



ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DEVELOPING AND MANUFACTURING INTEGRATED MICROCIRCUITS FOR INDUSTRIAL APPLICATION

УДК 621.382.2/3

БОБКОВ СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

Д.т.н., профессор

bobkov@cs.niisi.ras.ru

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

BOBKOV SERGEI G.

Ph.D, professor

bobkov@cs.niisi.ras.ru

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" (SRISA RAS)

Особенности микросхем промышленного назначения заключаются прежде всего в условиях их эксплуатации, требованиях по надежности и необходимости поддержки выпуска этих микросхем на протяжении длительного времени (до 20 лет) для гарантированного производства целого ряда изделий. В статье рассматриваются основные подходы при создании и производстве микросхем промышленного применения на основе более чем 20-летнего опыта.

Ключевые слова: доверенные системы; система на кристалле; производство микросхем; разработка микросхем.

Industry-oriented integrated microcircuits features depend on their actual operating conditions, requirements for reliability and necessity of supporting these microcircuits issue over a long period of time (up to 20 years) for the guaranteed manufacture of a wide range of goods. This paper examines the main approaches to designing and manufacturing industry-oriented microcircuits based on over than 20 years experience.

Keywords: trusted systems; system on chip; chip production; chip development.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН в течение более 20 лет ведет разработку и производство микросхем промышленного применения. В концепции развития института было заложено несколько этапов. На первом этапе в начале и середине 90-х годов институтом создавались электронные изделия на базе ПЛИС, отрабатывались алгоритмы, уточнялись требования к изделиям, и в то же время это были серийные поставки компьютеров «Багет». В качестве микропроцессоров использовались западные микросхемы компаний Intel и MIPS. В середине 90-х годов институт приступил к следующему этапу — разработке микропроцессоров на базе собственной RISC-архитектуры КОМДИВ. По системе команд архитектура близка к архитектуре MIPS, однако на базе нее можно реализовать и программную совместимость с микропроцессорами ARM. Было также развернуто проектирование различных контроллеров с учетом созданных ранее моделей микросхем на ПЛИС. Изготовление микросхем осуществлялось на западных фабриках. И, наконец, на третьем этапе было создано собственное производство микросхем. Все технологические процессы этого производства разрабатывались сотрудниками НИИСИ РАН.

Основные проблемы, с которыми столкнулся институт в процессе производства микросхем и компьютеров, следующие.

1. Западные компании периодически несколько изменяли технологический процесс производства микросхем, что, как правило, приводило к снижению частоты в пределах 10%. То есть можно столкнуться с тем, что партия микросхем, заказанная через несколько лет после сдачи ОКР, будет отличаться от первоначальной и некоторые характеристики могут не соответствовать конструкторской документации.

2. Иногда используемые западные технологические процессы закрываются и вводятся новые близкие процессы, что приводит к необходимости перепроектировать микросхемы и проводить типовые испытания.
3. Еще реже заводы, производящие пластины с кристаллами микросхем, продаются или закрываются, что приводит к необходимости искать другую компанию с близкими технологическими процессами.
4. Довольно регулярно используемые пластиковые корпуса микросхем снимаются с производства. Приходится создавать требуемые корпуса в других компаниях, что приводит к дополнительным затратам.
5. Коммерческие САПР не позволяют производить моделирование проектов при некоторых экстремальных условиях эксплуатации.
6. В случае производства на зарубежных фабриках необходимо раскрывать конечных пользователей микросхем, что не всегда удобно с коммерческой точки зрения.
7. В России отсутствует производство динамической и Flash-памяти, западные микросхемы регулярно снимаются с производства, что приводит к необходимости модернизации модулей. Делать запасы микросхем на много лет вперед экономически нецелесообразно.
8. Отсутствие массового спроса на микросхемы на российском рынке приводит к высокой стоимости микросхем и не позволяет в должной мере развиваться компаниям. Выход со своими микросхемами за рубеж сопряжен с огромными проблемами, никто не хочет отдавать свои рынки. Развитие отрасли невозможно без государственной поддержки.



9. В России отсутствует достаточное число разработчиков: для развития института приходилось вести собственную подготовку специалистов.

Указанные проблемы невозможно решать без полного владения создаваемыми проектами. Использование западных IP-блоков приводит к тому, что перенести проект на другую технологию без изменения характеристик микросхемы очень проблематично. Если же модернизированная микросхема с учетом параметров новой технологии даже незначительно изменяется, это может сказаться на функционировании конечного продукта с этой микросхемой, стоимость которого вместе с программным обеспечением может многократно превышать затраты на создание микросхемы. Таким образом, при проектировании микросхемы следует понимать время ее жизни и осознавать необходимость поддержки ее выпуска. Именно поэтому политика института заключается в использовании только своих IP-блоков для микросхем промышленного применения. Это позволило поддерживать выпуск ряда микросхем на протяжении уже почти 20 лет несмотря на то, что было несколько модернизаций западных технологических процессов и ряд фабрик были закрыты.

Следующей проблемой является создание микросхем, функционирующих в заданных условиях эксплуатации. Западные компании разделяют микросхемы на категории коммерческих, промышленных, авиационных, военных и космических. В соответствии с этими категориями западные САПР проектирования микросхем позволяют делать требуемые проверки, создаются соответствующие библиотеки элементов. Стандартные библиотеки КМОП-процессов, как правило, отхарактеризованы в температурном диапазоне от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, и для большинства применений этого достаточно. Однако для создания микросхем космического применения таких технологических процессов, как управление железнодорожными стрелками, контроллеров для нефтегазовой промышленности и пр., требуются температуры

функционирования до -60°C . Наиболее правильным в этом случае было бы провести характеризацию библиотеки для требуемых температур, однако это сопряжено со значительными временными и материальными затратами. Опыт работы показал, что для достижения цели достаточно использовать возможности современных САПР по настройке коэффициентов при проведении топологического проектирования. Например, при проектировании микросхем в САПР Innovus для достижения работоспособности микросхемы в широком температурном диапазоне возможно использование следующих команд САПР:

1. Команда `update_rc_corner` позволяет уменьшать или увеличивать значения сопротивления и емкости межсоединений для определенного сочетания условий техпроцесса, питания и температуры.
2. Команда `set_timing_derate` устанавливает коэффициенты масштабирования временных задержек в путях `setup` и `hold`.
3. Команда `set_clock_uncertainty` устанавливает значение разбежки синхросигнала на кристалле.

Коэффициенты приходится подбирать экспериментальным путем, однако чем больше мы «зажимаем» проект этими коэффициентами, тем больше запас проекта по временной диаграмме. Учитывая, что западные компании зачастую без предупреждения изменяют технологический процесс и параметры микросхем могут несколько изменяться, такой запас позволяет снизить возможные риски.

При переходе на технологические нормы 65 нм и ниже возникает целый ряд проблем при проектировании сложных высокопроизводительных микросхем. Прежде всего из-за снижения топологических норм возрастает разброс параметров транзисторов, возрастают токи утечки, появляется значительная зависимость параметров от разбросов напряжения питания и температуры на кристалле. Для таких микросхем, как современные высокопроизводительные микропроцессоры, разброс температуры

Over 20 years SRISA has been developing and manufacturing industry-oriented microcircuits. The concept of the Institute development includes a number of stages. At the first stage, at the beginning and in the middle of 1990s, the Institute produced electronic components based on FPGA, worked out algorithms, specified requirements for electronic components, and, at the same time, performed serial delivery of "Baget" computers. Foreign microcircuits manufactured by Intel and MIPS were used as microprocessors. In mid 1990s the Institute started the next stage of its development — designing microprocessors based on KOMDIV, its own RISC architecture. In respect of command system, this architecture is close to MIPS architecture, and its base allows implementing and providing software compatibility with ARM microprocessors. The Institute started developing various controllers considering earlier designed microcircuits based on FPGA, but microcircuits were manufactured at foreign factories. Finally, at the third stage, the domestic production of microcircuits was started. All

technological processes of this production were developed by SRISA staff members.

The main problems the Institute faced with in the course of microcircuits and computers production were as follows:

1. Foreign companies periodically slightly changed the technological process of microcircuits production, which, usually, resulted in frequency reduction within 10 %. That leads to a possibility of facing a situation, when a microcircuits batch ordered some years after ending the design and development works will differ from the original, and some characteristics may not comply with the design documentation.
2. Sometimes the applied foreign technological processes are closed and new similar processes are introduced, leading to the necessity of redesigning microcircuits and performing routine tests.
3. In rare cases, when factories producing wafers with microcircuits chips are closed or sold, there is a necessity of finding another company with close technological processes.

4. There are cases of phasing out plastic packages of microcircuits that are regularly used. Then it becomes necessary to create packages at other companies, which results in additional costs.
5. Commercial CADs do not make it possible to perform design modelling in case of some extreme operating conditions.
6. In case of production at foreign factories it is necessary to declare end users of microcircuits, which is not always convenient in terms of commerce.
7. There is no production of dynamical and Flash memory in Russia; foreign microcircuits are regularly taken out of production, which leads to the necessity of modules modernization. Stocking microcircuits for many years ahead is not economically expedient.
8. The absence of mass demand for microcircuits on Russia's market results in microcircuits high cost and does not allow the companies proper development. Putting domestic microcircuits on the world market is problematic, as no one wants to give up their own



на кристалле может превышать 5°C , а просадки по напряжению питания — 10 %. Для достижения предельных параметров по частоте создаваемых микросхем необходимо учитывать все эти разбросы при моделировании. Стандартные коммерческие САПР позволяют провести моделирование для наихудших случаев по температуре, технологическому разбросу и напряжению питания с учетом всех вышеперечисленных явлений, что позволяет добиться работоспособности микросхем. Однако это не позволяет получить предельных параметров. Отдельной задачей становится построение дерева синхронизации для высокочастотных микросхем. Необходима схемотехническая компенсация технологических вариаций, разброса по напряжению питания и температуре. Коммерческие САПР в должной степени не позволяют решить возникающие проблемы, они ориентированы на достижение работоспособности микросхем, а не на достижение предельных частот.

Работы, проведенные командой Петросянца К. О. [1], показали, что задержка распространения сигнала по линии межсоединения для 4-разрядного сумматора БМК серии 6501XM1 без учета неоднородного температурного профиля, достигающего в пределе разброса 4°C , составила 22,9 пс, а с учетом — 31,9 пс, т. е.

markets. The further branch development is impossible without government's support.

9. Russia does not have a sufficient number of developers; for the Institute's further development it was necessary to carry out its own training of specialists.

The indicated problems cannot be solved without the entire possession of projects being created. The utilization of foreign IP-modules makes it impossible to transfer the project to another technology without modifying microcircuit characteristics. If your modernized microcircuit with respect to new technology parameters changes even insignificantly, it may affect the operation of the end product using this microcircuit, and the end product cost together with software will be greater than costs on developing the microcircuit by several fold. Thus, while designing the microcircuit it is necessary to understand its service life and the necessity of supporting its issuing. That is why the policy of the Institute consists in using only its own IP-modules for industry-oriented microcircuits. This made it possible to support issuing a number of microcircuits over a period of about two decades despite modernization of several foreign technological processes and the closure of a number of factories.

Another problem is creating microcircuits that can operate in specified operating conditions. Western companies divide microcircuits



Рис. 1. Рост объема производства 32-разрядного микропроцессора ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН и его системного контроллера

Fig. 1. Increase in production volume of SRISA 32-bit microprocessor and its system controller

пренебрежение тепловыми эффектами вызывает погрешность 28 %. Что это означает в практическом плане? Современные коммерческие САПР позволяют проводить моделирование для наихудшего случая, и возникающая погрешность в 28 % учитывается именно как требуемый запас в создаваемой схеме, а не как возможность ее учета с точки зрения повышения частоты функционирования микросхемы за счет топологической и схемотехнической коррекции. Аналогичные данные можно получить и для просадки напряжения питания. Крупнейшие мировые компании в своем маршруте проектирования также используют коммерческие САПР, однако для достижения предельных параметров ими создаются дополнительные программы, учитывающие эти эффекты.

into such categories as commercial, industrial, aviation, military and space-oriented. In accordance with these categories, foreign CADs used for microcircuits design allow all the necessary inspections; respective elements libraries are created. Standard libraries of CMOS-processes are typically specified within the temperature range from -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$, which is quite sufficient for most applications. However, to create microcircuits to be used in space, for such technological processes as rail road switches control, controllers for oil and gas industry etc., one needs lower operating temperatures, down to -60°C . In this case it would be appropriate to specify library for required temperatures, but it would result in significant time and material costs. Experience has shown that to this end it is sufficient to utilize the advantages of modern CADs for tuning coefficients in the course of topology design. For example, while designing microcircuits using Innovus CAD, to provide microcircuits operability in wide temperature range it is possible to use the following CAD instructions:

1. Instruction `update_rc_corner` permits one to reduce or increase resistance and capacity values of interconnections for specified combinations of technical process conditions, voltage supply and temperature.
2. Instruction `set_timing_derate` sets scaling coefficients of time delays in setup and hold routes.

3. Instruction `set_clock_uncertainty` sets the value of misalignment for clock signal on a chip.

Coefficients have to be chosen experimentally, but the more we "restrict" the design by these coefficients, the greater is timing diagram margin. Taking into consideration that foreign companies often change technological process without notification and microcircuits parameters may be slightly changed, this margin makes it possible to reduce possible risks.

While transferring to the technology with 65nm element size and lower, there arises quite a number of problems of designing complex high-performance microcircuits. First of all, geometry size reduction results in an increase of transistor parameters scatter, as well as leakage current, and leads to a significant dependence of parameters on supply voltage scatter and chip temperature. For such microcircuits as modern high-performance microprocessors, the spread of chip temperature may exceed 5°C , and supply voltage slumps may exceed 10 %. To achieve limiting parameters for the frequency of developed microcircuits, it is necessary to consider all these scatters while modelling. Standard commercial CADs allow one to perform modelling for worst cases in terms of temperature, process tolerance and supply voltage with respect to all the above mentioned phenomena, which permits obtaining microcircuits operability. Nevertheless, it does not allow one to obtain limiting parameters.



Не менее сложной является задача учета радиационных эффектов. Для достижения требуемых параметров по радиостойкости требуется учет возникающих эффектов в схемотехнике и топологии кристалла, то есть необходима корректировка проекта. Причем корректировка проекта должна быть разная для различных узлов микросхемы, исходя из тех или иных эффектов. Это невозможно сделать стандартными коммерческими САПР.

Повышения производительности микросхем можно также достигнуть за счет оптимизации технологического процесса для конкретной микросхемы. Для современных высокопроизводительных микросхем это могут делать только крупнейшие компании с массовым производством в ведущих компаниях — производителях пластин. На отечественных предприятиях такие возможности для предельных технологических норм пока отсутствуют из-за отсутствия дополнительных ресурсов и того, что технологические процессы, как правило, покупаются, а не создаются самостоятельно, то есть отсутствует глубокое понимание физических процессов.

Не менее сложными являются задачи поддержки собственного производства микросхем. Небольшие серии микросхем приводят к их значительной стоимости, что делает их конкурентными только для ответственных применений в промышленности. При организации производства этих микросхем необходимо также понимать, что их рынок существенно отличается от коммерческого и выпуск продукции увеличивается очень постепенно. На рис. 1 показано производство 32-разрядного микропроцессора

и его системного контроллера. Меньший выпуск системного контроллера говорит о том, что ряд компаний предпочитают создание собственных системных контроллеров на ПЛИС. Из графика также видно, что объем производства микропроцессора за 10 лет увеличился на порядок. Таким образом, создание мелкосерийного производства без возможности его развития может привести к возникновению больших проблем для обеспечения выпуска микросхем. Предприятиям нельзя сказать, что мощности на пределе и увеличение производства невозможно: в таком случае с вами никто в дальнейшем работать не будет.

Таким образом, проводимые работы показали, что без создания собственных средств проектирования и производства микросхем невозможно создание микросхем с предельными параметрами функционирования. Необходимо полное владение проектами, использование западных IP-блоков может привести к невозможности поддержки выпуска микросхем на протяжении длительного времени. Для обеспечения развития компании необходима организация подготовки специалистов. В НИИСИ РАН эта подготовка ведется совместно с НИЯУ МИФИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петросянц К. О., Батаруева Е. И., Рябов Н. И. Расчет задержек в межсоединениях цифровых БИС с учетом электротепловых эффектов // 16-я научно-техническая конференция, Суздаль, 2017. — С. 51–52.

To build a clock tree for high frequency microcircuits is another challenge. It is necessary to resort to circuit level compensation for the process variations, scatter in supply voltage and temperature. Commercial CADs do not make it possible to solve arising problems in full measure; they are oriented at achieving microcircuits operability, rather than limiting frequencies.

The research made by Petrosiants K. O. group [1] has demonstrated 22.9ps delay in signal propagation in interconnection line for 4-bit adder of FPGA series 6501XM1 (not considering non-uniformity of temperature profile achieving limiting scatter of 4 °C) and 31.9ps delay (with proper non-uniformity consideration) i.e. the neglect of thermal effects results in error equal to 28%. What does it mean in practice? Modern commercial CADs enable one to conduct modelling for worst case, and the error of 28% is considered exactly as a required margin in the circuit being created, rather than as a possibility to consider it in respect of ability to increase the microcircuit operating frequency by topological and circuit level corrections. Similar data may be obtained for supplying voltage slump. Largest world companies also use commercial CADs in their design flow, but for achieving limiting parameters they develop additional programs that consider these effects.

No less complicated is the task of considering radiation effects. For obtaining required parameters of radiation hardness it is necessary

to consider the effects arising at circuit level chip topology, i.e. it is necessary to perform the design correction. What is more, the design correction should be different for various microcircuit nodes, depending on specific effects, which is impossible to be done using standard commercial CADs.

Increases in microcircuit performance can also be provided by optimizing the technological process for a certain microcircuit. For modern high-performance microcircuits it can be done only by largest companies with mass production in leading wafer manufacturing companies. Regrettably, domestic enterprises are incapable of applying limiting design standards, due to lack of additional resources and because of foreign technological processes that are not developed on their own, but are purchased, and there is no deep understanding of the underlying physical processes.

Supporting domestic microcircuits production also poses problems. Small microcircuits batches result in considerable costs which makes them competitive only for critical industrial applications. While organizing the production of these microcircuits it is necessary to bear in mind that their market considerably differs from the commercial one, and the production output increases gradually. Fig. 1 shows the process of manufacturing a 32-bit microprocessor and its system controller. The lower system controller output indicates that a number

of companies prefer to create their own controllers based on FPGA. The graph shows that over a decade the volume of the microprocessor production increased by an order of magnitude. Thus, the creation of small-batch manufacture with no prospect of development may cause significant problems while providing the microcircuits output. The enterprises should not be told that their production capacities are limited and an increase in the output is impossible, because in this case nobody will ever cooperate with you in the future.

Therefore, the research has shown that without developing design tools and producing microcircuits of our own it is impossible to create microcircuits with limiting parameters of operation. Full possession of designs is obligatory, because the use of foreign IP-modules may hinder the support of microcircuits issuing over a long time. To provide the company's development it is necessary to organize the training of its specialists. As for the Institute, we have been training specialists jointly with MEPhI National Nuclear Research University.

REFERENCES

1. Petrosyants K. O., Batarueva E. I., Ryabov N. I. *Raschet zaderzhek v mezhsoedineniyakh tsifrovyykh BIS s uchetom elektroteplovykh effektiv* // 16-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, Suzdal', 2017. P. 51–52. (In Russian).