

Методы обеспечения помехозащищенности питания системы на кристалле "Эльбрус-S"

В.В. Воробушков^{1,2,3}, Ю.С. Рябцев^{2,3}

¹ЗАО "МЦСТ", vvv@mcst.ru

²ОАО "ИНЭУМ им. И.С.Брука"

³Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация — Рассмотрены методы обеспечения помехозащищенности системы питания в структуре кристалла микропроцессора – подложка – МПП. Описаны пути формирования высокочастотных помех по питанию и их влияние на работоспособность микропроцессора. Изучен метод снижения уровня высокочастотных помех по питанию добавлением развязывающих конденсаторов на подложку микропроцессора и его реализация в отечественном микропроцессоре (системе на кристалле) "Эльбрус-S", выпуск которого запланирован на начало 2010 года. Применительно к рассматриваемой топологии установка развязывающих конденсаторов на подложке микропроцессора позволяет существенно снизить уровень помех на кристалле микропроцессора. Обозначен метод дальнейшего изучения факторов, определяющих помехозащищенность микропроцессора, в рамках технологии корпусирования.

Ключевые слова — Эльбрус-S, развязывающие конденсаторы, flip-chip, помехи по питанию, подложка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Стабильность питания вычислительного комплекса (ВК) является одним из важнейших факторов, влияющих на отказоустойчивость. В случае, если уровень помех по питанию превышает допустимый предел, приходится либо снижать тактовую частоту, что уменьшает производительность, либо повышать напряжение питания, что негативно влияет на надежность.

Основными источниками помех в вычислительной системе являются высокочастотные микросхемы большой мощности, такие как микропроцессоры, память, чипсет. В этой статье проблема рассматривается применительно к составной структуре, образованной кристаллом микропроцессора и подложкой, обеспечивающей его соединение с платой. В дальнейшем именно эта структура для краткости обозначается термином "микропроцессор". Для достижения приемлемого уровня помехоустойчивости по питанию в

любом вычислительном комплексе неизменно присутствует система фильтрации питания. Функционально ее можно разделить на три составляющие. Первая – это фильтрация питания, приходящего на печатную плату от внешнего источника. Ее обеспечивают индуктивность проводов, связывающих с источником питания, и фильтрующие низкочастотные помехи по питанию электролитические конденсаторы высокой емкости. Вторая составляющая – это фильтрация на уровне печатной платы. Здесь следует проектировать оптимальную топологию подвода шин питания, ввести определенный набор высокочастотных керамических и низкочастотных электролитических конденсаторов, установить фильтры в необходимых местах. Третья составляющая реализуется в самом микропроцессоре. В этом случае подложка может существенно влиять на уровень помех по питанию в кристалле. Даже при создании идеальной системы питания на печатной плате, что в большинстве случаев невыполнимо по техническим или экономическим причинам, без принятия специальных мер применительно к подложке уровень помех по питанию внутри кристалла может оставаться достаточно высоким.

II. ОПЫТ ПРЕДЫДУЩИХ РАЗРАБОТОК

Отладка, испытания и отбраковка микропроцессоров "Эльбрус" и системы на кристалле "МЦСТ-R500S", разработанных ЗАО "МЦСТ", показали, что при номинальном напряжении питания они не обеспечивают достаточно устойчивой работы. То, что причиной является недостаточная стабильность напряжения внутри кристалла, было подтверждено ухудшением работы микропроцессора при установке его в сокет (специальный соединитель, обеспечивающий без пайки соединение между подложкой и платой) - это увеличило индуктивность цепи питания

между кристаллом и платой и площадь контуров возвратных токов. При детальном изучении проблемы был найден ряд ошибок в топологии выводов питания на подложке микропроцессоров. В следующих итерациях ошибки устранили. Кроме того, было оптимизировано расположение выводов питания относительно сигнальных выводов. Изменения, сделанные в новых версиях микропроцессоров, позволили выйти на требуемые показатели производительности и надежности в установленной техническими требованиями зоне устойчивой работы. Однако необходимость ее расширения в связи с перспективой использования продукции в новых применениях потребовала провести дополнительные исследования для получения более высокого уровня помехозащищенности.

III. ОБРАЗОВАНИЕ ПОМЕХ ПО ПИТАНИЮ В МИКРОПРОЦЕССОРЕ

Эти помехи можно разделить на две группы. К первой группе относятся помехи, вызванные переключением вентилях внешних интерфейсов, периферии микропроцессора, ко второй группе – переключение вентилях внутренней логики, ядра кристалла.

A. Помехи по периферийному питанию микропроцессора

Рис. 1 иллюстрирует физику образования помех при высокоскоростном переключении интерфейсных вентилях.

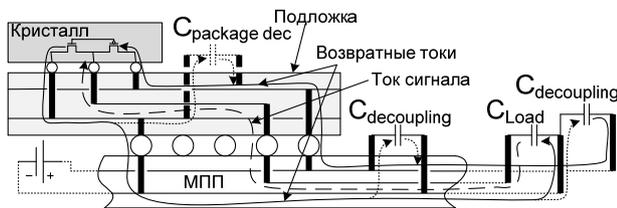


Рис. 1. Схема прохождения возвратных токов в структуре кристалл – подложка – МПП

(C_{Load} – емкость нагрузки, $C_{Package decoupling}$ и $C_{decoupling}$ – развязывающие конденсаторы на подложке и МПП)

В данном случае в цепи питания или земли, в зависимости от направления переключения, формируется возвратный ток в спектре высоких частот. Он протекает в структуре "кристалл-подложка-МПП" по пути, имеющему наименьшую индуктивность [1], в результате чего в этих цепях наводятся помехи. Чтобы свести их к минимуму, между питанием и землей устанавливаются высокочастотные развязывающие конденсаторы, которые наряду с собственной емкостью конструктивных элементов печатной платы и микропроцессора обеспечивают наиболее короткий путь возвратного тока.

Если представить данную физическую структуру эквивалентной схемой, показанной на рис. 2, то проблема формулируется следующим образом.

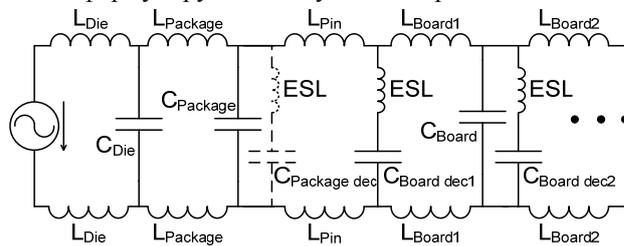


Рис. 2. Эквивалентная схема системы питания для высокочастотного возвратного тока

(L_{Die} , $L_{Package}$, L_{Pin} , $L_{Board(n)}$ – индуктивности путей возвратного тока в кристалле, подложке, выводах микропроцессора, печатной плате, соответственно, C_{Die} , $C_{Package}$ и C_{Board} – собственная емкость кристалла, корпуса и платы соответственно, $C_{Package dec}$ и $C_{Board dec(n)}$ – емкость развязывающих конденсаторов на подложке и плате, соответственно, ESL – эквивалентная последовательная индуктивность развязывающих конденсаторов)

С помехами по питанию следует бороться снижением импеданса системы питания. Один из путей – это уменьшение присутствующих в схеме индуктивностей. Если топология системы питания подложки и печатной платы реализована без нарушений, то величины L_{Die} , $L_{Package}$, $L_{Board(n)}$ практически невозможно уменьшить. Единственное, что можно сделать, это снизить индуктивность, образующуюся на выводах микропроцессора, оптимизировав расположение выводов земли и питания относительно сигнального вывода. Таким образом уменьшается площадь контура возвратного тока, а соответственно, и индуктивность L_{Pin} . Если же для подключения микросхемы используется сокет, то можно заменить его аналогичным, но с меньшей индуктивностью выводов.

Второй путь, применение развязывающих (decoupling) конденсаторов, значительно эффективней. Он в том или ином виде используется во всех устройствах современных вычислительных систем. В частности, как показано на рис.2, между землей и питанием на плате обычно устанавливаются конденсаторы $C_{Board dec}$ различных номиналов, типов и размеров. Тем не менее, хотя высокочастотная помеха, формирующаяся внутри микропроцессора, может быть значительно подавлена на печатной плате, из-за высокой индуктивности выводов наводка на них в определенных случаях оказывается весьма существенной. В таком случае установка дополнительной развязывающей емкости непосредственно на подложке микропроцессора ($C_{Package dec}$ на рис. 1 и рис. 2) может значительно снизить уровень помех на подложке, а, следовательно, и в самом кристалле.

B. Помехи по питанию в ядре микропроцессора

Рассмотрим вторую группу помех, образующихся при переключении вентилях внутренней логики (яд-

ра) микропроцессора. В данном случае высокочастотная составляющая возвратных токов от переключения вентиля и, соответственно, помеха от них формируются внутри кристалла. Для фильтрации помех в самом кристалле закладываются развязывающие емкости между питанием и землей. Например, в микропроцессоре "Эльбрус-S" суммарное значение этих емкостей (C_{Die} на рис. 2), согласно расчетам, приблизительно равно 110 нФ, а емкость, образующаяся системой полигонов питания и земли корпуса, оценивается десятками и сотнями пикофарад. Согласно проведенным авторами оценкам, с точки зрения фильтрации питания для современного микропроцессора этих емкостей недостаточно. Система фильтрации питания на плате должна дополнять эти развязывающие емкости, однако, из-за больших индуктивностей связи между кристаллом и конденсаторами на плате они могут эффективно работать только на сравнительно низких частотах [2]. Таким образом, развязывающие конденсаторы на подложке микропроцессора ($C_{Package\ decoupling}$ на рис. 1 и рис. 2), которые обладают значительно меньшей общей индуктивностью подключения, могут существенно улучшить качество фильтрации помех по питанию в его ядре. Есть данные, что подобные решения реализованы и в продукции ведущих производителей микропроцессоров, в частности, Intel. Однако опубликованных исследований на эту тему авторы не обнаружили.

Не смотря на единую природу помех по питанию в системе ввода-вывода и ядре микропроцессора, на практике недостаточное качество питания ядра микропроцессора может доставить значительно больше проблем. Во-первых, это связано с тем, что энергопотребление в ядре обычно значительно выше, чем во внешних интерфейсах. Так, например, в микропроцессоре "Эльбрус-S", согласно предварительным расчетам, ток питания ядра превышает токи питания в периферии питания более, чем в 5 раз. Во-вторых, в связи с тем, что фронты сигналов в ядре значительно короче, чем в интерфейсах, спектр сигналов помехи в ядре находится в области гораздо более высоких частот.

Существенен и тот факт, что помехи по питанию в системе ввода-вывода приводят к увеличению разброса фаз выходных сигналов (t_{skew}), а также могут увеличить время установления входного сигнала (t_{setup}). Поэтому при расчете временных диаграмм внешних интерфейсов, как правило, закладывается довольно большой запас, рассчитанный на погрешность технологии изготовления печатных плат. В то же время, при проектировании внутренней логики микропроцессора, желая получить максимальную производительность, вводят только минимальный запас по временным диаграммам. Таким образом, если помехи по питанию превышают допустимый

уровень, временные диаграммы могут "не сойтись", что приведет к ошибкам и сбоям.

IV. СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРА "ЭЛЬБРУС-S"

В настоящий момент ЗАО "МЦСТ" готовит к выпуску микропроцессор (система на кристалле) "Эльбрус-S". По сравнению с микропроцессором "Эльбрус" тактовая частота увеличилась с 300 МГц до 500 МГц, а общая потребляемая мощность оценочно должна вырасти на 50%. Таким образом, вопрос о стабильности напряжений питания в новом издании стоит особенно остро. Наряду с этим, опыт, полученный при отладке предыдущего микропроцессора серии, показал, что оптимизация расположения выводов микропроцессора ("распиновки") не гарантирует достаточный уровень стабильности напряжения питания и необходимо принимать дополнительные меры по фильтрации питания. В качестве наиболее эффективного и технологически реализуемого метода был выбран метод, упомянутый выше, – фильтрация помех по питанию установкой дополнительных развязывающих конденсаторов на подложке микропроцессора.

Наиболее целесообразно располагать развязывающие конденсаторы непосредственно в том месте, где плотность токов, протекающих по системе питания, наибольшая [3]. Для периферийного питания таким местом является область подложки от края кристалла до выводов земли и питания на плату. На рис. 3а изображена подложка микропроцессора с установленным кристаллом. Черными кружками выделены выводы периферийного питания, также показана область, на которой наиболее целесообразна установка развязывающих конденсаторов на номиналы питания интерфейсных цепей. С технологической точки зрения это вполне реализуемо, и трассировка дополнительных элементов не составляет больших проблем.

Что касается развязывающих конденсаторов второй группы, то их целесообразно устанавливать как можно ближе к кристаллу, в области трассировки соответствующего номинала на подложке. Однако из-за технологических ограничений невозможно установить какие-либо компоненты на подложку ближе, чем на 3 мм от края кристалла. Поэтому, как видно из рис. 3б, область, оптимальная для установки конденсаторов, и область, разрешенная технологией сборки микропроцессора, не пересекаются. Кроме того, полигоны питания ядра на подложке располагаются в области, технологически запрещенной для монтажа конденсаторов. Это не позволяет подключать их напрямую к полигону, используя связи с наименьшей индуктивностью. В результате возникают проблемы: как подключать конденсаторы, чтобы обеспечить макси-

мальную помехозащищенность, и будет ли положительный эффект от их использования – ведь распайка дополнительных компонентов на подложке значительно удорожает стоимость изготовления микропроцессора. На этапе разработки они решались с использованием моделирования.

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРА "ЭЛЬБРУС-S"

Целью моделирования были:

- 1) оценка эффективности использования развязывающих конденсаторов на подложке микропроцессора,
- 2) определение оптимального метода их монтажа,
- 3) выбор номенклатуры развязывающих конденсаторов,
- 4) оценка влияния развязывающих конденсаторов на уровень помех создаваемых микропроцессором в плате.

При создании и исследовании программной модели использовался пакет программ AWR Design Environment 2008. Моделировалась структура "кристалл – подложка – МПП", представленная рисунком 4. Кристалл показан в нем как набор генераторов помех, включенных между плоскостями PWR1 и GND1 (эти генераторы обозначены темными стержнями 1-8 в верхней части рисунка). Длительность фронта импульса помехи взята равной 1 нс. Амплитуда и внутреннее сопротивление источников импульсов подобраны так, чтобы амплитуда помехи на кристалле составляла 50-70 мВ (это величина помех, определенная в реальном эксперименте при установке предыдущего микропроцессора серии "Эльбрус" в сокет).

Электромагнитная структура подложки была выбрана согласно технологическим возможностям и рекомендациям фирмы Advanced Semiconductor Engineering, Inc., на производственных мощностях которой предполагается выпуск микропроцессоров. Размеры и форма моделируемых полигонов соответствуют возможностям реализации топологии системы питания в подложке.

Система питания печатной платы моделировалась как две параллельные бесконечные плоскости PWR_PCB и GND_PCB, подключенные к источнику питания с нулевым внутренним сопротивлением. Это было сделано с той целью, чтобы при анализе использования развязывающих конденсаторов на подложке исключить влияние системы фильтрации печатной платы на уровень помех в подложке.

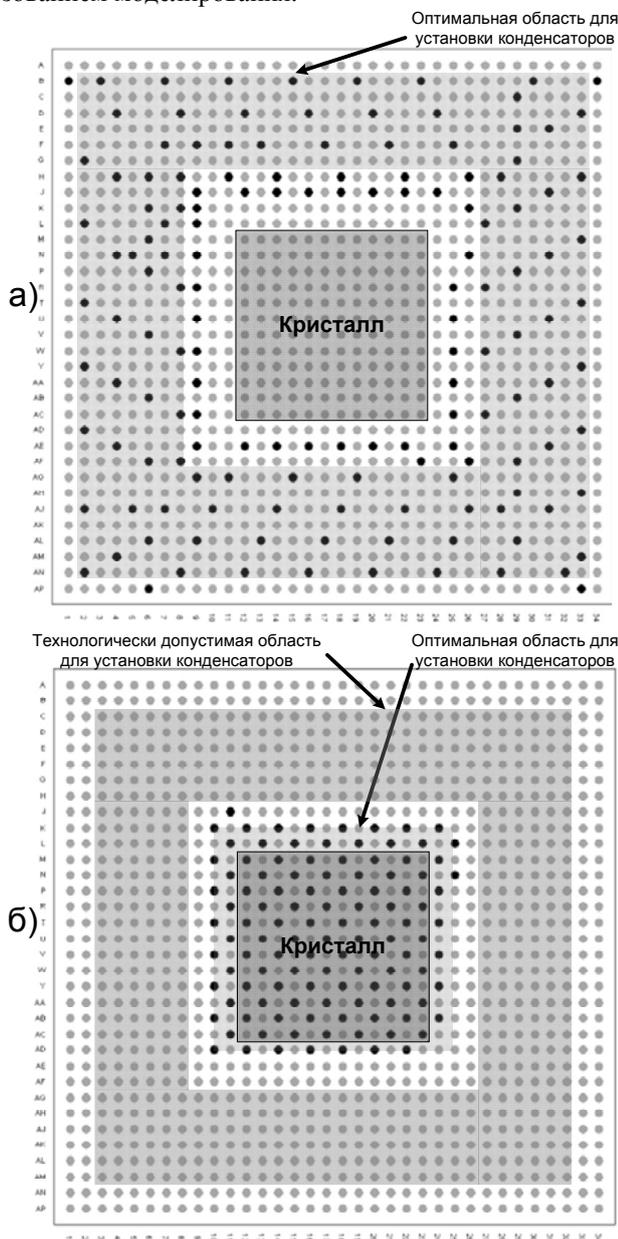


Рис. 3. Области, оптимальные и допустимые для установки развязывающих конденсаторов на цепи а) периферийных номиналов питания, б) питания ядра

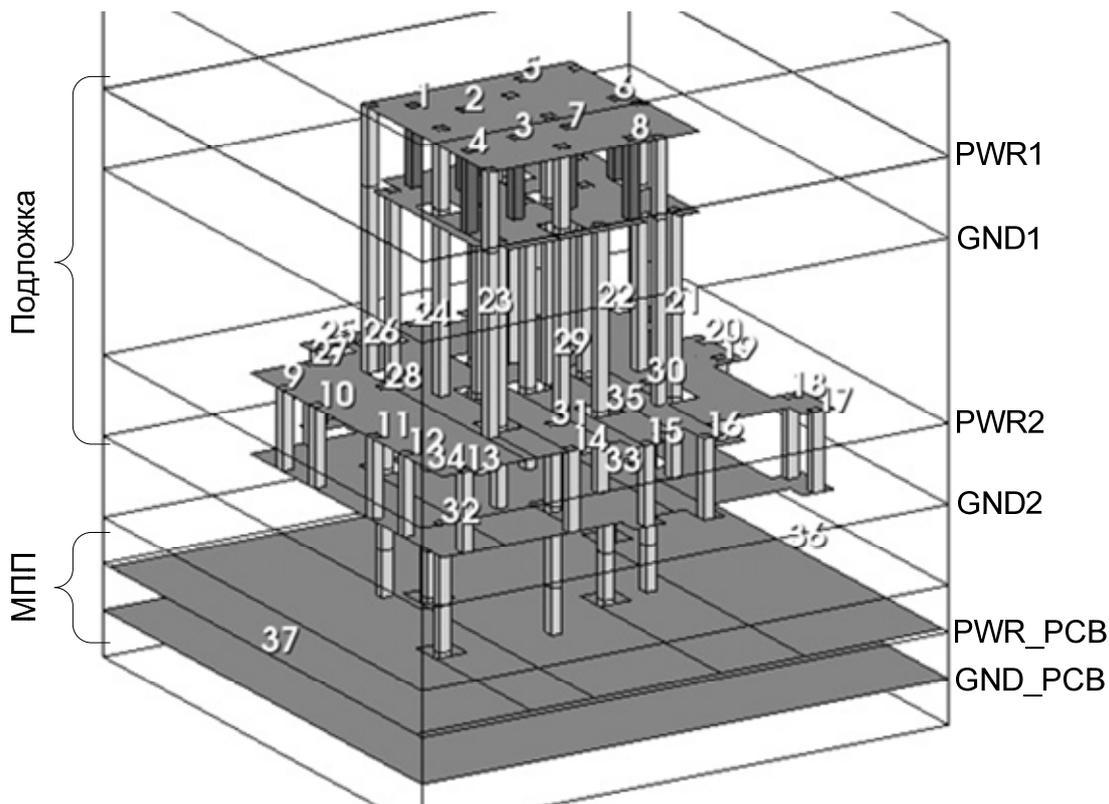


Рис. 4. Моделируемая электромагнитная структура

Подключение одного вывода микропроцессора к плате представлялось в модели структурой, включающей переходные отверстия между слоями подложки, шарик припоя и систему контактов, соединяющих с полигоном на плате. Рассматривались два варианта: микропроцессор распаян на плате, и микропроцессор установлен в сокет. В первом случае, индуктивность связи одного вывода оказалась равна приблизительно 1 нГн, в случае подключения через сокет – 3 нГн. С этими данными можно было подсчитать общую индуктивность всех выводов земли и питания микропроцессора "Эльбрус-S". Для упрощения общей модели число подключений в ней было взято равным 8 (перемычки, связанные с портами 28-35 на рис.4), а их суммарная индуктивность - общей подсчитанной индуктивности.

Развязывающие конденсаторы на подложке должны устанавливаться между полигонами PWR2 и GND2. На рис.4 они показаны как перемычки, связанные с портами 9-27. В связи с тем, что индуктивность подключения конденсатора предполагалась сравнимой с его собственной индуктивностью (ESL), существенная неточность в ее определении могла бы привести к заметной погрешности конечных результатов. Поэтому была создана и встроена в общую структуру отдельная модель, максимально точно учитывающая топологию подключения (рис. 5). В ней конденсатор, устанавливаемый на подложке, подключается к портам А и В на поверхности подложки, связанным с

полигонами PWR2 и GND2 через порты С и D, соответственно. Использование этой модели показало, что индуктивность подключения составляет приблизительно 0,1 нГн, это действительно сравнимо со значениями ESL высокочастотных керамических конденсаторов.

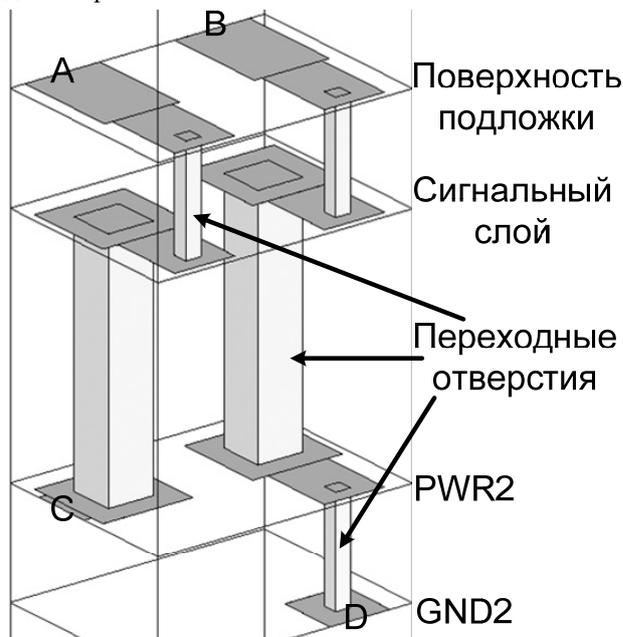


Рис. 5. Пространственная структура подключения конденсаторов

Что касается параметров конденсаторов, то изначально был выбран минимально доступный типоразмер 0201, в модельном ряду которого взята максимально доступная емкость 100 нФ. Однако собственная индуктивность такого конденсатора равна 0,36 нГн, что составляет больше, чем три четверти от общей индуктивности цепи развязки (0,36 + 0,1 нГн). Таким образом, разумно было бы для снижения общей индуктивности подобрать конденсаторы с меньшим значением ESL. Соответственно, в качестве альтернативы был выбран конденсатор той же емкости с типоразмером 0204 (использование этого типоразмера незначительно усложняет трассировку подложки) из серии "Low ESL" с пониженным значением собственной индуктивности, равным 0.11 нГн. При его использовании общая индуктивность цепи развязки уменьшается более чем вдвое.

Согласно результатам моделирования, приведенным в таблице 1, применительно к рассматриваемой топологии установка развязывающих конденсаторов на подложке микропроцессора позволяет существенно снизить уровень помех. При использовании кон-

денсатора в корпусе 0201 уровень помех снижается в 2-3 раза. Применение специальных низкоиндуктивных конденсаторов приводит к снижению помех в 3-7 раз и дает почти двукратный выигрыш по сравнению с 0201-конденсаторами. Наибольший выигрыш размещение развязывающих конденсаторов на подложке достигается при установке микропроцессора в сокет. (В этом случае выводы питания микропроцессора обладают высокой индуктивностью, что негативно влияет на эффективность системы фильтрации помех по питанию на плате.)

Установка конденсаторов на подложку приводит и к уменьшению крутизны поступающего в плату тока, что снижает уровень помехи, наводящейся на импеданс системы питания МПП.

Полученные выводы можно распространить и на систему питания внешних интерфейсов, в которой эффективность использования развязывающих конденсаторов увеличивается благодаря их непосредственной установке в зону наибольшей плотности токов.

Таблица 1

Сводная таблица результатов моделирования

	Тип моделируемых конденсаторов	Максимальная помеха, мВ	Максимальная крутизна тока, мА/нс
Микропроцессор установлен в сокет	Не установлены	60	270
	0201, 100 нФ	18,3	80
	0204, 100 нФ, Low ESL	7,8	38
Микропроцессор распаян на плате	Не установлены	22	280
	0201, 100 нФ	11,5	141
	0204, 100 нФ, Low ESL	6,0	80

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время исполнителями проекта "Эльбрус-S" принято решение в полной мере использовать результаты описанного исследования при реализации микропроцессора. Для дальнейшего изучения факторов, определяющих помехозащищенность микропроцессора, в рамках технологии корпусирования в подложку были введены дополнительные связи, которые соединяют вывод питания ядра и вывод земли на кристалле с двумя выводами на подложке. На плате они подключаются к тестовым точкам. Чтобы свести к минимуму влияние перекрестных помех, обе трассы были проведены максимально далеко от сигнальных линий подложки. В дальнейшем это позволит изучить влияние предполагаемых альтернатив конструктивной реализации микропроцессора и условий его работы на структуру и уровень помех по питанию, измеряемых непосредственно в кристалле.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воробушков В.В., Рябцев Ю.С. Особенности разработки топологии системы питания в многослойных печатных платах современных вычислительных устройств // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ – Москва, 2009. – В. 3. – с. 142–153.
- [2] Kim J. [et al.]. Separated Role of On-chip and On-PCB Decoupling Capacitors for Reduction of Radiated Emission on Printed Circuit Boards // Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2001. – P. 531–536.
- [3] Smith L. [et al.]. Power Distribution System Design Methodology and Capacitor Selection for Modern CMOS Technology // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 1999. – V. 22, N. 3. – P. 284–291.