

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

## TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.391.31

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ СТЕКА ЯЧЕЙКИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ЕЕ НАДЕЖНОСТЬ

П. А. Максимов<sup>1</sup>, А. С. Ишков<sup>2</sup>, М. К. Маркелов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

<sup>2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> agdvs8880@gmail.com, <sup>2,3</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Печатные платы современных аналоговых, цифровых и цифроаналоговых электронных устройств средней сложности и выше имеют основу в виде стека – набора слоев различного назначения, прессуемых впоследствии в единую печатную плату. Материалы, используемые для формирования данных слоев, играют существенную роль в дальнейшей работоспособности электронного устройства, так как обладают различными электрическими, тепловыми и механическими параметрами, определяющими достоинства того или иного их стека и, соответственно, возможные ограничения выполненного на его основе устройства. *Материалы и методы.* Качество материалов, используемых для печатных плат, характеризуется множеством технических параметров, которые могут существенно влиять на характеристики конечных электронных устройств. Негативное влияние материалов стека печатной платы может проявиться как непосредственно после изготовления изделия, так и в процессе эксплуатации, приводя к мгновенным или задержанным во времени отказам разных видов критичности. *Результаты.* Установлено, что в условиях производства современных электронных устройств и печатных плат для них, в том числе работающих в высокочастотных диапазонах, на качество их работы могут влиять самые различные факторы. В работе показано, что с целью максимального снижения возможных рисков, связанных с различными физическими явлениями и возникающими паразитными параметрами материалов печатной платы, необходимо проведение моделирования ее работы с учетом возможных параметров используемых материалов и их влияния как минимум на самые критичные участки – печатный монтаж, места установки микросхем и других радиоэлементов. Определены значения количества теплоты, выделяемой с единицы ее площади, так как многие характеристики электронных компонентов и материалов печатных плат, их работоспособность зависит от температурного режима, в пределах которого они работают. *Вывод.* Выполненные исследования позволяют исключить возможные последствия повышения температуры в устройстве, например, изменение формы передаваемых сигналов, деградация материалов, тепловое расширение элементов платы и, как следствие, разрыву или повреждению медных дорожек на стыке – наружный слой-переходное отверстие.

**Ключевые слова:** печатная плата, стек, топологическое моделирование, HyperLynx, материалы печатных плат

**Для цитирования:** Максимов П. А., Ишков А. С., Маркелов М. К. Исследование влияния параметров материалов стека ячейки защиты информации на ее надежность // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 54–63. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

### INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INFORMATION SECURITY CELL STACK MATERIAL PARAMETERS ON ITS RELIABILITY

P.A. Maksimov<sup>1</sup>, A.S. Ishkov<sup>2</sup>, M.K. Markelov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

<sup>2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> agdvs8880@gmail.com, <sup>2,3</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* Printed circuit boards of modern analog, digital and digital-analog electronic devices of medium complexity and higher have a base in the form of a stack-a set of layers for various purposes, which are subsequently pressed into a single printed circuit board. The materials used for the formation of these layers play a significant role in the further performance of the electronic device, since they have different electrical, thermal and mechanical parameters that determine the advantages of a particular stack and, accordingly, the possible limitations of the device made on its basis. *Materials and methods.* The quality of the materials used for printed circuit boards is characterized by a variety of technical parameters that can significantly affect the characteristics of the final electronic devices. The negative impact of the materials of the printed circuit board stack can manifest itself both immediately after the manufacture of the product, and during operation, leading to instantaneous or delayed failures of various types of criticality. *Results.* It is established that in the conditions of production of modern electronic devices and printed circuit boards for them, including those operating in high-frequency bands, the quality of their work can be influenced by a variety of factors. The paper shows that in order to minimize the possible risks associated with various physical phenomena and the resulting parasitic parameters of printed circuit board materials, it is necessary to conduct a simulation of its operation, taking into account the possible parameters of the materials used and their impact on at least the most critical areas – the printed circuit board, the installation sites of microcircuits and other radio elements. The values of the amount of heat released per unit of its area are determined, since many characteristics of electronic components and printed circuit board materials, their performance depends on the temperature regime within which they operate. *Conclusions.* The performed studies allow us to exclude possible consequences of an increase in temperature in the device, for example, a change in the shape of the transmitted signals, degradation of materials, thermal expansion of the board elements and, as a result, rupture or damage to the copper tracks at the junction-the outer layer-the transition hole.

**Keywords:** printed circuit board, stack, topological modeling, HyperLynx, printed circuit board materials

**For citation:** Maksimov P.A., Ishkov A.S., Markelov M.K. Investigation of the influence of information security cell stack material parameters on its reliability. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 54–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-7

### Введение

Современная электронная аппаратура, а также важность, объемность решаемых ею задач заставляют предъявлять к надежности ее работы высокие требования. Актуальной задачей является прогнозирование различных побочных эффектов и паразитных параметров, которые могут ухудшать надежность печатной платы, реализующей электрическую принципиальную схему электронной аппаратуры. Основными такими негативными явлениями, которые вызваны свойствами материалов печатной платы, могут быть фазовые задержки, появляющиеся в линиях связи и печатном монтаже, перегрев печатной платы и ее элементов [1–3].

При этом с возрастанием сложности проектируемой аппаратуры, увеличением количества используемых элементов и слоев в печатных платах в разы возрастает и сложность анализа конечного устройства. В результате не вызывает сомнений тот факт, что без использования макетирования и моделирования прогнозировать появление тех или иных побочных явлений в работе печатной платы становится практически невозможным.

В разрезе проведения испытаний для оценки надежности функционирования устройства до его выпуска в серийное производство можно выделить два основных способа – макетирование и моделирование. В случае анализа влияния основных параметров, используемых для печатных плат материалов, предпочтительней именно второй вариант. Моделирование позволяет без использования дорогостоящего оборудования и значительных временных затрат, возможного использования нескольких макетов произвести моделирование многослойной печатной платы.

Хотя математический подход имеет свои ограничения на используемые модели реальных физических объектов и прочие ограничения, связанные с применением современного математического аппарата, его проведение гораздо более выгодно и требует лишь учета ограничений, налагаемых реализацией соответствующих моделей и алгоритмов.

В настоящее время для моделирования многослойной печатной платы, упрощенная схема которой приведена на рис. 1, широко применяется комплекс программных средств HyperLynx, предназначенный для моделирования, анализа и верификации проектов печатных плат.

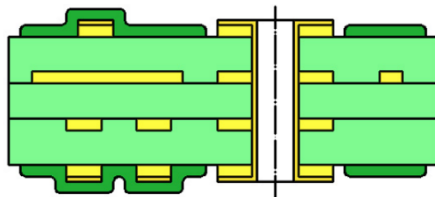


Рис. 1. Упрощенная схема многослойной печатной платы, состоящей из четырех слоев

Предварительный анализ, в том числе с использованием топологического моделирования в программе HyperLynx, позволит с достаточной степенью достоверности определить различные параметры печатной платы [4–6]. Это позволяет повысить повторяемость сложных изделий, заранее учитывая возможные явления и устраняя спектр разнообразных ошибок, в том числе связанных с выбором материалов стека.

### *Описание свойств и функционала моделируемого объекта*

Используя программу HyperLynx, можно провести общую оценку влияния некоторых параметров материалов на параметры функционирования печатной платы до этапа изготовления ее опытного образца с целью прогнозирования влияния материалов печатной платы на работу изделия.

Известно, что основными свойствами материалов печатных плат являются: диэлектрическая постоянная, тангенс угла потерь, теплопроводность, коэффициент расширения, удельное сопротивление, пробивное напряжение, механическая стойкость, влагостойкость и др. [8–10].

Для проведения исследований была разработана печатная плата ячейки защиты информации (рис. 2), которая представляет из себя два вычислительных узла, приемный и передающий, каждый из которых, соответственно, принимает и декодирует с последующей передачей в систему входной поток данных.

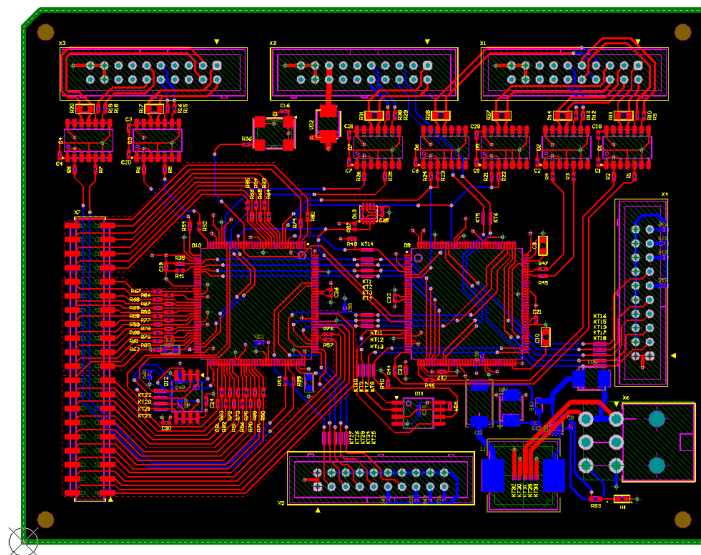


Рис. 2. Печатная плата ячейки защиты информации

С любыми внешними устройствами данная ячейка связана интерфейсными микросхемами и разъемами, к которым подведены линии различных интерфейсов передачи данных. Присутствуют как параллельные линии данных, так и последовательные, в том числе дифференциальные. Структура и расположение элементов соответствуют типовым расположениям, применяемым во многих цифровых устройствах. Также имеется и схема питания, вынесенная стандартно на край печатной платы, состоящая из диодов, защищающих схему от переполюсовки при неправильном подключении разъема питания, понижающего импульсного стабилизатора и фильтрующих цепей. Разработанная печатная плата ячейки защиты информации позволяет произвести не только моделирование данного изделия, но и с некоторой погрешностью

произвести оценку работы других возможных электронных элементов со схожими структурой и принципами функционирования.

### *Методика проведения моделирования*

Используя моделирование, можно оценить влияние диэлектрической проницаемости и теплопроводности на параметры работы ячейки защиты информации. Впоследствии это позволит выбрать структуру, перечень применяемых материалов и конструкцию печатной платы. Методика проведения моделирования следующая. Имеющаяся модель печатной платы загружается в программу HyperLynx. Далее происходит последовательная настройка параметров стека в соответствии с заданными параметрами, типичными для применяемых классов материалов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры диэлектрических материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Теплопроводность
FR-4	5,4	0,25
ФАФ-4Д	2,5	
IMS-20		2

По итогам выполненного моделирования делаются выводы, производится оценка полученных результатов.

### *Моделирование топологии ячейки*

Моделирование влияния диэлектрической постоянной материалов выполнено с использованием линии данных интерфейса FSMC (рис. 3). Данный параллельный интерфейс выбран по ряду причин – он один из наиболее протяженных, разведен в соответствии с правилами разводки для высокоскоростных интерфейсов и имеет общие параметры с линиями, которые используются для иных интерфейсов типа parallel, parallel LVDS, DDR, QDR. Таким образом, данный интерфейс позволяет оценить влияние диэлектрической проницаемости на сигналы в подобных линиях данных.

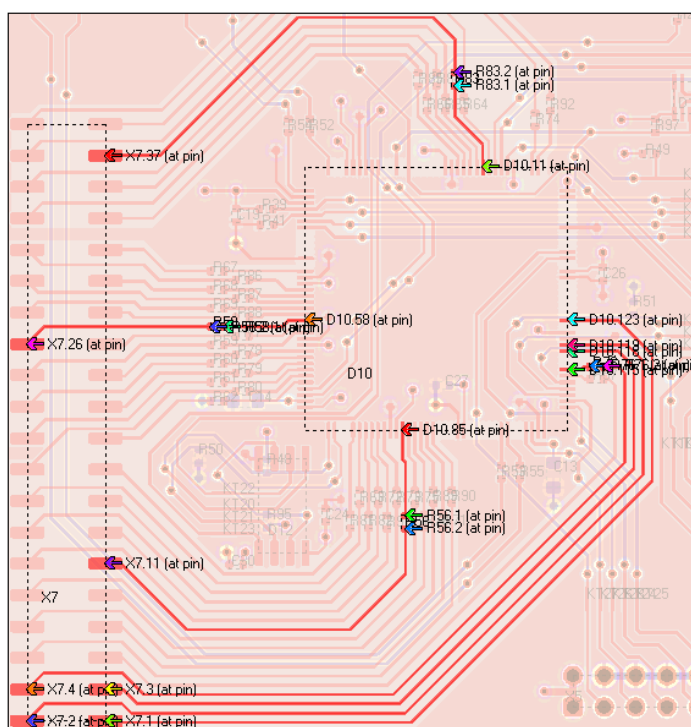


Рис. 3. Линии параллельного интерфейса, выбранные для проведения моделирования

Перед непосредственной оценкой влияния диэлектрической проницаемости материала ( $\mu$ ) печатной платы на сигналы в линиях стоит оговориться, что программа HyperLynx не позволяет учитывать неоднородности в материалах, будь то медные трассы или материал диэлектрика, считая все материалы однородными [9, 10]. Несмотря на это, общая оценка параметров при выборе тех или иных материалов позволит оценить и максимальные отклонения при известных отклонениях параметров материала от номинальных.

Вначале проведем моделирование влияния материала диэлектрика на значение задержки сигнала в линиях, выбирая материалы FR-4 и ФАФ-4Д, значение диэлектрической проницаемости которых отличается примерно вдвое (рис. 4). Для этого выберем самую длинную линию, соответствующую выводу D10.123 микроконтроллера, и проанализируем сигнал частотой 500 МГц в ней. Для выводов будем использовать модель вывода SDRAM\_DQ микросхемы ПЛИС Virtex4\_FF896, поставляемой производителем, так как ее параметры позволяют проводить моделирование с достаточной степенью адекватности на достаточно высоких выбранных частотах.

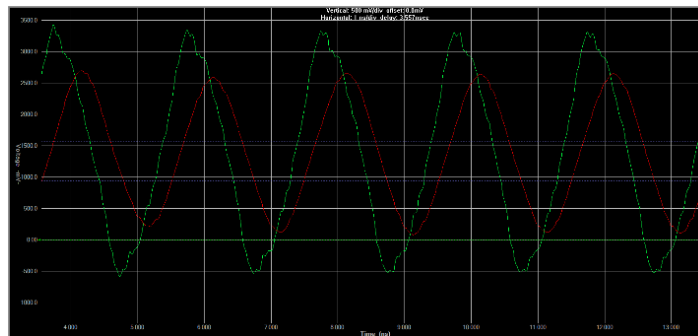


Рис. 4. Разница уровней напряжений в одной и той же линии при значении частоты 500 МГц и значениях  $\mu = 5,4$  и  $\mu = 2,4$

На полученной осциллограмме видно, что уровни сигналов в одной и той же линии различаются на значение примерно в 0,8 В. Другими словами, в линии одной и той же длины затухание может составлять до  $2/7$  от амплитуды сигнала, что с учетом случайных воздействий на печатную плату вызывает необходимость учитывать длины линий и количество элементов в линии, потери в которых в совокупности с потерями в линии могут повлиять на стабильный прием и передачу данных.

Другое важное влияние, оказываемое материалом диэлектрика и значением его диэлектрической проницаемости на параметры сигналов в линии – возрастающая со значением  $\mu$  диэлектрика фазовая задержка, которая в ряде случаев может привести к неверному считыванию данных с параллельной шины, либо рассинхронизации двух устройств, тактируемых по одной линии со значительной задержкой распространения.

На рис. 5 приведены результаты моделирования для материала FR-4, причем для исследования выбраны различные линии интерфейса, указанные на рис. 3. Они имеют разную длину, часть из них не имеет элементов в своем составе, в части присутствуют согласующие резисторы, которые также влияют на задержку, так как образуют с распределенными емкостями RC-цепочки.

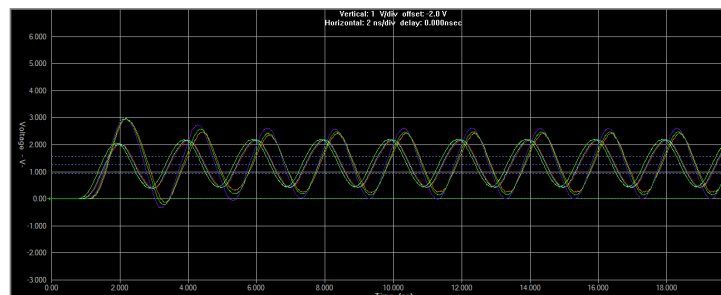


Рис. 5. Задержка сигналов в линиях параллельной шины при  $f = 500$  МГц и  $\mu = 5,4$

В результате моделирования установлено, что даже в линиях, близких по длине, фаза приходящих на разъем сигналов различается. При различии же длин линий на сантиметры задержка между линиями может составлять угол, равный  $90^\circ$ , что приведет к неверному считыванию устройством принимаемых данных.

На следующей осциллограмме (рис. 6) видно, что при уменьшении  $\mu$  материала в два раза различия в скорости распространения сигналов в различных линиях практически исчезают.

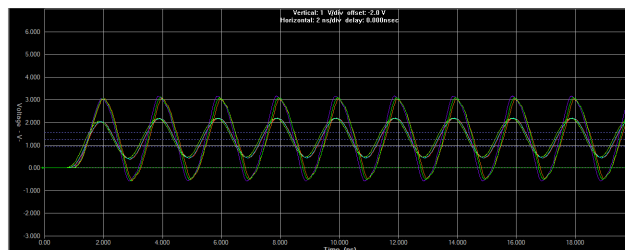


Рис. 6. Задержка сигналов в линиях параллельной шины при  $f = 500$  МГц и  $\mu = 2,4$

Другим важным параметром, прямо влияющим на функционирование ячейки памяти, является количество теплоты, выделяемой с единицы ее площади, так как многие характеристики электронных компонентов и материалов печатных плат, их работоспособность зависят от температурного режима, в пределах которого они работают. В частности, температурные значения определяют необходимые ширины медных поясков вокруг переходных отверстий, также допустимые максимальные токи в проводящих слоях, сопротивления сигнальных линий, токи утечки микросхем и другие важные параметры устройства.

При рассмотрении печатной платы с точки зрения ее тепловых параметров обычно говорят о рассеиваемой мощности отдельных элементов и суммарной мощности, выделяемой печатной платой в виде тепла. Основным свойством, способствующим теплообмену между источником и средой, является теплопроводность используемого материала и его площадь соприкосновения чаще всего с воздушной средой, а также смежные параметры – наличие рядом других источников тепла, конвекция и скорость воздушных потоков в близком пространстве, геометрия самой печатной платы и располагаемых на ней элементов.

Для проведения моделирования для используемой ячейки было выбрано два материала – стандартный FR-4 и специальный материал с металлическим основанием IMS-20. Условия нормальные, начальная температура воздуха  $20^\circ\text{C}$ , присутствуют небольшие воздушные потоки со скоростями  $1\text{--}4$  см/с с обеих сторон платы. Для первого этапа моделирования использовались дополнительные условия – печатная плата одна и находится в закрытом корпусе, температура стенок которого  $20^\circ\text{C}$ , мощности рассеяния основных элементов платы равны половинным значениям, что примерно соответствует реальной нагрузке на устройство, тепло-выделение разъемов и пассивных элементов (за исключением индуктивности) отсутствует. Для материала FR-4 получено изображение распределения температуры, приведенное на рис. 7.

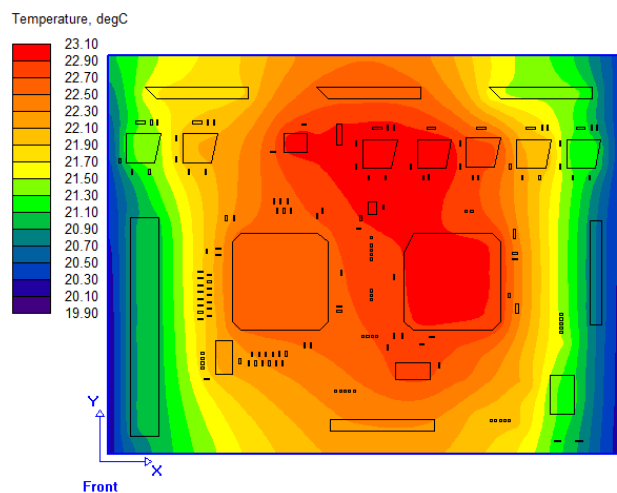


Рис. 7. Распределение температуры для материала FR-4

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при заданных условиях моделирования максимум температуры в  $23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  возникает между правым микроконтроллером и интерфейсными микросхемами, что вызвано их тепловыделением и расположением элементов на плате. Данный микроконтроллер с трех сторон окружен другими выделяющими тепло микросхемами, не дающими теплу распространяться по площади печатной платы, ограничивая способность накапливаемого тепла к рассеянию во всех направлениях, что и создает данную область относительно повышенной температуры.

Если провести моделирование с теми же параметрами, используя материал типа IMS-20 (рис. 8), то можно увидеть, что площадь области наибольшей температуры расширилась, а температура при этом возросла.

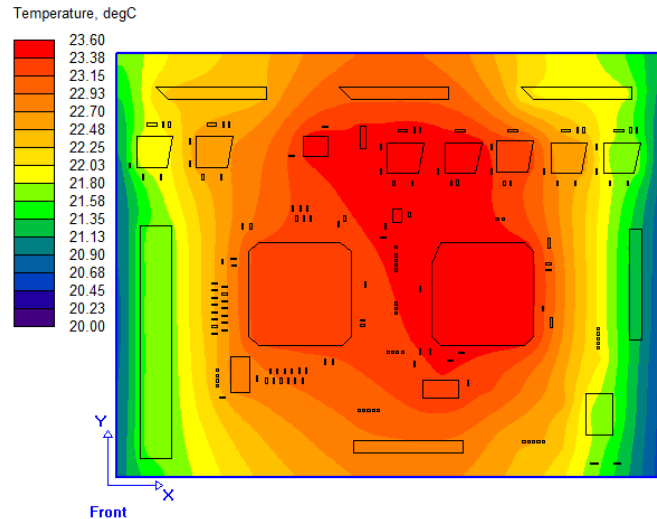
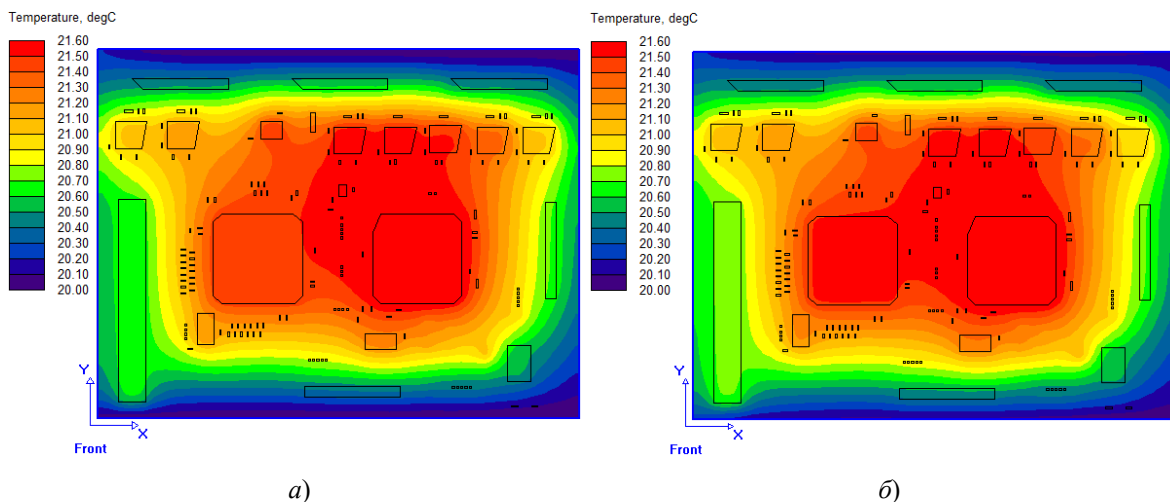


Рис. 8. Распределение температуры для материала типа IMS-20

Причинами такого явления при возросшей теплопроводности материала диэлектрика является его изоляция на подавляющем протяжении печатной платы от внешней среды, что приводит к накоплению тепла на внутренних слоях.

Таким образом, данные результаты можно рассматривать как предостережение от использования материала с большей теплопроводностью, особенно при наличии элементов, рассеивающих значительные мощности.

Выполнено исследование распределения температуры на печатной плате с различными диэлектриками в условиях обдувания потоком воздуха. Скорость воздуха  $400\text{ см/с}$  в направлении  $-X$  для материала FR-4 (рис. 9,а), для материала типа IMS-20 (рис. 9,б).



а)

б)

Рис. 9. Распределение температуры по печатной плате

В обоих случаях можно увидеть как изменение распределения «температурных фигур», так и падение общей температуры печатной платы до одинакового значения в 21,6 °С, что говорит о значительном влиянии наличия воздушного потока на результирующую температуру устройства.

Получены изображения распределения температуры по печатной плате при наличии помимо исследуемой платы в одном корпусе дополнительных, например платы питания, при отсутствии воздушного потока внутри устройства. На рис. 10 приведено изображение печатной платы, которая содержит силовую плату с мощностью 30 Вт (слева) и информационную плату с мощностью 4 Вт (справа) для материала FR-4 (рис. 10,а), для материала типа IMS-20 (рис. 10,б).

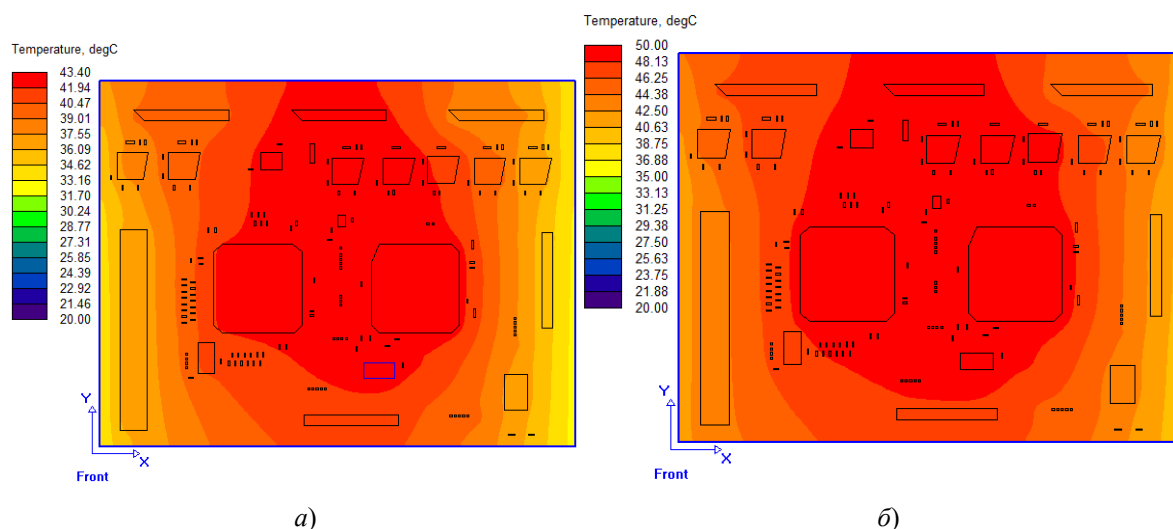


Рис. 10. Распределение температуры по печатной плате

Таким образом, результаты моделирования на рис. 10 свидетельствуют о том, что наличие дополнительных печатных плат иного функционала или других устройств в непосредственной близости от исследуемого образца приведет к резкому повышению температуры устройства. Возможными последствиями этого может быть изменение формы передаваемых сигналов, деградация материалов, тепловое расширение элементов платы и, как следствие, разрыв или повреждение медных дорожек на стыке «наружный слой – переходное отверстие».

Предупредить данное явление можно использованием, во-первых, простейших радиаторов на элементах, выделяющих большое количество теплоты, обеспечивая дополнительный путь исходящему от них тепловому потоку, применением диэлектриков с металлическим основанием на одной из сторон платы. Другим способом является использование заполненных теплопроводными материалами переходных отверстий и винтов, через которые тепловые потоки смогут циркулировать и рассеиваться как на другие части платы, так и в окружающее пространство.

### Заключение

Проведено моделирование печатной платы ячейки защиты информации в программе HyperLynx с учетом влияния диэлектрических и тепловых параметров используемых материалов. Оценено влияние диэлектрической постоянной материала на скорость распространения сигналов и их амплитуду. Приведены изображения теплового распределения для одиночной платы с учетом реальных потребляемых мощностей с используемым диэлектриком и моделью диэлектрика с повышенной теплопроводностью на основе материала IMS-20. Проведено моделирование плат с учетом наличия теплового потока, а также печатных плат с различным количеством выделяемого тепла, даны некоторые советы по уменьшению температуры печатной платы и ее элементов.



## Список литературы

1. Джонсон Г., Грэхем М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. М. : Вильямс, 2006. 624 с.
2. Collin R. E. Foundations for microwave engineering. 2 ed. New York : McGraw-Hill, 1992. 924 p.
3. Трундов А. В. Практические рекомендации по проектированию печатных плат. М. : Издательские решения, 2020. 180 с.
4. Hnatiuc M., Iov C. J. Cooling with Mentor Graphics HyperLynx Thermal // IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Bucharest, 2014. P. 250–265.
5. Jinhui Li, Huabo Duan, Keli Yu, Siting Wang. Interfacial and Mechanical Property Analysis of Waste Printed Circuit Boards Subject to Thermal Shock // Journal of the Air & Waste Management Association. 2010. Vol 60. P. 229–236.
6. Jiang N., Novak J., Li X. [et al.]. Power Electronics PCB Concept Supports Thermal Management // Power Electronics Technology. 2012. Vol 39. P. 23–27.
7. Coonrod J. The Impact of Electrical and Thermal Interactions on Microwave PCB Performance // Microwave Journal. 2014. Vol. 57. P. 68–78.
8. Zhang H. HyperLynx Simulation and PCB Design. Beijing : Mechanical Industry Press, 2005. 257 p.
9. Yang M., Liang S. Application of HyperLynx in the Development of High Speed Signal Processing Circuits // IEEE 5th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, 2019. P. 743–751.
10. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx // Electronic Devices. 2009. Vol. 32. P. 445–451.

## References

1. Dzhonson G., Grekhem M. *Konstruirovaniye vysokoskorostnykh tsifrovyykh ustroystv = Designing high-speed digital devices*. Moscow: Vil'yams, 2006:624. (In Russ.)
2. Collin R.E. *Foundations for microwave engineering*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1992:924.
3. Trundov A.V. *Prakticheskie rekomendatsii po proektirovaniyu pechatnykh plat = Practical recommendations for the design of printed circuit boards*. Moscow: Izdatel'skie resheniya, 2020:180. (In Russ.)
4. Hnatiuc M., Iov C.J. Cooling with Mentor Graphics HyperLynx Thermal. *IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. Bucharest, 2014:250–265.
5. Jinhui Li, Huabo Duan, Keli Yu, Siting Wang. Interfacial and Mechanical Property Analysis of Waste Printed Circuit Boards Subject to Thermal Shock. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010;60:229–236.
6. Jiang N., Novak J., Li X. [et al.]. Power Electronics PCB Concept Supports Thermal Management. *Power Electronics Technology*. 2012;39:23–27.
7. Coonrod J. The Impact of Electrical and Thermal Interactions on Microwave PCB Performance. *Microwave Journal*. 2014;57:68–78.
8. Zhang H. *HyperLynx Simulation and PCB Design*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005:257.
9. Yang M., Liang S. Application of HyperLynx in the Development of High Speed Signal Processing Circuits. *IEEE 5th International Conference on Computer and Communications*. Chengdu, 2019:743–751.
10. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx. *Electronic Devices*. 2009;32:445–451.

## Информация об авторах / Information about the authors

**Павел Андреевич Максимов**

инженер-программист,  
Пензенский научно-исследовательский  
электротехнический институт  
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)  
E-mail: agdvs8880@gmail.com

**Pavel A. Maksimov**

Software engineer,  
Penza Research Electrotechnical Institute  
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

**Антон Сергеевич Ишков**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Anton S. Ishkov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of sub-department  
of radio engineering and radio electronic system,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Максим Константинович Маркелов**

старший преподаватель кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Maksim K. Markelov**

Senior lecturer of sub-department  
of radio engineering and radio electronic system,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 12.04.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2021**

**Принята к публикации/Accepted 28.05.2021**