DOI: 10.22184/1992-4178.2021.211.10.128.133

# Новое поколение решений для корпусирования интегральных схем

## Часть 2

К. Фелтон[1], Д. Вертянов, к. т. н.[2],
С. Евстафьев, к. т. н.[3], В. Сидоренко[4]

УДК 004.9:621.3 | ВАК 05.13.12

Вторая часть статьи посвящена сквозной интеграции средств проектирования современных корпусов микросхем и микросборок по технологии цифрового двойника: комплексное проектирование электрических и механических составных частей изделия с учетом тепловых характеристик, термомеханических напряжений и целостности сигналов.

Многокристальная разнородная (гетерогенная) и однородная (гомогенная) сборка кристаллов продолжает оставаться перспективным подходом More than Moore («Больше чем Мур») для уменьшения геометрических размеров и увеличения функциональности электронных устройств, а также остается проверенным способом интеграции нескольких кристаллов, изготовленных по различным технологическим процессам. Технологии гетерогенной интеграции предлагают решения по расширению функциональности электронных устройств, более быстрому выходу на рынок и устойчивости их к проблемам, связанным с выходом годных кристаллов.

В первой части статьи были рассмотрены проблемы, относящиеся к разработке современных, перспективных корпусов интегральных схем, систем на кристалле, и почему процесс создания цифрового двойника является проверенной технологией проектирования, верификации и изготовления гетерогенных многокристальных и многоуровневых микросборок. Вторая часть статьи посвящена комплексной, сквозной интеграции, которую обеспечивает технология «цифровой двойник».

## КОМПЛЕКСНАЯ, СКВОЗНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ

Для более быстрого вывода на рынок сложных корпусов ИС требуется бесшовная интеграция разработки и верификации всех этапов – от проектирования подложки до радиаторов и крепежных элементов конструкции системы на печатной плате. Причем верификация должна включать в себя все взаимосвязанные процессы моделирования электрических, тепловых параметров, тестирования, испытаний на надежность, и, конечно же, определение параметров технологичности изделия.

Как правило, современные, передовые корпуса ИС, микросборки содержат кристаллы, изготовленные на основе различных технологических процессов, соединенные между собой с помощью нескольких коммутационных подложек. Без системного подхода к проектированию и верификации существует риск столкнуться с дорогостоящими итерациями корректировки и повторного запуска в изготовление изделия или его браком. Придерживаться традиционных подходов к проектированию и верификации различных, не интегрированных между собой элементов, компонентов изделия более не представляется возможным.

## КОМПЛЕКСНОЕ, СКВОЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ СИСТЕМЫ

Согласно недавнему исследованию (Aberdeen, Semiconductor Device Packaging Design Best Practices, 2019), 82% компаний-лидеров в своей области используют систему, которая позволяет постоянно обмениваться проектными данными между ECAD- и MCAD-системами на протяжении всех этапов проектирования. Эти компании понимают, что синхронизация информации об электрической и механической составных частях изделия необходима для обеспечения гарантии того, что не будет никаких физических нарушений при размещении микросборки внутри корпуса или системы. Компании также установили, что постоянный обмен данными во время проектирования является основополагающим для обеспечения совместимости ECAD и MCAD составных частей, что в свою очередь увеличивает шансы получить

[1] Mentor, A Siemens Business, маркетинг менеджер в области корпусирования, ru_soft@mentor.com.

[2] Институт НМСТ НИУ МИЭТ, руководитель УНЦ, vdv.vertyanov@gmail.com.

[3] Институт НМСТ НИУ МИЭТ, доцент, madcatse@gmail.com.

[4] АО «ЗНТЦ», руководитель центра корпусирования и 3D-сборки микросхем, sidorenko@zntc.ru.

**Рис. 1.** Комплексная, сквозная интеграция по технологии цифрового двойника

работоспособное изделие за один производственный запуск, а также помогает создавать более надежные изделия при одновременном повышении производительности и ускорении вывода продукции на рынок.

Около 50% современных, передовых корпусов ИС требуют как минимум одной дополнительной итерации в процессе проектирования для решения проблем с совместимостью электрической и механической частей изделия, обычно связанных с разработкой и установкой заказного радиатора, который играет ключевую роль в распределении тепла всего устройства.

Крайне важно, чтобы разработчик корпуса ИС и разработчик встроенного теплоотвода / теплораспределителя (Integrated heat spreader, IHS) могли вместе визуализировать, исследовать и оптимизировать конструкцию, при этом, в идеале, делая это асинхронно, чтобы минимизировать прерывания между ECAD- и MCAD-средами (системами) проектирования.

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В опросе, проведенном в г. Абердине (Великобритания), также сообщалось, что для 68% опрошенных корпораций синхронизация между проектом корпуса и механическим (вместе с тепловой моделью) проектом является существенной проблемой для получения рабочего изделия с первого раза. Это связано с тем, что гетерогенные многоуровневые сборки демонстрируют множественные межвзаимодействия «корпус – кристалл» (CPI), при этом одним из самых больших таких CPI является тепловое рассеивание тепла, особенно генерируемого неравномерно, что характерно для таких типов корпусов.

Типичным подходом к управлению тепловыми режимами, в данном случае, будет применение интегрированного теплораспределителя / теплоотвода для передачи

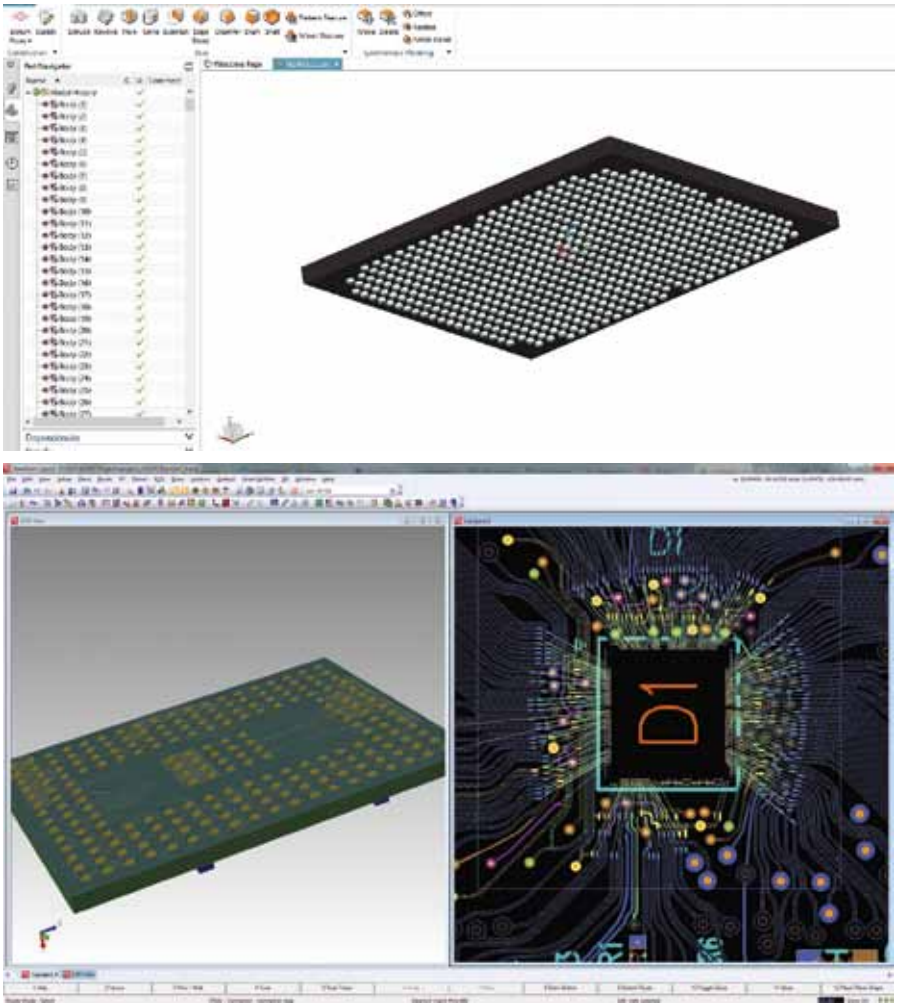



**Рис. 2.** Пример совместного проектирования корпуса микросхемы разработчиками в ECAD- и MCAD-системах

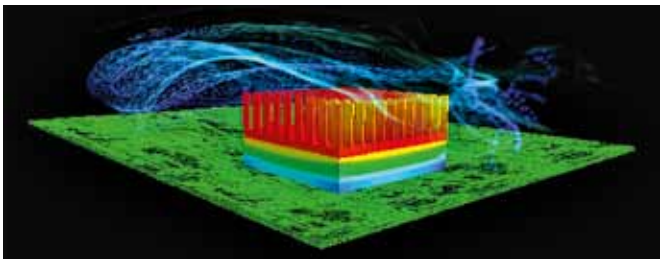


**Рис. 3.** Цифровой двойник теплораспределителя в трехмерном виде

и рассеивания тепла. Но эффективность теплораспределителя напрямую зависит от его конструкции. Для того чтобы теплоотвод был эффективным и производительным, он должен быть спроектирован и смоделирован совместно с корпусом, а не отдельно.

Проектирование всех элементов корпуса в трехмерном виде, включая отдельные механические элементы (встроенные теплораспределители), с тепловым моделированием, интегрированным в САПР, обеспечивает эффективную реализацию теплопередачи без значительных конструкторских ограничений.

Например, тепловой коэффициент линейного расширения (ТКЛР) кристалла и материалов корпуса микросборки, таких как формовочные композиты из синтетических материалов и подложки, существенно различаются. Во время интенсивного тепловыделения это несоответствие ТКЛР вызывает на границах контакта элементов конструкции термомеханического напряжения, которые могут нарушить структурную целостность кристалла. Таким образом, несоответствие ТКЛР играет ключевую роль в общей надежности изделия.

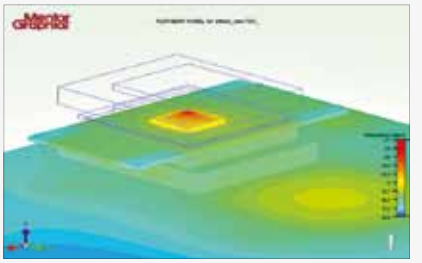
При проведении подробного теплового анализа корпуса микросборки важно начинать с точного, базового набора граничных условий. Обычно их можно определить из теплового моделирования на уровне системы, что позволяет получить тепловые данные об окружающей среде, в которой будет работать корпус. Используя это в качестве отправной точки, разработчик может точно исследовать тепловые воздействия на этапе компоновки кристалла или кристаллов в корпусе, в том числе различные эффекты на уровне кристалла, на уровне подложки корпуса и на уровне микросборки.

## АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

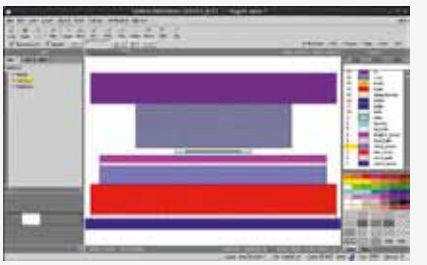
2.5D- и 3D-компоновка может создавать различные непреднамеренные физические нагрузки, такие как деформация подложки при монтаже и напряжения, вызванные неровностями. Разработчики должны уметь анализировать такую трехмерную компоновку на предмет напряжений, вызываемых такими взаимодействиями между кристаллом и корпусом, и их влиянием на производительность устройства. Сочетая верификацию трехмерной компоновки в Calibre с запатентованными методами моделирования, разработчики могут анализировать механические напряжения в каналах МОП-транзисторов, а также отклонения электрических параметров транзистора (такие как подвижность носителей заряда и ток), вызванные механическим напряжением.

## ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ НА УРОВНЕ СИСТЕМЫ

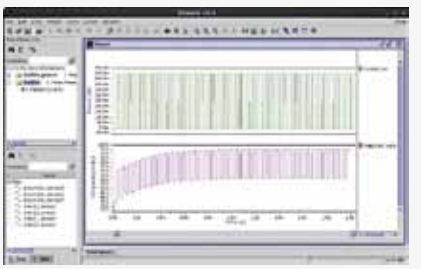
Как только разработка корпуса приближается к завершению, его полную трехмерную тепловую модель можно экспортировать для включения в детальное тепловое моделирование печатной платы и всей системы. Это позволяет окончательно оптимизировать естественное и / или принудительное охлаждение корпуса системы.



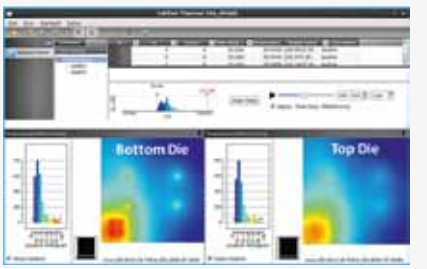
Продвинутая система выявления проблем перегрева



Тепловая модель – вид на сборку



Тепловые и электрические характеристики




Карта распределения тепла и гистограммы

**Рис. 4.** Комплексный тепловой анализ на основе модели цифрового двойника

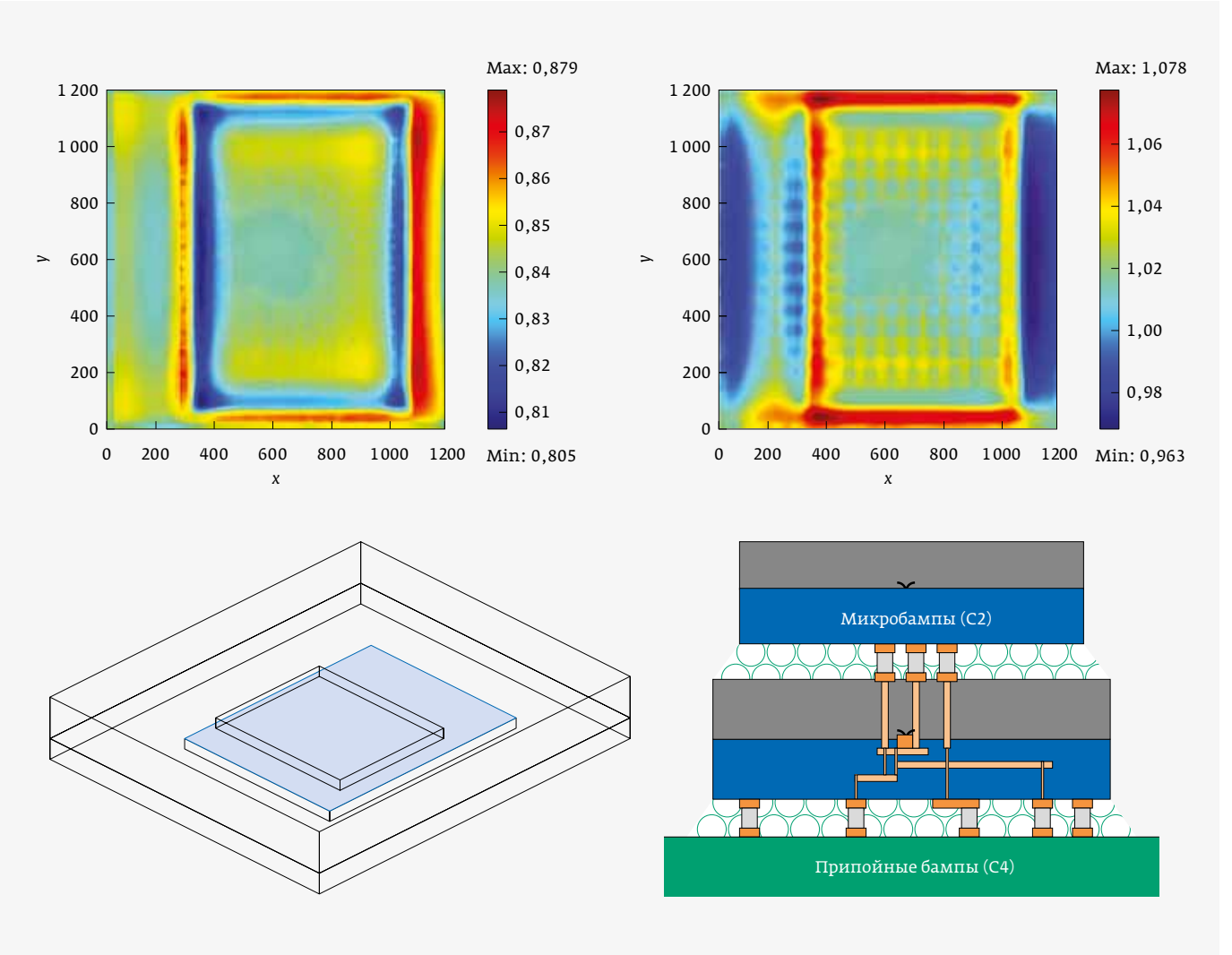



**Рис. 5.** Межкристальное температурное напряжение может быть обнаружено еще при первоначальной объемной компоновке кристаллов в корпусе

## АНАЛИЗ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ КОРПУСА

Современные корпуса ИС ставят много новых задач перед инженерами по целостности сигналов и их средствам проектирования. Так как кристаллы монтируются непосредственно на подложку, то становится возможна трассировка в слоях перераспределения соединений (redistribution layer, RDL). Корпуса уже не являются простыми конструкциями из плоских слоев металла с легко моделируемыми простыми межслойными отверстиями. Вместо этого может быть несколько подложек из очень разных материалов, каждый со своими свойствами. Это относится к кремниевым интерпозерам, где межсоединения похожи на трассировку ИС, а также связанные с ними сквозные переходные отверстия в кремнии, известные под названием TSV (through silicon vias). Путем анализа можно определить ряд параметров целостности сигналов и питания, такие как положительный и отрицательный выбросы, звон, перекрестные помехи, тайминги, глазковые диаграммы, коэффициент битовых ошибок (BER), развязка, падение напряжения и шум.

Кроме того, существует ряд случаев, тяжело поддающихся моделированию. Обычно, они попадают в категорию электромагнитных помех (ЭМП). Например, проблемы обратных цепей/связей, трассировка вблизи краев слоя и соединения цепей ввода/вывода с высокоскоростными сигналами. Сейчас, хотя эти проблемы ЭМП могут быть проанализированы и смоделированы, это, как правило, является непродуктивным. Например, в случае пересечения трассы над фрагментом с разрывом между двумя областями сплошной металлизации, время настройки и выполнения моделирования будет значительным, и все, что вы узнаете из анализа, – это то, что такие ситуации нежелательны и их следует избегать. То же самое относится и к таким случаям, как

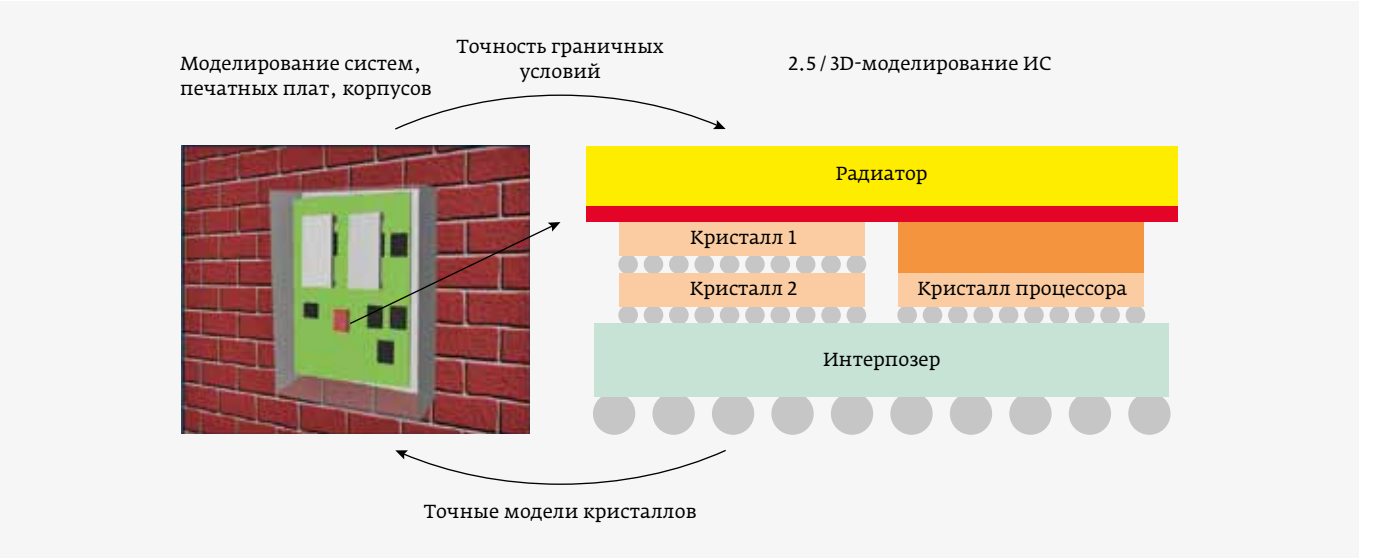



**Рис. 6.** 2.5D-и 3D-корпусирование предполагает максимальную плотность расположения активных кристаллов, что вызывает существенные проблемы отвода тепла и механические напряжения из-за различных ТКЛР кристаллов и материалов сборки

отсутствие достаточного количества сшивающих переходных отверстий, трассы вблизи края слоя и трассы на границах отверстий. В таких ситуациях подобные проблемы лучше всего выявлять заранее с помощью программного обеспечения для автоматического геометрического контроля и проверки в процессе проектирования. Обычно они могут быть настроены и выполнены за считанные минуты, при этом проблемные области четко выделены для принятия мер по исправлению ситуации. Такой подход «сдвиг влево» в первую очередь предотвращает само возникновение проблем, делая анализ ЭМИ скорее этапом верификации, нежели средством выявления проблем.

## ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В 2.5D и 3D гетерогенных микросборках обычно используются TSV, которые представляют собой специальные переходные отверстия, проходящие через кристалл или подложку для соединения верхней и нижней стороны. Технология TSV позволяет монтировать друг на друга кристаллы и подложки и таким образом соединять их между собой. Однако, помимо своих собственных электрических характеристик, TSV также оказывают косвенное влияние на электрические характеристики устройств и соединений в непосредственной близости от них. Для точного моделирования 2.5D / 3D гетерогенной микросборки

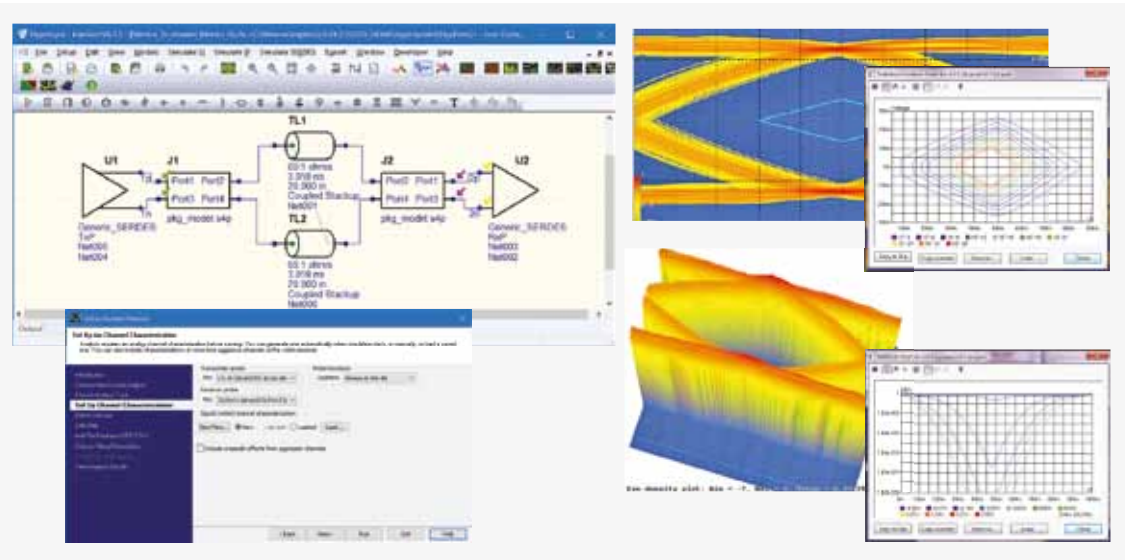


**Рис. 7.** Комплексный анализ целостности сигналов на системном уровне

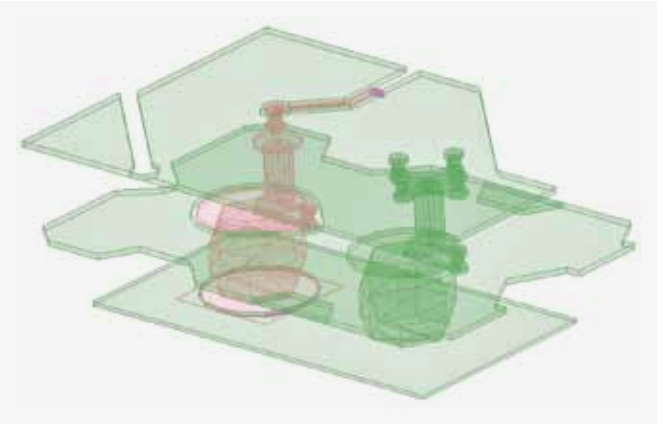


Рис. 8. Подробное 3D гибридное и полноценное извлечение параметров сложных структур

разработчик нуждается в программных решениях, которые извлекают точные электрические параметры из физической структуры этих 2.5D/3D-элементов, которые затем могут быть переданы в поведенческие симуляторы. Используя трехмерную модель цифрового двойника полной сборки корпуса можно точно извлечь паразитные данные из этих 2.5D- и 3D-моделей.

После того, как данные правильно извлечены, с использованием соответствующей технологии и процесса, они могут быть собраны в модель межсоединений на уровне системы и смоделированы для анализа производительности и выполнения требований соответствующих стандартов.

* * *

Гетерогенные микросборки оказали серьезное влияние на традиционные методы проектирования и верификации. Рост популярности таких конструкций требует эффективной, надежной и автоматизированной проверки физических, электрических, тепловых и производственных характеристик. Для обеспечения согласованности и автоматизации этих процессов необходима единая среда, позволяющая разработчикам управлять всеми этими процессами в рамках эффективного, воспроизводимого и автоматизированного процесса проектирования.

В третьей части статьи будут рассмотрены возможности по масштабированию и спектру функциональных возможностей, необходимых для решения текущих и будущих задач в области проектирования современных корпусов ИС, а также что именно требуется для предсказуемой и точной передачи данных в производство.

## ЛИТЕРАТУРА


1. **Ramadan T.** Crossing the chasm: Bringing SoC and package verification together with Calibre 3DSTACK // Mentor. A Siemens business. January 2017. https://go.mentor.com/4QLSO.
2. **Petranovic D., Chow K.** 3D-IC system verification methodology: solutions and challenges // Electronic Design Process Symposium. April 2011. https://www.researchgate.net/publication/268208901 3D-IC System Verification Methodology Solutions and Challenges.
3. **Ramadan T.** Package designers need assembly-level LVS for HDAP verification // Mentor. A Siemens business. December 2017. https://go.mentor.com/4WDVj.
4. **Decoin C., Kourkoulos V.** Fast and accurate extraction of 3D-IC layout structures // Mentor. A Siemens business. July 2012.
5. **Mastroianni T.** eSilicon tackles the challenges of advanced IC package design using Xpedition Substrate Integrator and Calibre 3DSTACK // May 2019. https://go.mentor.com/58xrP.
6. Amkor Delivers Industry's First Package Assembly Design Kit to Support Mentor"s High-Density Advanced. Packaging Tools. July 2018. https://ir.amkor.com/news-releases/news-release-details/amkor-delivers-industrys-first-package-assembly-design-kit.
7. **Райнболд К., Фелтон К., Вертянов Д., Никеев К.** Проектирование многокристальных модулей и систем в корпусе // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 2 (00193). С. 144–150.
8. **Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P., Sidorenko V. N., Pogudkin A. V. Belyakov I. A.** Effects of Multilayer Structures Made of Epoxy Compounds with Different Filler Contents on Thermo-Mechanical Stresses in 3D packages // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021.
9. **Чугунов Е. Ю., Тимошенков С. П., Погалов А. И., Вертянов Д. В.** Конструирование и расчеты трехмерных микроэлектронных модулей с высокой степенью интеграции компонентов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2020. № 2 (178). С. 42–48.
10. **Вертянов Д. В., Бураков М. М., Кручинин С. М., Сидоренко В. Н., Брыкин А. В.** Трехмерная микросборка на основе коммутационных плат из кремния и бескорпусных элементов МЭМС // Наноиндустрия. 2018. № S (82). С. 521–531.