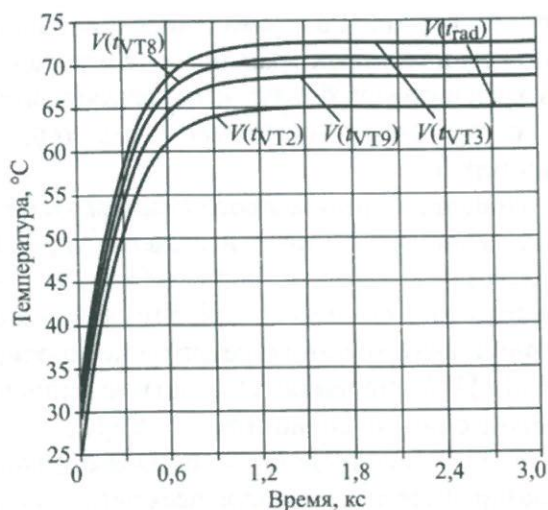


Рис. 4. Spice смоделированная зависимость температуры кристаллов МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 (см. рис. 2) и радиатора от времени после четвертой итерации по температуре и мощности

Fig. 4. Spice simulated temperature-time dependences for MOS transistors VT2, VT3, VT8, VT9 cases in the circuit fig. 2 after the 4th iteration

С помощью Spice смоделированные температурные зависимости корпусов выходных силовых транзисторов от времени после четвертой итерации.

Comsol-моделирование. Значения мощностей выходных транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 схемы управления при выходе схемы на стационарный тепловой режим передавали в пакет 3D теплового моделирования Comsol, где были сформированы 3D-описания корпусов транзисторов и радиаторов. На рис. 5, а показано 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на корпусе радиатора в пакете

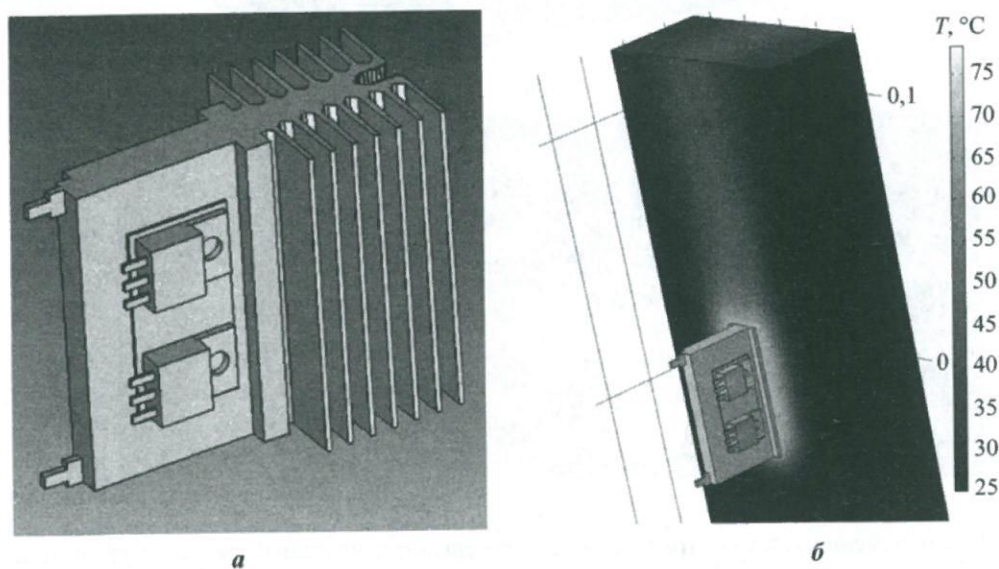


Рис. 5. 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на корпусе радиатора (а), и распределение температуры в силовых транзисторах и радиаторе (б), смоделированные в пакете Comsol
 Fig. 5. 3D view of power MOSFETs mounted on heat-sink case (a) and temperature distribution in power MOSFETs and heat-sink (b), simulated using Comsol software tool

Comsol, на рис. 5, б – смоделированное с использованием Comsol распределение температуры в силовых транзисторах и радиаторе. Полученные значения температур силовых транзисторов близки к значениям, полученным при Spice-анализе схемы, что говорит о корректности примененных тепловых параметров корпусов транзисторов и радиаторов.

Моделирование в программном комплексе «Асоника-ТМ». Для оценки распределения температуры по плате схемы управления плата вместе с мощными транзисторами описана в пакете «Асоника-ТМ». Мощности транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 определяли в процессе Spice-моделирования работы схемы при выходе ее на стационарный тепловой режим и переносили из программы Spice в программу «Асоника-ТМ» [14], значения температуры силовых элементов передавали обратно в программу Spice с помощью инструмента ST2.

На рис. 6, а представлено 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на радиаторе (для транзисторов всех четырех фаз), в программном комплексе «Асоника-ТМ». Питание подавали на два моста из четырех. На рис. 6, б показано смоделированное распределение температуры в работающих силовых транзисторах и печатной плате.

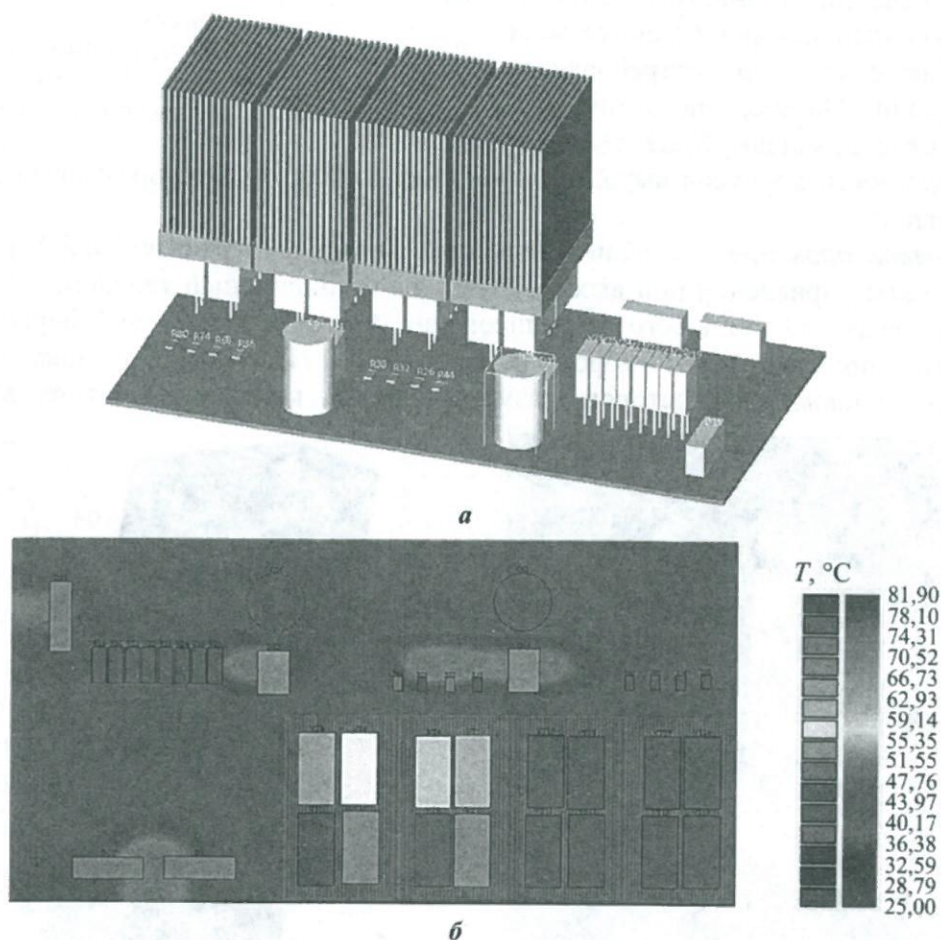


Рис. 6. 3D-изображение силовых транзисторов, размещенных на радиаторе (а), и распределение температуры в работающих силовых транзисторах и печатной плате (б), смоделированные в программном комплексе «Асоника-ТМ»

Fig. 6. 3D view of power MOSFETs mounted on heat-sink (a) and temperature distribution in operating power MOSFETs and PCB (b) simulated using Asonika-TM software tool

Тепловизионный анализ теплового режима платы схемы управления двигателем. Для исследования теплового режима платы схемы управления шаговым двигателем и проверки результатов электротеплового моделирования использовали тепловизионную камеру Flir A-40. Полученное распределение температуры на силовых транзисторах (одной фазы) в установившемся тепловом режиме представлено на рис. 7.

В таблице приведены значения температуры мощных транзисторов, полученные методом ИК-измерений и в результате моделирования с использованием программного обеспечения Spice, Comsol и «Асоника-ТМ». Видно, что полученные результаты по своим значениям соответствуют друг другу.

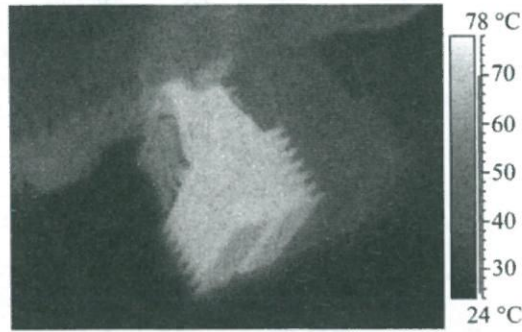


Рис. 7. Распределение температуры на силовых транзисторах (одной фазы) в установившемся тепловом режиме, измеренное с использованием тепловизора Flir A40

Fig. 7. Temperature distribution in power MOSFETs (one phase) in a steady state thermal mode, measured with Flir A40 thermal imaging camera

Значения температуры силовых транзисторов схемы управления
The power transistor temperature values

Транзистор	Мощность, Вт	ИК-измерение	Программное обеспечение		
			Spice	«Асоника-ТМ»	Comsol
VT8	3,04	72,1	70,7	66,76	73,3
VT9	1,91	72,7	68,6	55,35	71,0
VT2	0	67,7	64,9	31,37	67,4
VT3	4	74,5	72,5	77,84	75,2
Радиатор	0	67,3	64,9	–	67,4

Важнейшим параметром модуля драйвера печатной платы, напрямую связанным с тепловыми эффектами, является надежность. С этой точки зрения модуль печатной платы анализировали в жестком электротепловом режиме, соответствующем следующим условиям эксплуатации блока: температура окружающей среды 40 °С, максимальное значение сопротивления канала IRFB4615 $R_{ds\ on} = 39$ мОм, напряжение питания 28 В. Для этой цели использовали разработанную электротепловую Spice-модель ДМОП-транзистора IRFB4615.

Скачки температуры МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 для жесткого электротеплового режима, смоделированные программой Spice, представлены на рис. 8, а. Видно, что максимальные температуры перехода МОП-транзистора VT3 составляли около 115 °С, что может привести к выходу МОП-транзистора из строя. Для улучшения условий охлаждения предлагается использовать более крупный радиатор с меньшим тепловым сопротивлением $R_{\theta} = 2,5$ °С/Вт (вместо $R_{\theta} = 4,06$ °С/Вт) в условиях естественной конвекции. На рис. 8, б приведены результаты Spice-моделирования значений температуры для этого случая. Максимальные температуры перехода МОП-транзисторов достигают меньших значений (84 °С). Это приемлемо с точки зрения надежности работы схемы.

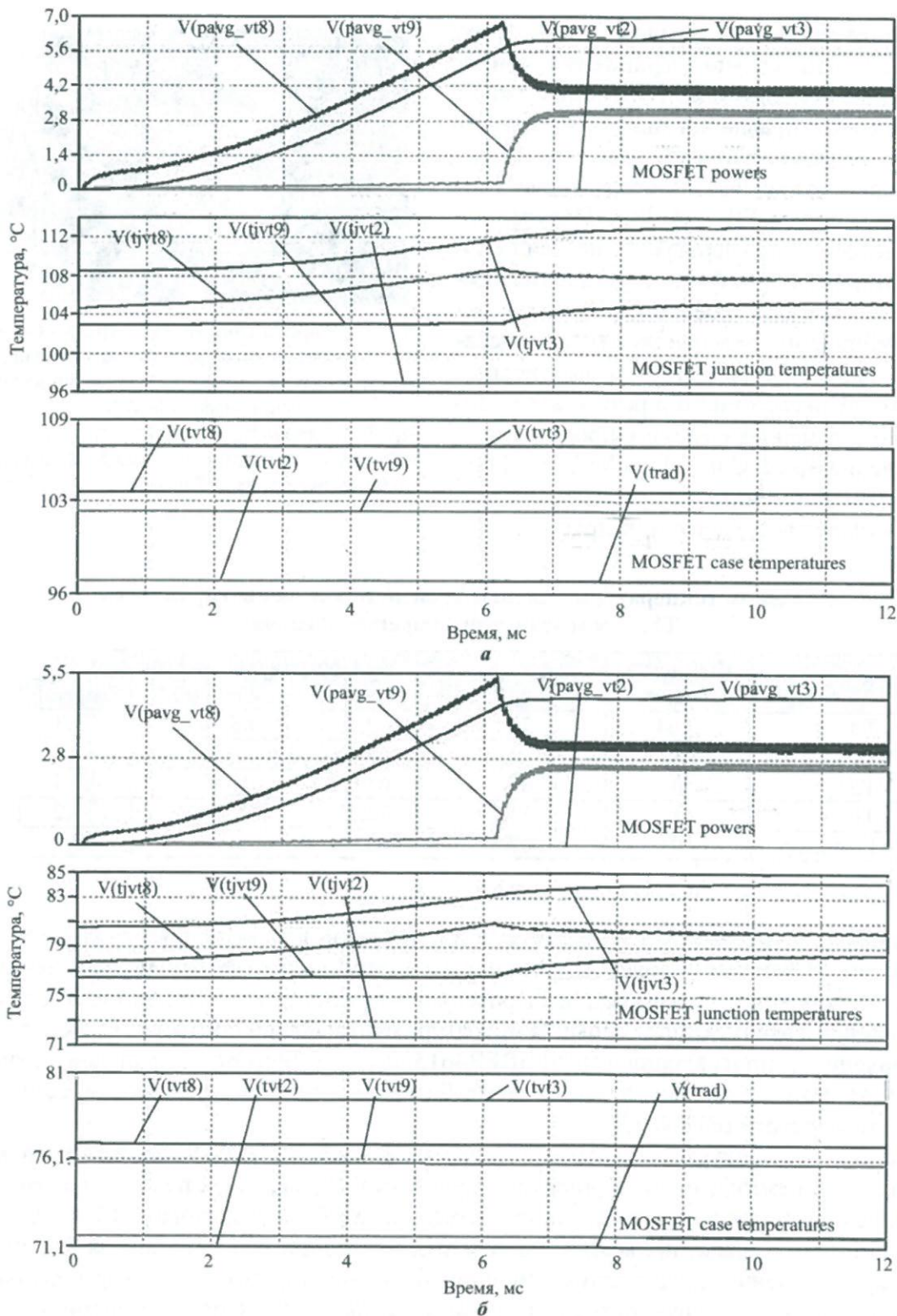


Рис. 8. Смоделированные программой Spice скачки температуры МОП-транзисторов VT2, VT3, VT8, VT9 для жесткого электротеплового режима работы схемы и исходного радиатора: а – без использования радиатора; б – с использованием радиатора с меньшим тепловым сопротивлением $R_0 = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$

Fig. 8. Spice simulated temperature jumps of MOSFETs VT2, VT3, VT8, VT9 for the most hard thermal mode of circuit and original heat-sink operation: a – without the use of heat-sink; b – in enhanced cooling conditions – using the larger heat-sink with $R_0 = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$

Заключение. Разработанные дополнительные программные средства обеспечивают: автоматизированное определение мощностей элементов схемы в программе моделирования Spice; передачу значений температуры элементов в пакет теплового моделирования (Comsol, «Асоника-ТМ» и др.); передачу значений температуры элементов схемы из пакета теплового моделирования обратно в пакет моделирования схем Spice; автоматизированную передачу значений мощностей и температур компонентов между Spice-расчетом исходной схемы и Spice-расчетом тепловой подсхемы для мощных компонентов схемы. Созданная специальная база данных тепловых характеристик для мощных компонентов, включающая в себя названия корпусов компонентов и параметры их тепловой схемы (R_{th} , C_{th}), значительно упрощает и ускоряет процесс автоматизированного формирования тепловых подсхем схем компонентов электронных модулей.

Анализ электротеплового режима реальной печатной платы управления мощным шаговым двигателем с мощными ДМОП-транзисторами показал эффективность предложенной методики. Достигнуто значительное ускорение процесса электротеплового моделирования (более чем в 10 раз) по сравнению с ручным формированием тепловой подсхемы для схемы электронных компонентов. Предложенные и проанализированные способы позволяют снизить значения температуры выходных ДМОП-транзисторов при обнаружении возможных тепловых отказов.

Литература

1. **Poppe A.** Electro-thermal simulation: Methods, tools, examples // StudyLib [Электронный ресурс]. 2004. URL: <https://studylib.net/doc/9674147/electro-thermal-simulation> (дата обращения: 20.11.2023).
2. **Shinoda T.** Three thermal simulation & test innovations for electronics equipment design // Electronics Cooling [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://www.electronics-cooling.com/2019/06/three-thermal-simulation-test-innovations-for-electronics-equipment-design/> (дата обращения: 20.11.2023).
3. **Hauck T., Teulings W., Rudnyi E.** Electro-thermal simulation of multi-channel power devices on PCB with SPICE // 2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. Leuven: IEEE, 2009. P. 124–129.
4. PSpice-COMSOL-based 3-D electrothermal–mechanical modeling of IGBT power module / **Y. Jia, F. Xiao, Y. Duan et al.** // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2020. Vol. 8. No. 4. P. 4173–4185. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2935037>
5. **Ali K. M., Sommet R., Mons S., Ngoya E.** Behavioral electro-thermal modeling of power amplifier for system-level design // 2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC). Brive La Gaillarde: IEEE, 2018. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/INMMIC.2018.8430009>
6. **Codecasa L., D'Alessandro V., Magnani A., Irace A.** Circuit-based electrothermal simulation of power devices by an ultrafast nonlinear MOR approach // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31. No. 8. P. 5906–5916. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2494500>
7. **Ma K., Blaabjerg F.** Multi-timescale modelling for the loading behaviours of power electronics converter // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal: IEEE, 2015. P. 5749–5756. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310467>
8. **Blackmore B.** The future of thermal design – earlier electrothermal analysis // Siemens Blogs [Электронный ресурс]. 17.12.2020. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/future-of-thermal-design-electrothermal-modeling-bci-rom-vhdl-ams/> (дата обращения: 12.02.2022).
9. **Eddleman D.** LTspice: SOAtherm support for PCB and heat sink thermal models // Analog Devices [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspace-soatherm-support-for-pcb-and-heat-sink-thermal-models.html> (дата обращения: 12.02.2022).
10. **Vogt H.** Tutorial: ngspice electro-thermal simulation // NGSPICE [Электронный ресурс]. URL: <http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-electrothermal-tutorial.html> (дата обращения: 22.11.2023).

11. **Blackmore B.** Electrothermal circuit simulation enabled by VHDL-AMS thermal netlists // Siemens Blogs [Электронный ресурс]. 11.09.2020. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/electrothermal-simulation-thermalnetlist-vhdl-ams-flotherm/> (дата обращения: 12.02.2022).
12. АСОНИКА [Электронный ресурс]. URL: <https://asonika-online.ru> (дата обращения: 22.11.2023).
13. COMSOL [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.com> (дата обращения: 22.11.2023).
14. The Spice page // EECS Department of the University of California at Berkeley [Электронный ресурс]. URL: <http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/> (дата обращения: 22.11.2023).
15. **Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Ryabov N. I.** Electro-thermal design of smart power devices and integrated circuits // Adv. Mat. Res. 2014. Vol. 918. P. 191–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.918.191>
16. Extension of the capabilities of SPICE analysis tools for electro-thermal simulation of power electronic circuits / **I. Kharitonov, G. Klopotov, V. Kobayakov et al.** // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow: IEEE, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802371>
17. IRFB4615PbF International Rectifier // Infineon Technologies [Электронный ресурс]. 05.09.2008. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4615pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356165a741e42> (дата обращения: 22.11.2023).
18. OMNI-UNI-30-50-D Wakefield-Vette // Mouser Electronics Europe [Электронный ресурс]. URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Wakefield-Vette/OMNI-UNI-30-50-D> (дата обращения: 12.02.2022).
19. Mission-profile-based lifetime prediction for a SiC MOSFET power module using a multi-step condition-mapping simulation strategy / **L. Ceccarelli, R. M. Kotecha, A. S. Bahman et al.** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. No. 10. P. 9698–9708. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893636>

Статья поступила в редакцию 21.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.07.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

Информация об авторах

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллиннская ул., 34), главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), kpetrosyants@hse.ru

Харитонов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, ул. Таллиннская, 34), ikharitonov@hse.ru

Тегин Михаил Сергеевич – ведущий инженер-электроник ООО «Компекс-Т» (Россия, 117630, г. Москва, Старокалужское шоссе, 62), mstegin@edu.hse.ru

References

1. Poppe A. Electro-thermal simulation: Methods, tools, examples. *StudyLib*. 2004. Available at: <https://studylib.net/doc/9674147/electro-thermal-simulation> (accessed: 20.11.2023).
2. Shinoda T. Three thermal simulation & test innovations for electronics equipment design. *Electronics Cooling*. 2019. Available at: <https://www.electronics-cooling.com/2019/06/three-thermal-simulation-test-innovations-for-electronics-equipment-design/> (accessed: 20.11.2023).

3. Hauck T., Teulings W., Rudnyi E. Electro-thermal simulation of multi-channel power devices on PCB with SPICE. *2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. Leuven, IEEE, 2009, pp. 124–129.
4. Jia Y., Xiao F., Duan Y., Luo Y., Liu B., Huang Y. PSpice-COMSOL-based 3-D electrothermal-mechanical modeling of IGBT power module. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 4173–4185. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2935037>
5. Ali K. M., Sommet R., Mons S., Ngoya E. Behavioral electro-thermal modeling of power amplifier for system-level design. *2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC)*. Brive La Gaillarde, IEEE, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/INMMIC.2018.8430009>
6. Codecasa L., D'Alessandro V., Magnani A., Irace A. Circuit-based electrothermal simulation of power devices by an ultrafast nonlinear MOR approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 8, pp. 5906–5916. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2494500>
7. Ma K., Blaabjerg F. Multi-timescale modelling for the loading behaviours of power electronics converter. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Montreal, IEEE, 2015, pp. 5749–5756. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310467>
8. Blackmore B. The future of thermal design – earlier electrothermal analysis. *Siemens Blogs*. 17.12.2020. Available at: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/future-of-thermal-design-electrothermal-modeling-bci-rom-vhdl-ams/> (accessed: 12.02.2022).
9. Eddleman D. LTspice: SOAtherm support for PCB and heat sink thermal models. *Analog Devices*. Available at: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-soatherm-support-for-pcb-and-heat-sink-thermal-models.html> (accessed: 12.02.2022).
10. Vogt H. Tutorial: ngspice electro-thermal simulation. *NGSPICE*. Available at: <http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-electrothermal-tutorial.html> (accessed: 22.11.2023).
11. Blackmore B. Electrothermal circuit simulation enabled by VHDL-AMS thermal netlists. *Siemens Blogs*. 11.09.2020. Available at: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/electrothermal-simulation-thermalnetlist-vhdl-ams-flotherm/> (accessed: 12.02.2022).
12. *ASONIKA*. Available at: <https://asonika.com> (accessed: 22.11.2023).
13. *COMSOL*. Available at: <https://www.comsol.com> (accessed: 22.11.2023).
14. The Spice page. *EECS Department of the University of California at Berkeley*. Available at: <http://bwrce.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/> (accessed: 22.11.2023).
15. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Ryabov N. I. Electro-thermal design of smart power devices and integrated circuits. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 918, pp. 191–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.918.191>
16. Kharitonov I., Klopotov G., Kobayakov V., Tegin M., Silchenko E., Ivlev K., Loktionov D. Extension of the capabilities of SPICE analysis tools for electro-thermal simulation of power electronic circuits. *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, IEEE, 2022, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802371>
17. IRFB4615PbF International Rectifier. *Infineon Technologies*. 05.09.2008. Available at: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4615pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356165a741e42> (accessed: 22.11.2023).
18. OMNI-UNI-30-50-D Wakefield-Vette. *Mouser Electronics Europe*. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Wakefield-Vette/OMNI-UNI-30-50-D> (accessed: 12.02.2022).
19. Ceccarelli L., Kotecha R. M., Bahman A. S., Iannuzzo F., Mantooth H. A. Mission-profile-based life-time prediction for a SiC MOSFET power module using a multi-step condition-mapping simulation strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 10, pp. 9698–9708. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893636>

The article was submitted 21.07.2023; approved after reviewing 27.07.2023;
accepted for publication 15.12.2023.

Information about the authors

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya st., 34), Chief Researcher, Institute of Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Igor A. Kharitonov – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya st., 34), ikharitonov@hse.ru

Mikhail S. Tegin – Leading Electronics Engineer, “Компех-Т” LLC (Russia, 117630, Moscow, Starokaluzhskoe ave., 62), mstegin@edu.hse.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: <http://presskiosk.ru/categories>
- через редакцию – с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: www.rucont.ru; www.akc.ru;
www.pressa-rf.ru
- ООО «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru