

Особенности теплового анализа 3D-микросборки вычислительной системы с бескорпусной программируемой логической интегральной схемой

Д.В. Вертянов, С.С. Евстафьев, Д.С. Лабутин, А.М. Силантьев

Научно-исследовательский университет МИЭТ

Аннотация: Технологии трёхмерной интеграции на основе высокоинтегрированных подложек и бескорпусных микросхем позволяют решить задачу миниатюризации сложно-функциональных устройств. Однако увеличение сложности и уменьшение массогабаритных параметров изделий приводит к проблемам эффективного распределения и отвода тепла от бескорпусных микросхем. В статье рассмотрены особенности и проблемы теплового анализа 3D-микросборки вычислительной микросистемы на основе нескольких модулей с бескорпусными микросхемами, а также показана важность моделирования реального тепловыделения программируемых логических интегральных схем.

Ключевые слова: микросборка, микросистема, бескорпусная микросхема, программируемая логическая интегральная схема, тепловой анализ, система автоматизированного проектирования, метод конечных элементов, моделирование теплообмена, печатная плата, трёхмерная интеграция.

Введение

В современной технике одним из перспективных путей уменьшения массогабаритных параметров, повышения технических характеристик и оптимизации стоимости электронных средств, является технология трехмерной интеграции. Такая технология позволяет перейти от «горизонтального» размещения компонентов на печатной плате к созданию «вертикальных» сборок из коммутационных плат, установленных в едином корпусе или даже к сборкам из отдельных кристаллов, соединяемых напрямую или через коммутационные подложки-интерпозеры.

При проектировании таких устройств важной задачей является тепловой расчет проектируемой конструкции. Конструктору необходимо принимать во внимание тепловыделение каждого отдельного кристалла в сборке, взаимодействие между ними, особенности размещения кристаллов на плате или в сборке, а также функционал самих кристаллов. Отдельную

проблему могут представлять собой кристаллы программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [1,2], тепловыделение которых напрямую зависит от тех функций, что закладываются разработчиком устройства и могут колебаться в значительных пределах.

В настоящее время для совершения таких тепловых расчетов разработчики применяют специализированные системы автоматизированного проектирования (САПР) с функциями вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD), которые позволяют оценить тепловые параметры разрабатываемой системы с учетом динамики среды, в которой находится устройство.

Моделирование уровней 3D микросборки с помощью САПР с CFD

Для моделирования с помощью CFD было выбрано устройство, представляющее собой вычислительное устройство, реализованное в виде 3D-микросистемы. Микросистема включает четыре функциональных уровня: управления, преобразователей сигналов, интерфейсов ввода-вывода и преобразователей питания. Каждый уровень содержит многослойную подложку из стеклотекстолита FR-4, со смонтированными на неё бескорпусными активными и пассивными кремниевыми элементами. Уровни соединяются между собой посредством вертикальной коммутации, расположенной по торцу микросистемы. Монтаж активных элементов на подложки осуществляется методом микросварного соединения золотой проволокой, а пассивных элементов - методом поверхностного монтажа.

Для выполнения задач по исследованию теплообмена элементов многокристальной сборки применялась САПР для моделирования течений и тепловых процессов, основанная на методе конечных объемов. САПР позволяет проводить трёхмерные вычисления в области гидродинамики и анализировать показатели теплопередачи. Система представляет собой полнофункциональное решение инженерных задач в области

гидрогазодинамики и теплообмена, встроенное в основные системы MCAD, такие как NX, Creo, CATIA V5, Solid Edge и SolidWorks [3].

Типовой процесс моделирования включает в себя следующие этапы: упрощение изделия, создание расчетной модели, задание граничных условий, постановка задачи и её последующее решение, проведение анализа, принятие решения о необходимости изменений в конструкции изделия [3].

В большинстве современных САПР принцип работы CFD-анализа основан на методе конечных объёмов. Рассмотрим его на примере стационарного уравнения теплопроводности:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S = 0, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплопроводности, T – температура, S – скорость выделения теплоты в единице объема.

В соответствии с геометрией САПР разбивает тепловую модель на множество непересекающихся подобластей объёма V_i – создаёт сетку. Пользователь имеет возможность увеличивать и уменьшать плотность её дробления, тем самым влияя на точность проведения расчета.

Проинтегрируем уравнение (1) по объему ячейки V_i :

$$\int_{V_i} \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy + \int_{V_i} \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dx dy + \int_{V_i} \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dx dy + \int_{V_i} S dx dy = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает баланс тепла внутри одной из подобластей. С помощью системы из уравнений данного вида можно описать распределение тепла по всей расчетной области.

Для моделирования тепловых процессов необходимо задание условий: температуры и давления окружающей среды, материалов компонентов сборки, а также мощности, либо температуры тепловых источников. При определении материала в САПР имеется возможность задавать его свойства: удельную теплоемкость, коэффициент теплопроводности, температуру

плавления и другие, что играет роль при создании картин распределения тепла.

Для оценки температурного режима бескорпусных микросхем (кристаллов) часто применяется более простая двухрезисторная модель. Такую модель имеет смысл применять в случаях анализа печатных плат и блоков. В отличие от детализованной тепловой модели, она является менее точной, но обладает нулевым размером сетки, что позволяет значительно ускорить процесс выполнения теплового расчета при проведении теплового анализа [3].

Руководствуясь результатами CFD-анализа в САПР, разработчик устройства может вносить изменения в конструкцию устройства, предотвратив явления, негативно сказывающиеся на работоспособности и сроке его службы.

Ниже приведены результаты моделирования тепловой нагрузки одного из отдельных функциональных уровней системы, проведенного в CFD САПР (рис.1).

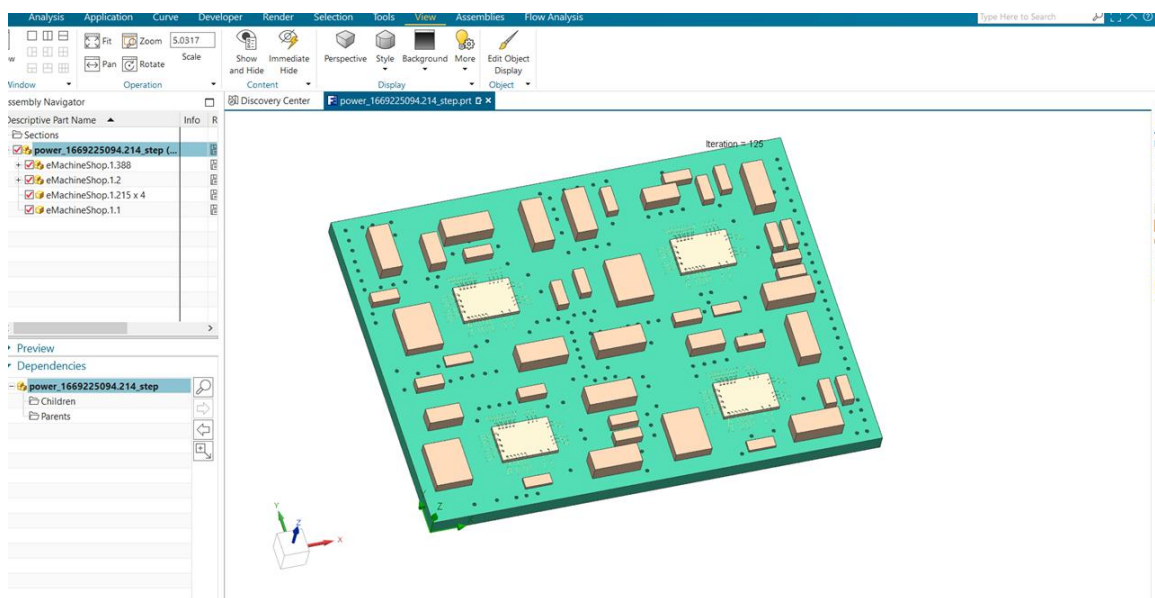


Рис. 1. – Анализ конструкции модуля преобразователей питания в CFD САПР

Моделируемый модуль содержит такие элементы, как бескорпусные микросхемы понижающего преобразователя напряжения (К1310ПН1У производства Миландр, РФ), и пассивные компоненты (конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы.) Бескорпусные микросхемы имеют большое преимущество в данном типе изделий благодаря меньшим габаритным размерам, которые позволяют плотнее расположить их в объеме сборки [3-5].

Анализ всех тепловых процессов проводился при следующих общих условиях:

- Тип анализа: внешний;
- Среда: воздух, атмосферное давление - 101325Па, температура - 20°C;
- Учет явлений: течение жидкости (турбулентное и ламинарное), учет теплопроводности, гравитация (-9.81 м/с^2), влияние излучения не учитывается.

Анализ модуля преобразователей питания проводился для тепловыделения элементов К1310ПН1У (1 шт.) равным 2 мВт. Результаты представлены на рис.2.

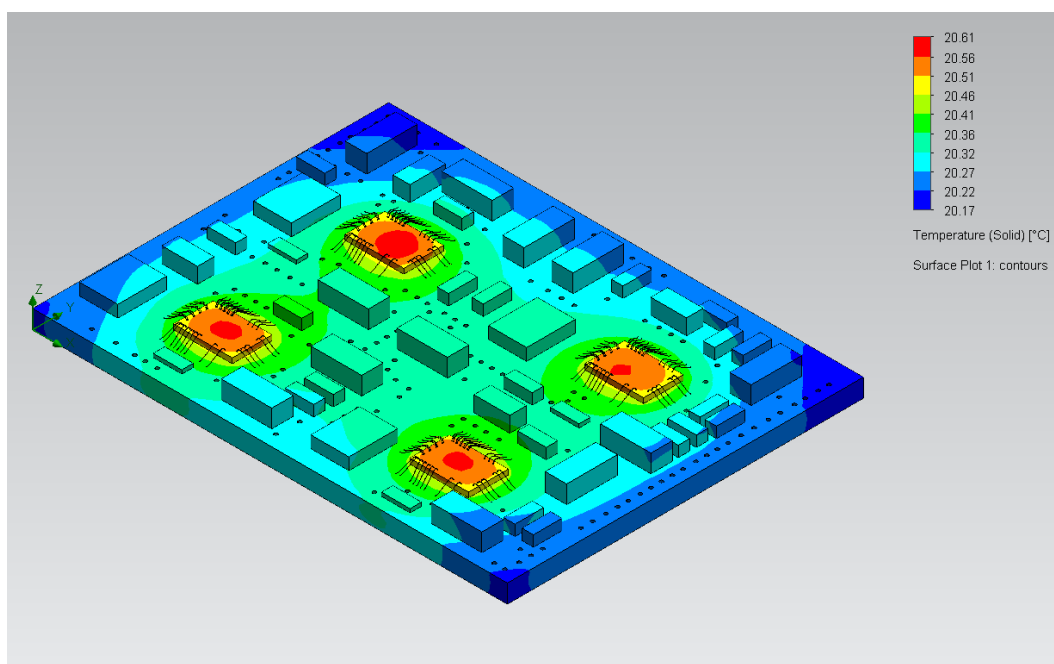


Рис. 2. – Анализ платы модуля преобразователей питания

Предварительный результат анализа модуля преобразователей питания показал отсутствие проблем с тепловыделением.

Однако, в случае с другими элементами сборки возникают проблемы [4-6]. Основным компонентом платы управления является бескорпусная ПЛИС ECP5-45. Анализ платы управления проводился в CFD САПР для тепловыделения LFE5U-45F-8BG256I 2500 мВт. Результаты анализа представлены на рис.3 и 4:

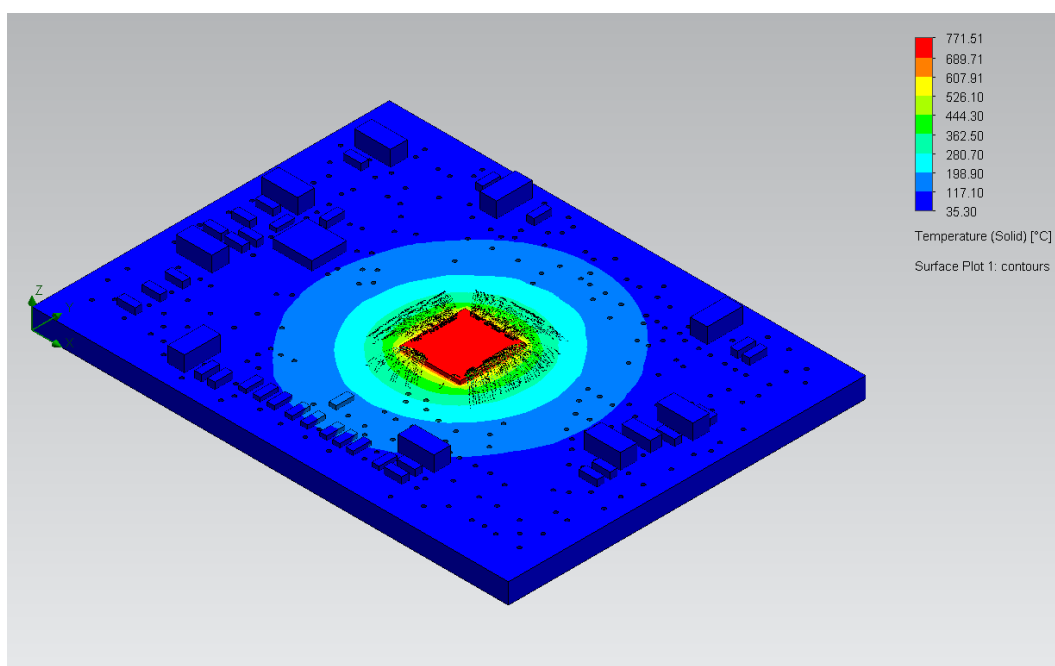


Рис.3 – Анализ модуля управления в CFD САПР

Предварительный анализ показал крайне высокую температуру LFE5U-45F-8BG256I и окружающей области печатной платы. При этом для исходных данных бралось значение максимальной потребляемой электрической мощности из документации на ПЛИС, и анализ был сделан, исходя из расчета, что вся потребляемая электрическая мощность (2500 мВт) перейдет в тепло. Однако для работы с выпускаемой ПЛИС, производителем предлагается специализированное программное обеспечение (ПО), которое позволяет оценить реальное тепловыделение ПЛИС при определенных режимах работы и задействования её функций [7]. Выполненный с помощью

этого ПО расчет показал, что тепловыделение микросхемы ECP5-45 будет составлять 99,3 мВт, а не 2500 мВт, как было принято изначально (рис.5).

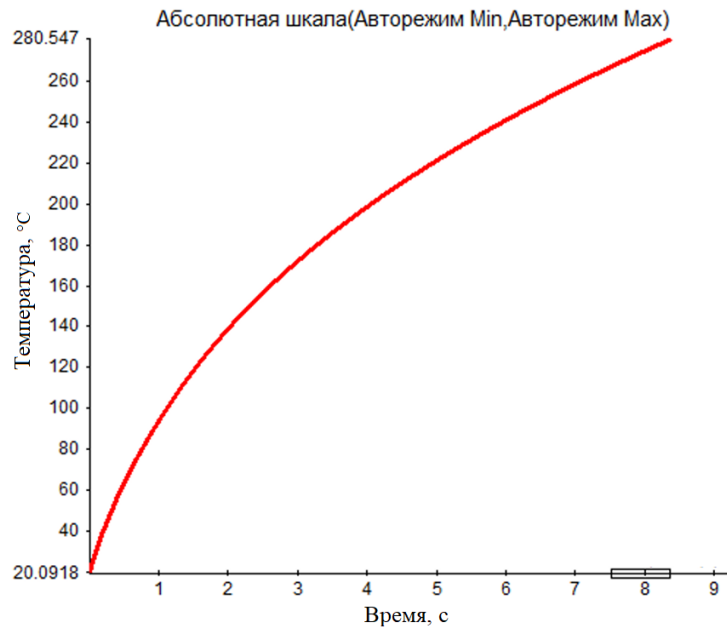


Рис.4. – График зависимости температуры нагрева от времени при мощности тепловыделения 2500 мВт, построенный на основе данных CFD САПР

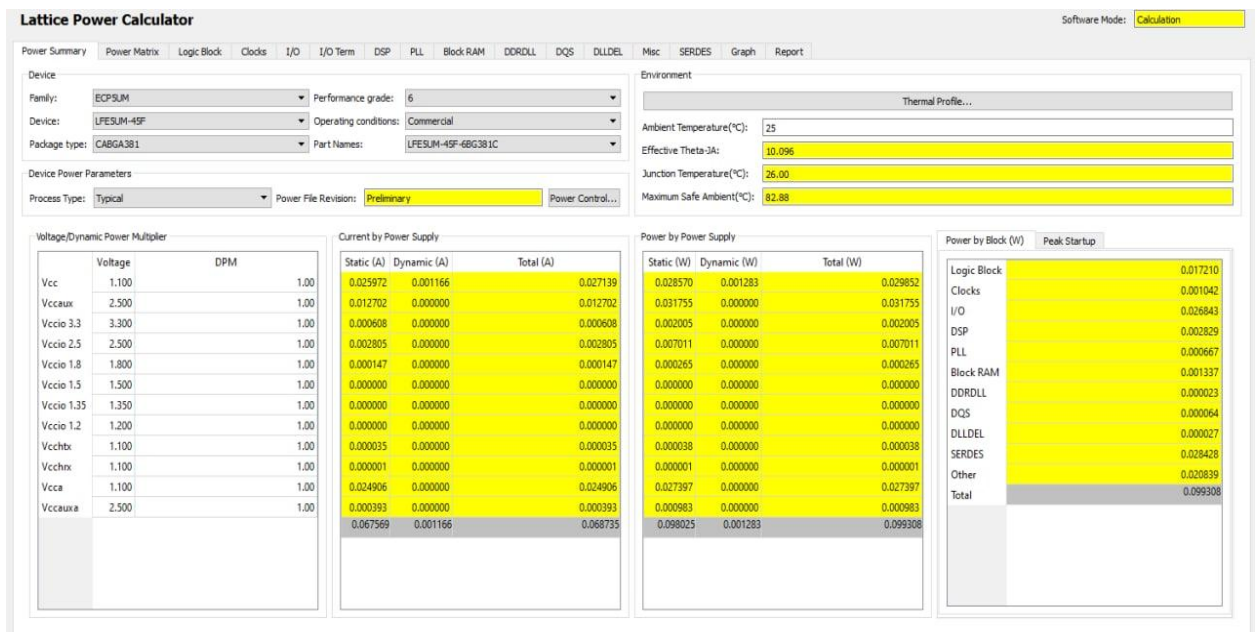


Рис. 5. – Расчет тепловых параметров ПЛИС

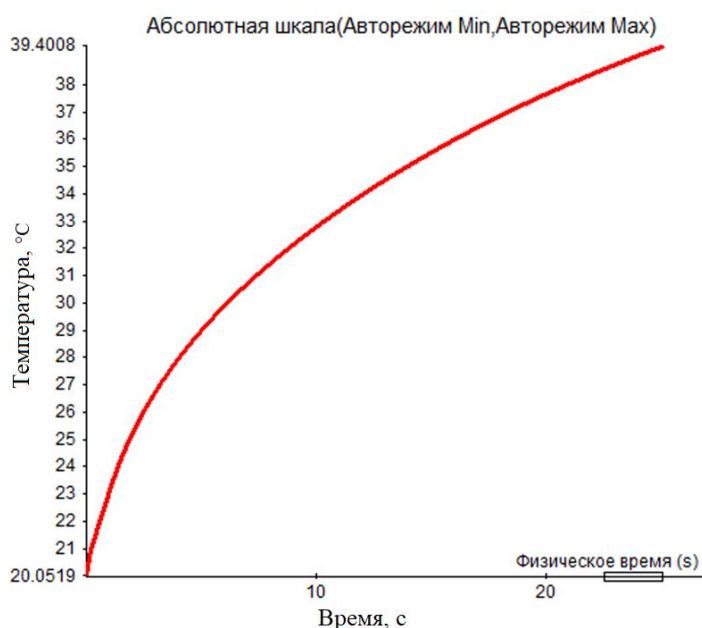


Рис.6. – Анализ динамики нагрева ПЛИС при мощности тепловыделения 99,3 мВт

Как видно из результатов моделирования температуры, полученные путем анализа тепловыделения ПЛИС с пользовательской конфигурацией, из САПР производителя ПЛИС, значительно ниже тех, что получились бы при использовании максимальных значений из документации на ПЛИС. Данный пример хорошо показывает, насколько важно для разработчика понимать особенности работы тех компонентов, которые включены в его проект и применять необходимые программные инструменты.

Заключение

При проектировании современных устройств с высокой степенью интеграции, важной задачей является соблюдение требований по тепловыделению в разрабатываемом устройстве. Для этого разработчики применяют целый ряд САПР конечно-элементного анализа. Эти САПР хорошо подходят для анализа стандартных электронных компонентов, но в случае использования в проекте сложных программируемых ПЛИС с большим числом логических элементов такие САПР должны дополняться



другими средствами, в том числе разрабатываемых производителями ПЛИС. В таких случаях предварительные результаты анализа будут более четко отражать реальную ситуацию в проекте, и число итераций разработки будет значительно сокращено [8-10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания FSMR-2022-0002.

Литература

1. Тюрин С.Ф. Диагностирование логического элемента DC LUT FPGA // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2313.
2. Царинжапов А.А., Кошевенко А.В. Разработка и отладка модели микропроцессора архитектуры MIPS и ее реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5019.
3. Карабан В.М., Сулов И.О. Возможности ANSYS ICEPACK в области теплового моделирования микросхем // Решетневские чтения. 2012. № 1. С. 177-178.
4. Murray K., Petelin O., Zhong S., Wang J., Eldafrawy M., Legault J.-P., Sha E., Graham A., Wu J., Walker M., Zeng H., Patros P., Luu J., Kent K., Betz V. VTR 8: High-performance CAD and Customizable FPGA Architecture Modelling // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2020. № 13. pp. 1-55.
5. Rojek K., Halbiniak K., Kuczynski L. CFD code adaptation to the FPGA architecture // The International Journal of High Performance Computing Applications. 2020. №35. pp. 33-46.
6. Yu Y., He L. FPGA Power Estimation Using Automatic Feature Selection. FPGA '16: Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. p 282.

7. Черн, А. Анализ эффективности преобразования, оценка тепловых режимов и компоновки систем питания высокой степени интеграции мощностью 60-72 Вт для ПЛИС // Компоненты и технологии. 2011. № 6. С. 48-54.

8. Вертянов Д.В., Беляков И.А., Погудкин А.В., Тимошенко С.П., Сидоренко В.Н. Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках // Известия вузов. Электроника. 2022. Т.27. № 1. С. 28–40.

9. Фелтон К., Вертянов Д., Евстафьев С., Сидоренко В. Новое поколение решений для корпусирования интегральных схем. Часть 2. // «Электроника, наука/технология/бизнес». 2021. №10. С. 128-133.

10. Чугунов, Е.Ю., Тимошенко С.П., Погалов А.И., Вертянов Д.В. Конструирование и расчеты трёхмерных микроэлектронных модулей с высокой степенью интеграции компонентов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2020. №2. С. 42-48.

References

1. Tyurin S.F. Inzhenernyy vestnik Dona. 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2313.

2. Tsarinzhapov A.A., Koshevenko A.V. Inzhenernyy vestnik Dona. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5019.

3. Karaban V.M., Suslov I.O. Reshetnevskie chteniya. 2012. №1. pp. 177-178.

4. Murray K., Petelin O., Zhong S., Wang J., Eldafrawy M., Legault J.-P., Sha E., Graham A., Wu J., Walker M., Zeng H., Patros P., Luu J., Kent K., Betz V. ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2020. № 13. pp. 1-55.



5. Rojek K., Halbiniak K., Kuczynski L. The International Journal of High Performance Computing Applications. 2020. №35. pp. 33-46.
6. Yu Y., He L. Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. p 282.
7. Chern, A. Komponenty i tekhnologii. 2011. № 6. pp. 48-54.
8. Vertyanov D.V., Belyakov I.A., Pogudkin A.V., Timoshenkov S.P., Sidorenko V.N. Izvestiya vuzov. Elektronika. 2022. T.27. № 1. pp. 28–40.
9. Felton K., Vertyanov D., Evstaf'ev S., Sidorenko V. Elektronika, nauka/tekhnologiya/biznes. 2021. №10. pp. 128-133.
10. Chugunov, E.Yu., Timoshenkov S.P., Pogalov A.I., Vertyanov D.V. Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika. №2. 2020. pp. 42-48.