

ТРЕБОВАНИЯ К СОВОКУПНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СУБД ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Федоткин А.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», e-mail: falexey@vlsi.ru

В статье проведен анализ уровня сложности современных проектов коммутационных плат корпусов сложнофункциональных микросхем, материнских многослойных печатных плат, производительности современных гетерогенных средств вычислительной техники (СВТ), влияния задержек графического пользовательского интерфейса средств автоматизированного проектирования на психоэмоциональное состояние и продуктивность разработчика, наличия доступных систем управления базами данных (СУБД), способных эффективно обрабатывать и визуализировать большое количество многослойных технических объектов (МТО). Указывается, что имеющиеся и доступные в России программы для автоматизации проектирования корпусов микросхем и печатных плат исчерпали свои возможности для эффективного ведения разработки современных проектов многослойных печатных плат, в том числе коммутационных плат корпусов российских микропроцессоров «Эльбрус» и материнских плат для модулей вычислительных комплексов на их основе, так как размер таких проектов вырос до миллиона МТО. Для дальнейшего успешного проектирования отечественных СВТ необходимо улучшать и средства разработки до уровня, обеспечивающего возможность визуализировать и обрабатывать не менее миллиона МТО, не приводя к заметным задержкам графического пользовательского интерфейса программы. Определены и обоснованы требования к эксплуатационным свойствам специализированной СУБД, исходя из области применения для многослойных печатных плат вычислительных комплексов и коммутационных плат корпусов сложнофункциональных микросхем, которые позволяют повысить эффективность работы с МТО и обеспечат визуализацию современных проектов со стандартным популярным разрешением FullHD 1920x1080 пикселей с количеством МТО не менее 1 млн со скоростью не менее 25 кадров в секунду при выполнении типовых операций интерактивной обработки в инженерном ПО на широкодоступных гетерогенных СВТ.

Ключевые слова: графический пользовательский интерфейс, системы управления базами данных, визуализация данных, многослойные технические объекты, многослойные печатные платы, корпусирование микросхем, российские процессоры Эльбрус, гетерогенные средства вычислительной техники.

REQUIREMENTS FOR THE OPERATIONAL PROPERTIES OF A DBMS BASED ON THE GRAPHICAL USER INTERFACE OF SOFTWARE FOR PROCESSING MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS

Fedotkin A.S.

Moscow institute of physics and technology (National Research University), e-mail: falexey@vlsi.ru

The article analyzes the complexity of modern designs of circuit boards for complex-functional microcircuits, mother multilayer printed circuit boards, the performance of modern heterogeneous computing equipment, the impact of delays in the graphical user interface of computer-aided design tools on the psychoemotional state and productivity of the developer, the availability of available database management systems (DBMS) capable of efficiently processing and visualizing a large number of multi-layered technical objects (MTO). It is indicated that programs available in Russia for automating the chip and printed circuit boards design have exhausted their capabilities for the effective development of modern multilayer printed circuit board designs, including substrate boards for Russian Elbrus microprocessors and motherboards for modules of computing complexes based on them, as the size of such projects has grown to one million MTOs. For the further successful design of domestic computing equipment, it is necessary to improve the development tools to a level that provides the ability to visualize and process at least one million MTO without leading to noticeable delays in the graphical user interface of the program. The requirements for the operational properties of a specialized DBMS are defined and justified, based on the scope of application for multilayer printed circuit boards of computing complexes and circuit boards of complex-functional microcircuits, which will increase the efficiency of working with MTO and provide visualization of modern projects with a standard popular FullHD resolution of 1920 x 1080 pixels with an MTO number of at least 1 million at a speed of at least 25 frames per second, when performing typical interactive

processing operations in engineering software on widely available heterogeneous computing equipment.

Keywords: graphical user interface, database management systems, data visualization, multilayer technical objects, multilayer printed circuit boards, chip packaging, Russian Elbrus processors, heterogeneous computing equipment.

Введение

При проектировании многослойных печатных плат (МПП) и коммутационных плат корпусов сложно-функциональных микросхем визуальное представление играет ключевую роль в принятии решений разработчиком. Это связано с высокой сложностью проектов современных электронных устройств, содержащих высокоскоростные интерфейсы, где необходимо учитывать взаимодействие множества слоёв, компонентов, сигнальных дорожек, плоскостей питания и заземления, а также проблемы электромагнитной совместимости и теплопередачи. Визуализация позволяет разработчику наглядно оценить пространственное расположение элементов, выявить потенциальные конфликты и оптимизировать проект.

Рост количества многослойных технических объектов (МТО) как моделей электронных модулей, МПП, сложно-функциональных микросхем и т.д. приводит к недостатку производительности современных средств вычислительной техники (СВТ) для их обработки, особенно при работе в интерактивном режиме. Для графического пользовательского интерфейса программного обеспечения обработки МТО нужна система управления базой данных (СУБД), учитывающая возможности современных гетерогенных СВТ. Известные СУБД либо недостаточно подходят для задач обработки МТО, либо недоступны в нашей стране. SQL-подобные реляционные базы данных, несмотря на простоту их применения, не способны обеспечить достаточной производительности при работе с МТО, также как и другие традиционные СУБД, использующие в своей основе ту или иную модель данных. Такие доступные СУБД не имеют возможности быстрого выполнения специализированных операций, например, поиска объектов в заданной области пространства, геометрических вычислений и т.д., которые необходимы для эффективной обработки МТО в количестве более 1 миллиона, так как не учитывают особенности как хранимых данных, так и метаданных. Последнее время наблюдаются тенденции использования сочетания различных моделей данных в специализированных мультимодельных СУБД, так как в этом заключается возможность обеспечить достаточную производительность на современных СВТ [1]. Среди существующих СУБД нет эффективных по совокупности эксплуатационных свойств, таких как: время визуализации при выполнении типовых операций, кроссплатформенность, наличие пользовательских и программных интерфейсов для визуализации, взаимодействия с программным обеспечением в интерактивном режиме, геометрических вычислений, обработки событий и т.д. Поэтому задача создания специализированной эффективной СУБД и ее применения в программном обеспечении для разработки многослойных печатных плат современных вычислительных комплексов является актуальной.

Имеющиеся и доступные в России программы для автоматизации проектирования корпусов микросхем и печатных плат исчерпали свои возможности для эффективного ведения разработки современных проектов, в том числе коммутационных плат корпусов российских микропроцессоров «Эльбрус» и материнских плат для модулей вычислительных комплексов на их основе, так как размер таких проектов вырос до миллиона МТО. Для дальнейшего успешного проектирования отечественных СВТ необходимо улучшать и средства разработки до уровня, обеспечивающего возможность визуализировать и обрабатывать не менее миллиона МТО, не приводя к заметным задержкам графического пользовательского интерфейса программы.

МТО в современных электронных устройствах

Электроника – одна из основополагающих отраслей технологического развития экономики. Область применения продукции микроэлектронных компонентов достаточно обширна: вычислительная техника, промышленность, транспорт, медицина, энергетика, телекоммуникации, потребительские устройства. Ожидания современного общества требуют от научно-промышленных предприятий существенного сокращения временных затрат на начальные этапы жизненного цикла инновационной продукции: исследования, проектирования и производства. Наиболее актуальна озвученная проблема для продукции радиоэлектронной промышленности [2], [3] и IT-отрасли. Производителям удастся выводить на рынок новые поколения вычислительной техники практически ежегодно [4], вместе с тем растет степень интеграции. Широко известный в области микроэлектроники закон Мура продолжает выполняться [5], что приводит к увеличению сложности моделей разрабатываемой вычислительной техники. С каждым новым чипом увеличивается количество транзисторов, процессорных ядер, усложняется технология интеграции корпусирования [6]. Темпы развития ЭКБ рассмотрены на примере сравнения продукции компании NVIDIA: с начала века произошел скачок от 15 млн транзисторов на одном кристалле в 1999 г., к сборке из одного центрального и двух графических процессоров, каждый из которых содержит более 100 млрд транзисторов в 2024 г., как показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Рост количества транзисторов NVIDIA с 1999 по 2024 гг.

Прогнозы на ближайшее десятилетие, представленные на рисунке 2, говорят о том, что уровень сложности разрабатываемых СБИС (сверхбольших интегральных схем) будеткратно нарастать, быстрее, чем возможности классических систем автоматизации проектирования (САПР) (рисунки 3-4) [7].

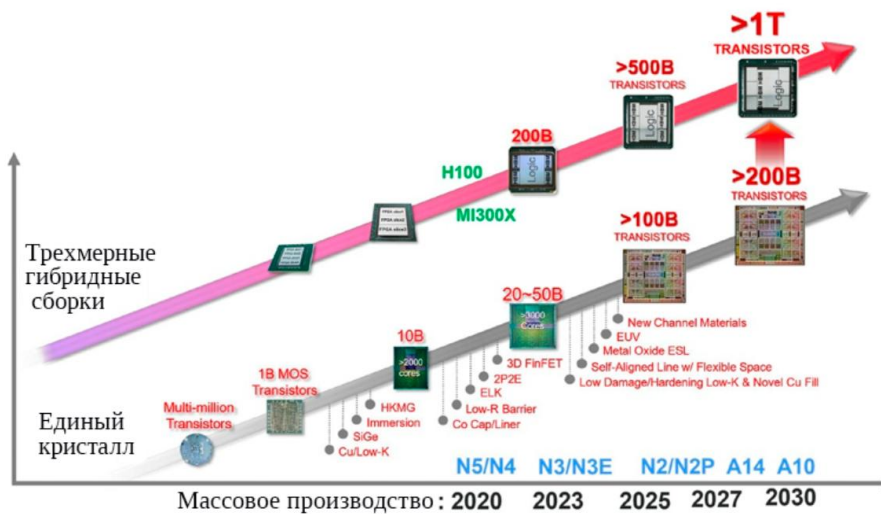


Рисунок 2 – Рост уровня сложности разрабатываемых и изготавливаемых серийно СБИС (по данным TSMC)

Увеличение сложности функциональных блоков, применение современных высокоскоростных интерфейсов с быстрыми шинами данных, таких как CXL, PCIe, USB 3.x, DDR4/DDR5, которые требуют множества выводов для передачи данных, адресов, управляющих сигналов и синхронизации, развитие технологий межсоединений, корпусирования [8], интеграция всё большего числа компонентов на одном кристалле, развитие многоядерных и систем на кристалле (SoC) приводит к росту числа выводов современных СБИС, которые часто включают несколько процессорных ядер, блоков памяти, интерфейсов ввода-вывода и других компонентов. При этом автоматизация проектирования и верификации как СБИС, так и корпусов микросхем и печатных плат становится критически важной [9], так как ручное проектирование топологий с большим числом элементов с учетом технологических и электрических характеристик [10] практически невозможно. Рост числа выводов СБИС за последние 20 лет показан на рисунке 3 – это следствие технологического прогресса и повышения требований к функциональности микросхем, он также порождает новые инженерные и производственные задачи.

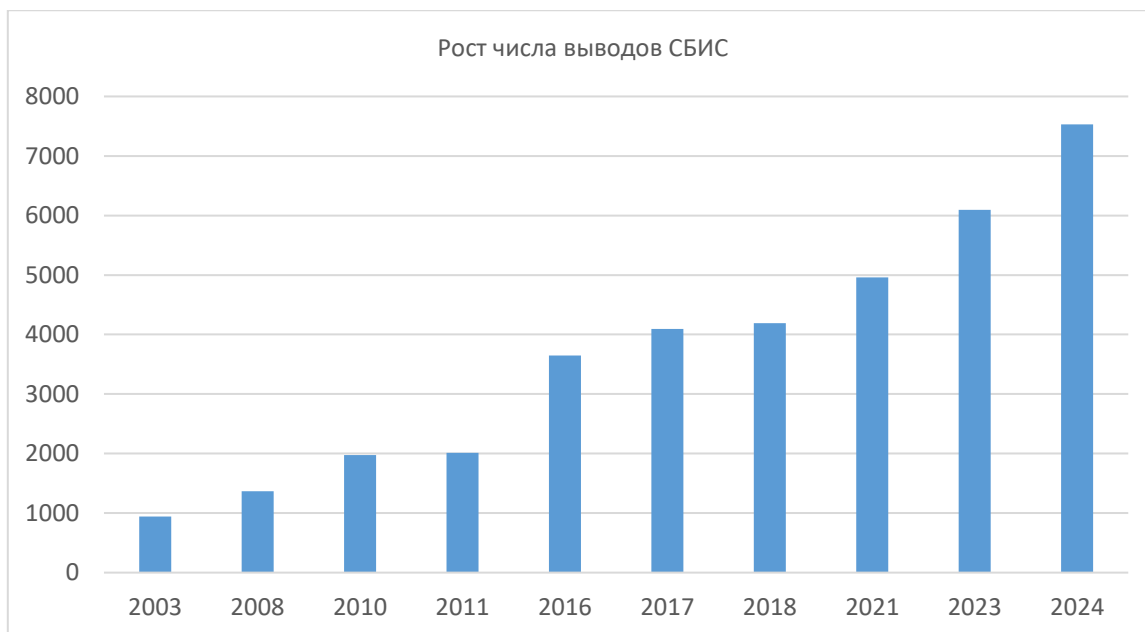


Рисунок 3 – Рост числа выводов СБИС

Взаимосвязь количества объектов топологии в проектах коммутационных плат корпусов микросхем от числа выводов корпуса на примерах отечественных процессоров «Эльбрус» показана на рисунке 4.

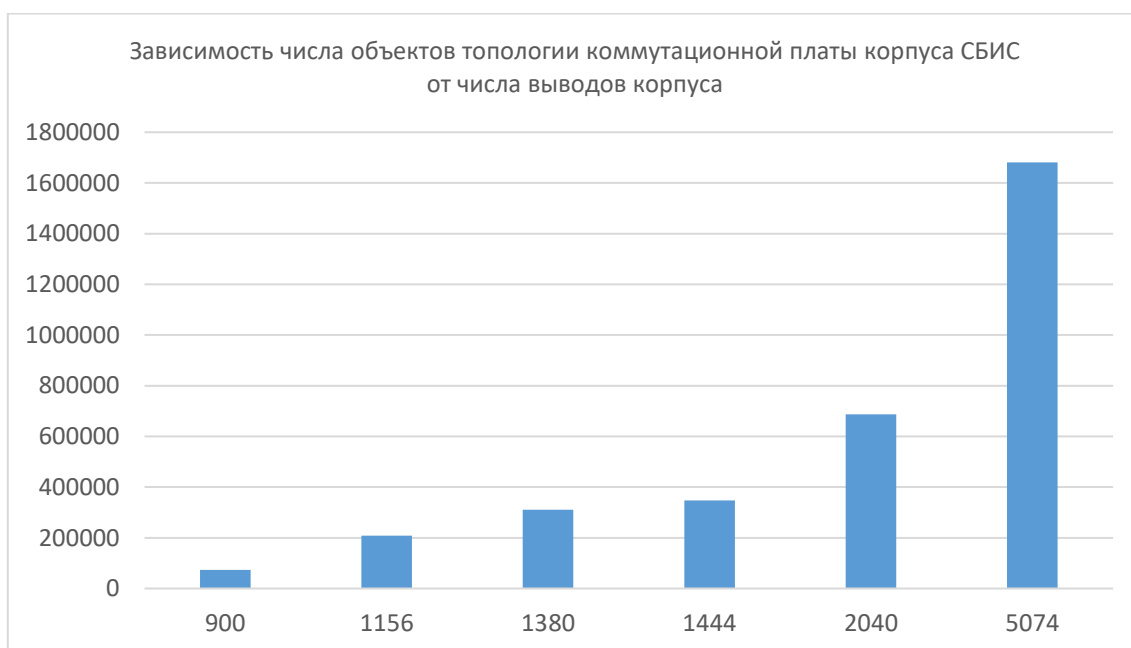


Рисунок 4 – Зависимость числа объектов топологии коммутационной платы корпуса СБИС от числа выводов корпуса

На рисунке 5 для примера показан проект корпуса универсального 16-ядерного микропроцессора «Эльбрус-16С», созданного на шестом поколении архитектуры «Эльбрус» с тактовой частотой 2 ГГц, объемом КЭШ памяти 48 МБ, поддержкой 8 каналов оперативной памяти DDR4-3200, 32 линий PCIe 3.0, Ethernet 1/10 Гбит/с, SATA 3.0, USB 3.0, с размером кристалла 25,3×24,4 мм, площадью 618 мм². Первый инженерный образец был произведен и представлен в октябре 2020 года на выставке «Микроэлектроника-2020». Начало серийного выпуска планировалось к концу 2022 года на фабрике TSMC, однако введенные недружественными странами в феврале 2022 года санкции привели к переносу сроков. Проект корпуса микропроцессора «Эльбрус-16С» имеет размер 78x63 мм и содержит 4804 вывода и 1 681 348 объектов топологии.

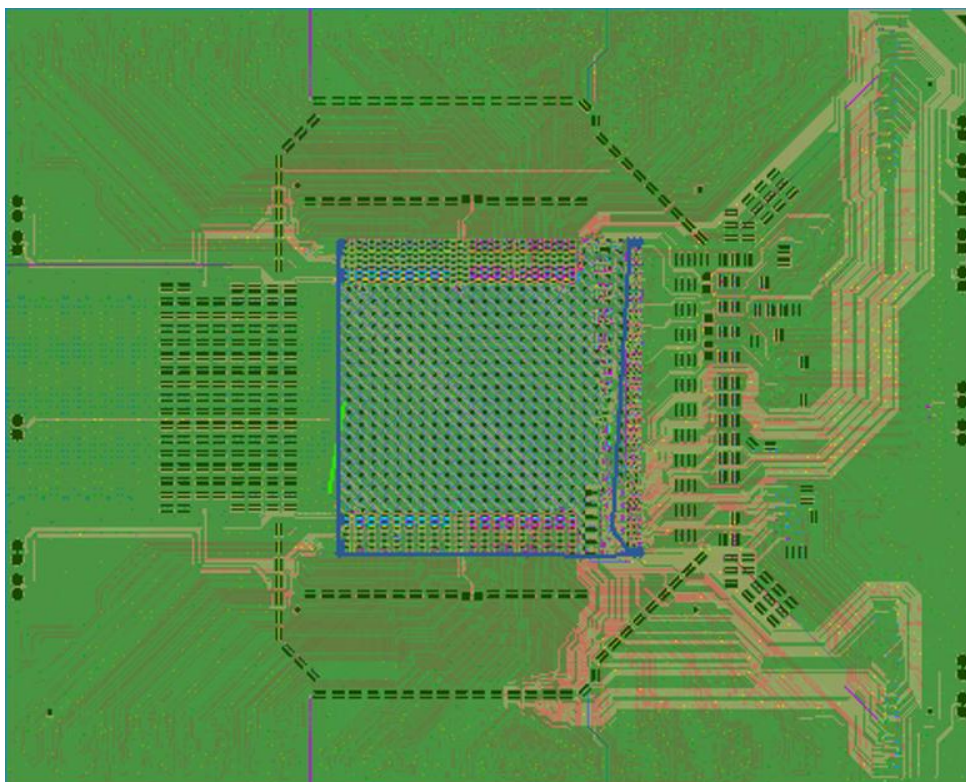


Рисунок 5 – Пример проекта корпуса микросхемы микропроцессора «Эльбрус-16С» в САПР «СРК»

На рисунке 6 показан проект материнской платы для вычислительных комплексов на базе широко распространенного российского микропроцессора «Эльбрус-8СВ». Проект содержит 1 165 512 объектов топологии. Существуют и другие аналогичные проекты [11].

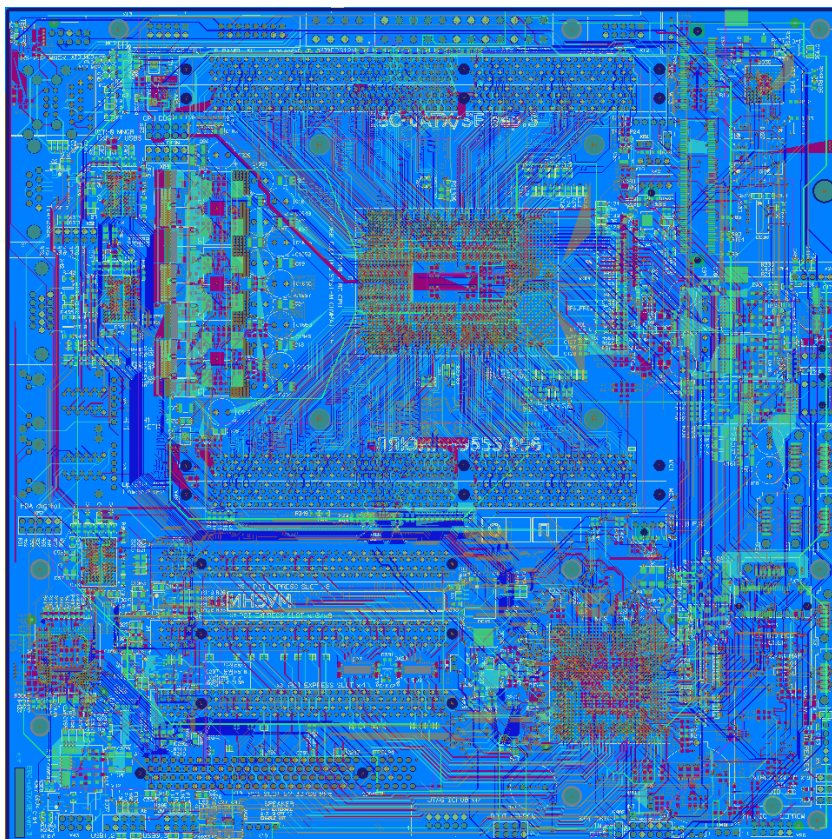


Рисунок 6 – Пример проекта материнской платы для вычислительных комплексов на базе микропроцессора «Эльбрус-8СВ»

Учитывая представленные данные, примем в качестве современного уровня проектов коммутационных плат корпусов микросхем и печатных плат около миллиона МТО.

Производительность современных СВТ

Производительность современных СВТ продолжает расти, хотя темпы этого роста в последние годы замедлились по сравнению с предыдущими десятилетиями. Развитие происходит за счёт совершенствования архитектур процессоров, технологий производства, внедрения новых подходов к оптимизации и интеграции специализированных компонентов.

Совершенствуются техпроцессы. Производители стремятся уменьшать размер транзисторов, что позволяет размещать больше элементов на кристалле, повышать плотность интеграции и снижать энергопотребление. Известные мировые производители микропроцессоров, такие как Intel и AMD планируют переход на 1,8 нм и 2-нм техпроцесс для разрабатываемых процессоров, что должно обеспечить прирост производительности вычислительных ядер и повысить энергоэффективность за счет уменьшения утечек тока.

Тем не менее, повышать производительность СВТ только за счет перехода на новые техпроцессы невозможно бесконечно, так как каждый последующий переход сложнее и затратнее предыдущих. Поэтому сейчас рост производительности СВТ достигается за счёт комплексного подхода, включающего технологические прорывы, оптимизацию существующих решений, интеграцию новых компонентов. Современные архитектуры центральных процессоров многоядерные. СВТ в основном гетерогенные, то есть содержат как центральный процессор, так и графическую видеокарту, и другие специализированные ускорители для решения конкретных задач. На рисунках 7, 8 показано сравнение роста производительности микропроцессоров в однопоточном и многопоточном режиме и графических ускорителей в операциях с плавающей точкой (FLOPS).

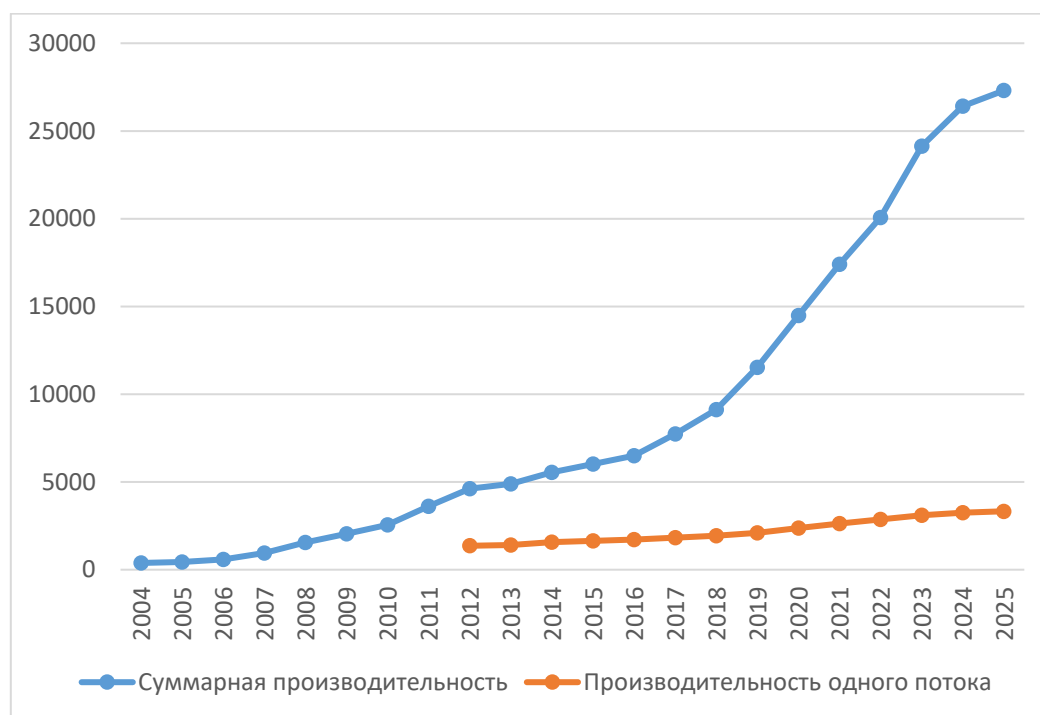


Рисунок 7 – Рост производительности микропроцессоров в однопоточном и многопоточном режиме по данным сайта cpubenchmark.net

Как видно из приведенных на рисунках графиков анализа роста производительности процессоров в однопоточном и многопоточном режиме по данным ресурса cpubenchmark.net, управляемого компанией PassMark Software с многолетним опытом тестирования производительности оборудования, а также графических ускорителей в видеокартах показывает, производительность одного процессорного ядра растет очень медленно, в то время как общий рост производительности гетерогенных СВТ достигается за счет увеличения количества ядер в графических ускорителях. Современные графические процессоры имеют большое количество ядер, до нескольких тысяч, поэтому в них еще более заметно увеличение производительности, чем в центральных процессорах.

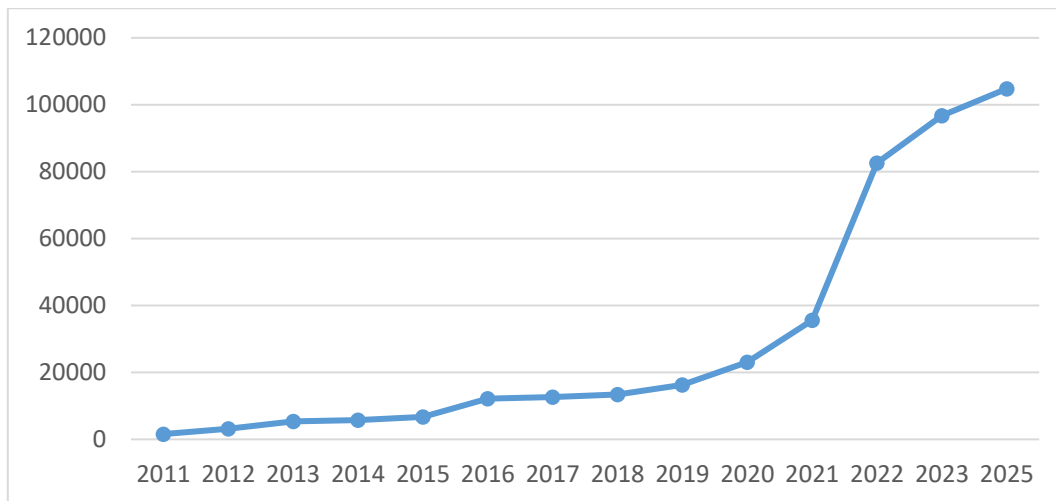


Рисунок 8 – Рост производительности графических ускорителей в миллиардах операций с плавающей точкой (GFLOPS) по данным сайта technical.city

Поскольку повышение тактовой частоты приводит к экспоненциальному росту энергопотребления и тепловыделения, что становится трудноуправляемым, при достижении определённых пределов транзисторы начинают работать нестабильно из-за квантовых эффектов и утечек тока. Если ранее уменьшение размеров транзисторов при сохранении площади процессора не приводило к существенному росту энергопотребления за счет пропорционального снижения подаваемого на затвор напряжения по закону Деннарда [12], то к середине 2000-х годов этот закон перестал выполняться, так как транзисторы стали настолько малы, что токи утечки стали значительными, а энергопотребление достигло критических значений, что стало приводить к выходу процессора из строя от перегрева. Поэтому с 2005-2006 годов частота массовых микропроцессоров не растёт выше 4 – 5,5 ГГц, также не растёт производительность отдельных ядер.

Влияние задержек визуализации МТО на психоэмоциональное состояние разработчика

Труд профессиональных пользователей компьютеров в значительной степени связан со зрительным утомлением, ведущую роль в котором играет время фиксации взора на экране монитора [13]. Зрительное утомление усугубляется напряжением нервно-мышечной системы и опорно-двигательного аппарата. Анализ литературных данных показал, что пользователи, работающие за компьютером длительное время, предъявляют жалобы на общее чувство утомления, астенопию, которая чаще всего проявляется в покраснении глаз, слезотечении, ухудшении остроты зрения и т. д.

Работа за компьютером связана с постоянным раздражением, источником которого могут быть как вид деятельности, так и информационные особенности компьютера, используемое программное обеспечение, организация работы, социальные аспекты. Большое влияние оказывают специфические стрессорные факторы, такие как качество визуализации информации, время задержки ответа компьютера при выполнении команд человека в графическом пользовательском интерфейсе [14]. Длительное пребывание в состоянии психоэмоционального напряжения может привести к формированию нарушений в равновесии физиологических систем организма.

Задержки пользовательского интерфейса в системах автоматизированного проектирования оказывают многогранное негативное влияние на состояние и продуктивность разработчика. Постоянные заметные пользователю задержки интерфейса вызывают раздражение, чувство потери контроля над процессом работы, усиливают тревожность, формируют ощущение бессмысленности усилий. Накопление негативных эмоций повышает риск эмоционального истощения разработчика, снижает мотивацию к работе, удовлетворённость от труда и качество выполненной работы. Разработчик теряет интерес к сложным проектам. Задержки пользовательского интерфейса программы приводят к ухудшению концентрации внимания пользователя и увеличению когнитивной нагрузки во время работы вследствие необходимости постоянного запоминания промежуточных состояний, чтобы не потерять ход мысли. Возрастает риск ошибок при возобновлении работы после паузы. Чередование активности и ожидания приводит к ментальному истощению и мешают творческой работе. Снижается точность действий, увеличивается вероятность пропуска критических предупреждений ПО. В условиях стресса возрастает число ошибок при выборе параметров.

Задержки даже всего в 1 – 2 секунды накапливаются, и при постоянных ожиданиях за день теряется до часа рабочего времени, а время на восстановление контекста после прерывания может превышать длительность самой

задержки. Это приводит к прямому экономическому ущербу предприятиям из-за необходимости упрощать проекты для совместимости с медленными средствами проектирования, увеличения срока разработки, роста числа исправлений ошибок, вызванных стрессом. Непредсказуемость задержек пользовательского интерфейса, низкая отзывчивость ввода, например, если курсор «отстаёт» от движений мыши, совпадение задержек с критическими действиями являются факторами, усиливающими негативное влияние. Задержки пользовательского интерфейса средств проектирования – не просто техническая проблема, а фактор, влияющий на психоэмоциональное состояние разработчиков, качество работы и долгосрочную эффективность разработчика. Оптимизация графического пользовательского интерфейса программы способна существенно снизить негативные воздействия на разработчика и, как следствие, нивелировать возможные негативные последствия в виде риска допущения ошибок при проектировании.

Анализ научной литературы и экспериментальные исследования показали, что мозг человека воспринимает последовательность кадров как непрерывное движение без заметной задержки, если скорость отрисовки составляет не менее 25 кадров в секунду [15], то есть отрисовка одного кадра при изменении состояния СУБД, сдвиге или масштабировании области видимости должна выполняться не дольше, чем 40 мс, чтобы задержка не была заметна пользователю в интерактивном режиме работы. При разработке программы «Основа визуализации топологии для создания средств проектирования с наглядным представлением многослойной топологии компонентов электроники» в лаборатории средств проектирования микроэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» был проведен эксперимент, в котором 30 студентам предлагалось посмотреть на перемещающийся движением мыши набор различных объектов с настраиваемой задержкой смены кадров и ответить на вопрос, при какой задержке заметны рывки в движении объектов. Все испытуемые студенты ответили, что видят плавное движение и не ощущают дискомфорт при задержке менее 51 мс, а при установленной задержке 107 мс все подтвердили заметные рывки при движении.

Таким образом, исходя из полученных результатов, предложено считать задержку графического пользовательского интерфейса средств проектирования незаметной, если скорость отрисовки одного кадра при изменении состояния СУБД, сдвиге или масштабировании области видимости не более 40 мс.

Критерии оценки эффективности СУБД для МТО

Исходя из рассмотренных особенностей производительности современных микропроцессоров в однопоточном и многопоточном режиме и специализированных графических процессоров, влияния задержек визуализации МТО на состояние разработчика, определены следующие критерии для оценки эффективности СУБД, обеспечивающей работу с моделями МТО, в основе которых время визуализации и выполнения типовых операций:

1. При разрешении FullHD 1920×1080 пикселей графический пользовательский интерфейс программного обеспечения должен быть способен отрисовывать не менее 1 млн объектов базы данных с частотой не ниже 25 кадров в секунду. Соответственно, время рендеринга одного кадра ограничивается 40 мс.

2. В процессе интерактивной работы сложность алгоритмов типовых операций не выходит за границы $O(m \cdot \log n)$, где m – это число объектов, изменяемых в ходе одной операции, а n – совокупное количество МТО в базе данных.

3. Реализация СУБД должна быть кроссплатформенной, в том числе с поддержкой отечественных программно-аппаратных платформ. Указанный критерий влияет на применимость вычислительной техники при интеграции СУБД в СПО.

4. СУБД для МТО удовлетворяет современным функциональным требованиям, включая: использование быстродействующей памяти для обработки МТО; быстрый поиск по набору параметров; проверку нахождения объектов в заданных областях; анализ геометрической связанности МТО; выполнение базовых геометрических операций над МТО (сдвиг, поворот, масштабирование); историю изменений; применение ресурсов многоядерных систем и графических процессоров для достижения максимальной производительности; управление визуальными свойствами объектов и слоёв, включая регулировку прозрачности, цветовой гаммы и шаблона заполнения; сдвиг и масштабирование совокупности отображаемых объектов в двумерной либо трёхмерной системе координат; возможность взаимодействия через интерфейс с набором объектов или сценой при одновременной обработке событий; защиту данных от искажений и утраты и другие.

Заключение

В статье рассмотрен рост сложности проектов кристаллов микропроцессоров, коммутационных плат корпусов сложнофункциональных микросхем, материнских многослойных печатных плат вычислительных комплексов за последние 20 лет, а также рост производительности СВТ в однопоточном и многопоточном

режиме. Показано влияние задержек графического интерфейса программного обеспечения на психоэмоциональное состояние разработчика.

Так как рост производительности современных микропроцессоров в основном достигается за счет применения многоядерных архитектур, при этом производительность графических процессоров растет быстрее универсальных за счет существенно большего количества ядер в чипе, современные СВТ, как правило, гетерогенные. При этом известные СУБД, предназначенные для хранения и обработки МТО, недостаточно учитывают возможности гетерогенных СВТ. Поэтому задача создания специализированной эффективной СУБД и ее применения в инженерном программном обеспечении для разработки многослойных печатных плат современных вычислительных комплексов является актуальной. Предложены критерии оценки эффективности таких СУБД для МТО, которые можно положить в основу требований к совокупности эксплуатационных свойств СУБД.

Работа выполняется при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) №075-03-2025-662 от 17.01.2025г. проект №FSMG-2025-0069.

Список литературы

1. А. С. Федоткин, Эффективная система управления базой данных для многослойных технических объектов, Приборы, 2025, № 7(301), 34–43.
2. И. Е. Тарасов, Д. И. Мирзоян, И. Н. Лобанов, А. С. Федоткин, Архитектура САПР для проектирования корпусов СБИС, Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии, 2022, Т.6, № 1, 13–18.
3. Федоткин А. С. Создание эффективных вычислительных комплексов для топологического проектирования / А. С. Федоткин, А. Г. Лобанова, А. О. Васюткин, И. А. Михайлова // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17, № S10-1(128). – С. 63-65.
4. Федоткин А. С. Программно-аппаратный комплекс «Сервер «СРК» для разработки корпусов микросхем / А. С. Федоткин // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1(119). – С. 37-40.
5. Fulai Z. Moore's Law: The potential, limits, and breakthroughs / Fulai Zhu, Peiyu Xu, Jiahao Zong // Proceedings of the 2023 International Conference on Mechatronics and Smart Systems. – 2023.
6. Бычков, И. Н. Разработка корпуса сложно-функциональной СБИС при выпуске малой серии микросхем / И. Н. Бычков // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2012. – № 1. – С. 267-272.
7. Бычков, И. Н. САПР проектирования коммутационных плат корпусов / И. Н. Бычков, С. Г. Ломако // Наноиндустрия. – 2019. – № S(89). – С. 355-360. – DOI 10.22184/NanoRus.2019.12.89.355.360.
8. Воробьев, А. С. Анализ технологий для изготовления корпуса многоядерного процессора / А. С. Воробьев // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-1. – С. 40-44. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.40.44.
9. Лохов, А. Функциональная верификация СБИС в свете решений Mentor Graphics / А. Лохов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2004. – № 1(51). – С. 58-63.
10. Наumenко, А. А. Расчёт электрических характеристик шин питания в коммутационной плате микропроцессора / А. А. Наumenко, А. С. Воробьев // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 3. – С. 207-211. – DOI 10.31114/2078-7707-2020-3-207-211.
11. Бычков, И. Н. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы "Эльбрус" для перспективных информационных систем / И. Н. Бычков, И. Н. Лобанов, И. А. Молчанов // Приборы. – 2018. – № 8(218). – С. 14-20.
12. Черняк, Л. Закон масштабирования Деннарда / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД. – 2012. – № 2. – С. 61.
13. Котляр Н.Ю., Суворов В.Г. Особенности развития утомления у профессиональных пользователей видеодисплейных терминалов // Медицина труда и промышленная экология. 1999. № 7. С. 20-25.
14. Зайцева Н.В. Власова Е.М., Малютина Н.Н. Особенности психологического статуса работающих с компьютерной техникой // Медицина труда и промышленная экология. 2011. № 1. С. 14-18.
15. С. А. Саломатин, И. Б. Артишевская, О. Ф. Гребенников, Профессиональная киносъёмочная аппаратура и тенденции её развития в СССР // Профессиональная киносъёмочная аппаратура / Т. Г. Филатова. – 1-е изд. – Л. : «Машиностроение», 1990. – С. 4–36. – 288 с.

References

1. A. S. Fedotkin, Effektivnaya sistema upravleniya bazoj dannykh dlya mnogoslajnykh texnicheskix ob'ektov, Pribory, 2025, № 7(301), 34–43.

2. I. E. Tarasov, D. I. Mirzoyan, I. N. Lobanov, A. S. Fedotkin, *Arkhitektura SAPR dlya proektirovaniya korpusov SBIS, Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii*, 2022, T. 6, № 1, 13–18.
3. Fedotkin A. S. Sozdanie effektivnykh vychislitel'nykh kompleksov dlya topologicheskogo proektirovaniya / A. S. Fedotkin, A. G. Lobanova, A. O. Vasyutkin, I. A. Mikhaylova // *Nanoindustriya*. – 2024. – T. 17, № S10-1(128). – S. 63–65.
4. Fedotkin A. S. Programmno-apparatnyy kompleks «Server «SRK» dlya razrabotki korpusov mikroshem / A. S. Fedotkin // *Nanoindustriya*. – 2023. – T. 16, № S9-1(119). – S. 37–40.
5. Fulai Z. Moore's Law: The potential, limits, and breakthroughs / Fulai Zhu, Peiyu Xu, Jiahao Zong // *Proceedings of the 2023 International Conference on Mechatronics and Smart Systems*. – 2023.
6. Bychkov I. N. Razrabotka korpusa slozhno-funktsional'noy SBIS pri vypuske maloy serii mikroshem / I. N. Bychkov // *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*. – 2012. – № 1. – S. 267–272.
7. Bychkov I. N. SAPR proektirovaniya kommutatsionnykh plat korpusov / I. N. Bychkov, S. G. Lomako // *Nanoindustriya*. – 2019. – № S(89). – S. 355–360. – DOI 10.22184/NanoRus.2019.12.89.355.360.
8. Vorob'yev A. S. Analiz tekhnologiy dlya izgotovleniya korpusa mnogoyadernogo protsessora / A. S. Vorob'yev // *Nanoindustriya*. – 2020. – № S96-1. – S. 40–44. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.40.44.
9. Lokhov A. Funktsional'naya verifikatsiya SBIS v svete resheniy Mentor Graphics / A. Lokhov // *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*. – 2004. – № 1(51). – S. 58–63.
10. Naumenko A. A. Raschyot elektricheskikh kharakteristik shin pitaniya v kommutatsionnoy plate mikroprotssora / A. A. Naumenko, A. S. Vorob'yev // *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*. – 2020. – № 3. – S. 207–211. – DOI 10.31114/2078-7707-2020-3-207-211.
11. Bychkov I. N. Vychislitel'naya tekhnika na osnove apparatno-programmnoy platformy «El'brus» dlya perspektivnykh informatsionnykh sistem / I. N. Bychkov, I. N. Lobanov, I. A. Molchanov // *Pribory*. – 2018. – № 8(218). – S. 14–20.
12. Chernyak L. Zakon masshtabirovaniya Dennarda / L. Chernyak // *Otkrytye sistemy. SUBD*. – 2012. – № 2. – S. 61.
13. Kotlyar N. Yu., Suvorov V. G. Osobennosti razvitiya utomleniya u professional'nykh pol'zovateley videodispleynykh terminalov // *Meditcina truda i promyshlennaya ekologiya*. 1999. № 7. S. 20–25.
14. Zaytseva N. V., Vlasova E. M., Malyutina N. N. Osobennosti psikhologicheskogo statusa rabotayushchikh s komp'yuternoy tekhnikoy // *Meditcina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2011. № 1. S. 14–18.
15. Salomatin S. A., Artishevskaya I. B., Grebennikov O. F. Professional'naya kinos'yomochnaya apparatura i tendentsii eyo razvitiya v SSSR // *Professional'naya kinos'yomochnaya apparatura* / T. G. Filatova. – 1-e izd. – L.: «Mashinostroenie», 1990. – S. 4–36. – 288 s.