

# СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

## SYSTEMS ON CHIP

УДК 51-7

**А. В. Вишнеков**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., avishnekov@hse.ru,

**В. В. Ерохин**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц., vladimir.v.erokhin@gmail.com,

**Е. М. Иванова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., emivanova@hse.ru

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры "Прогресс", Москва

### ВЫБОР IP-БЛОКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Поступила в редакцию 31.05.2016

*Рассмотрены вопросы выбора наиболее рациональных вариантов IP-блоков при проектировании СнК (систем на кристалле) из имеющихся альтернативных вариантов, предлагаемых на сайтах производителей и поставщиков. Предложена методика выбора IP-блока на основе применения методов поддержки принятия решений, позволяющая использовать как опыт и знания экспертов в данной предметной области, так и мнение лица, принимающего решение (руководителя проекта, инженера, конструктора). Предложенная методика позволяет автоматизировать процесс выбора наиболее приемлемого варианта IP-блока с точки зрения заданных критериев и ограничений и сократить время на принятие решения.*

**Ключевые слова:** IP-блок, СнК, методы поддержки принятия решения, метод лексикографического полупорядочения, метод аналитических иерархий

#### Введение

Развитие методов проектирования СнК привело к возможности сокращения сроков и затрат на разработку на основе применения технологии повторного использования сложно-функциональных блоков (СФ-блоков или IP-блоков). В настоящее время многие компании предлагают IP-блоки различного назначения. Причем IP-блоки одного класса и назначения могут иметь различные функциональные, технико-эксплуатационные, проектные, стоимостные и технологические характеристики и число предлагаемых альтернативных вариантов может быть достаточно велико. В результате для разработчика встает сложный вопрос выбора альтернативного варианта IP-блока для использования в разрабатываемом изделии. Такая задача появляется, если не для любого IP-блока, то достаточно часто, например, для выбора одного из альтернативных крипомодулей или для процессорных блоков (различных контроллеров).

Результаты психологических исследований показывают, что решение задачи выбора рационального варианта в случае, если число критериев оценки качества принимаемых решений больше 5–7, представляет для человека крайне трудоемкую задачу. Необходимо также учитывать, что число альтернативных вариантов IP-блоков может быть большим ( $> 10$ ) и это еще более усложняет задачу для конструктора. Для облегчения решения задачи выбора IP-блока в соответствии с требованиями и особенностями проекта СнК необходима разра-

ботка методики, позволяющей автоматизировать данный процесс с использованием опыта, знаний и предпочтений разработчика. В данной методике могут быть использованы методы поддержки принятия решений, позволяющие представить процедуру нахождения наиболее рационального решения в виде последовательности элементарных процедур принятия решений, при выполнении которых человек, как правило, не делает ошибок.

#### Постановка задачи

Задача выбора IP-блока является достаточно сложной многокритериальной задачей. Причем часть критериев носят взаимопротиворечивый характер, например такие, как стоимость и функциональность или сложность интеграции в конечное изделие. Общее число  $K$  всех критериев отбора велико ( $K > 10$ ). Критерии носят как численный (цена, потребляемая мощность, производительность, площадь, занимаемая блоком на кристалле), так и лингвистический характер (архитектура, сложность интеграции в конечный продукт, схема оплаты). Число альтернативных вариантов компаний-поставщиков необходимого IP-блока может достигать значительного числа ( $N > 10$ ).

#### **Критерии выбора IP-блока [1, 2].**

1. Функциональность (перечень вложенных критериев зависит от конкретного назначения IP-блока).

2. Архитектура (для классов сложно-функциональной продукции таких, как процессорные IP-ядра [3]).

Основные оценочные параметры:

- архитектура ЦП (RISC/CISC);
- система команд (полнота, оптимальность с точки зрения данного приложения);
- разрядность АЛУ;
- число регистров общего назначения;
- наличие и объем кэш-памяти команд и данных;
- тактовая частота;
- время доступа к основной памяти в тактах синхронизации;
- разрядность шин данных и адреса.

В ряде случаев могут приниматься во внимание дополнительные оценочные параметры:

- число стадий конвейера;
- расположение многобайтных чисел в памяти (Big/Little Endian);
- возможность реконфигурации параметров IP-блока;
- и другие.

3. Техничко-эксплуатационные характеристики (перечень вложенных критериев зависит от конкретного назначения IP-блока).

4. Цена лицензии.

5. Вид поставки:

- открытый RTL-код — Soft-IP;
- синтезированный код (netlist), привязанный к конкретной технологии — Firm-IP;
- готовая топология — Hard-IP.

6. Репутация фирмы-поставщика IP-блока.

7. Сложность интеграции в конечный продукт:

- наличие исчерпывающей документации;
- наличие и полнота тестового обеспечения;
- срок интеграции IP-блока в проект.

8. Ценность и значимость IP-блока:

- режим его использования клиентом (число проектов с использованием блока);
- массовость тиража разрабатываемых продуктов (СНК).

9. Схема оплаты.

10. Поддержка жизненного цикла IP-блока:

- поддержка со стороны поставщика IP-блока;
- возможность модификации под требования заказчика;
- портируемость на новый технологический процесс;
- возможность выполнения дополнительных договорных работ.

**Дополнительные критерии выбора Soft-IP и Firm-IP блоков.**

1. Выполненная поставщиком проверка в кремнии.

2. Тактовая частота для заданной технологии изготовления.

3. Предполагаемая производительность.

4. Потребляемая мощность (теоретическая или реальная).

5. Площадь, занимаемая блоком на кристалле.

6. Соответствие стандартным спецификациям (если необходимо).

7. Затраты на проверку в кремнии.

8. Средства поддержки разработки программ.

9. Технология изготовления (для Firm-IP).

**Дополнительные критерии выбора Hard-IP блока.**

1. Тактовая частота.

2. Производительность.

3. Потребляемая мощность.

4. Площадь, занимаемая блоком на кристалле.

5. Соответствие существующим стандартам.

6. Возможность выбора альтернативного поставщика на случай форс-мажора.

### Этапы решения задачи выбора IP-блока

Решение задачи выбора IP-блока можно разделить на несколько этапов.

**Этап 1.** Формирование списка критериев выбора IP-блока и их ранжирование. На первом шаге этапа 1 разделяем все множество критериев на следующие группы:

- функциональные критерии;
- технико-эксплуатационные критерии;
- проектные критерии;
- стоимостные и временные критерии;
- критерии поддержки и сопровождения продукта;
- технологические критерии;
- дополнительные критерии.

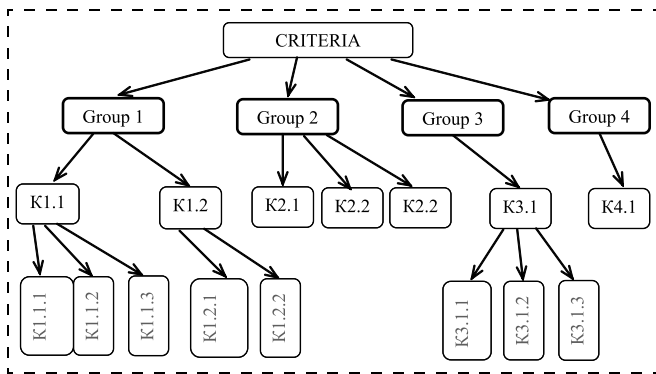
На втором шаге этапа 1 ранжируем группы критериев по степени важности на основе метода предпочтений [4] (если привлекаются эксперты), или используя процедуру метода аналитических иерархий [5] (если задачу решает ЛПР — лицо, принимающее решение).

Метод предпочтений позволяет рассчитать ценность критериев с учетом мнений экспертов, рассматривающих различные стороны задачи выбора IP-блока. Данный метод легко поддается автоматизации, однако при большом числе критериев требуется расчет коэффициента конкордации для проверки мнений экспертов на согласованность. Так как число групп критериев невелико (< 10), вероятность получения согласованной оценки экспертов при их ранжировании достаточно большая.

На третьем шаге этапа 1 вычисляем веса критериев каждой группы. Так как общее число критериев равно 16—20, то в каждой подгруппе будет 3—4 критерия, и тогда их вес внутри группы можно рассчитать на основе метода аналитических иерархий, построив трехуровневую иерархическую систему критериев. В ней первый уровень иерархии составляют группы критериев, второй уровень — простые или составные критерии внутри группы, третий уровень — вложенные критерии — для составных из второго уровня (см. рисунок).

На четвертом шаге этапа 1 рассчитываем итоговые веса всех критериев методом аналитических иерархий (если задачу решает ЛПР) или методом предпочтений (если привлекаются эксперты).

**Этап 2.** Поэтапное сокращение множества альтернативных IP-блоков. Так как число альтерна-



**Иерархия критериев**  
Hierarchy of criteria

тивных вариантов выбираемого IP-блока может быть значительным, то для его сокращения возможно использование метода лексикографического полуупорядочения [6]. Согласно методу сравниваем и отбираем приемлемые альтернативы последовательно по каждому критерию, начиная с наиболее важного критерия. Реализуем циклическую процедуру по всем критериям, пока список альтернатив не сократится до небольшого числа ( $\leq 10$ ).

При сравнении альтернатив по всем критериям ввиду слишком большого их числа вероятность того, что IP-блоки многих компаний-разработчиков удовлетворят всем поставленным критериям, невелика. Значит, применяя такой отбор, можно существенно сократить число альтернатив.

Этот процесс можно регулировать, изменяя границы интервалов допустимых значений критериев. Если критерии не числовые, а лингвистические, то для установления интервала оценок по ним вводятся вербальные шкалы значений критериев.

**Этап 3. Выбор наиболее приемлемого IP-блока.** Если число альтернатив сократилось до 10 и менее, то для окончательного определения наиболее удовлетворяющей всем критериям альтернативы используем метод аналитических иерархий, так как он позволяет провести наиболее детальное сравнение альтернатив с использованием заданной шкалы оценки предпочтительности при попарном сравнении альтернатив [5].

### Пример решения задачи выбора IP-блока

Допустим, что группа экспертов или ЛПР решает задачу выбора Hard-IP-блока (например, контроллера DDR4-памяти). При этом были установлены ограничения на значения его характеристик, при нарушении которых IP-блок считается неподходящим для рассматриваемого проекта. К таким ограничениям можно отнести функциональные характеристики IP-блока (интерфейс с определенным типом шины, глубина буферизации входных и выходных данных и др.), технологический процесс изготовления (для Hard-IP) и др.

Предположим, что экспертная группа выбрала для сравнения следующий набор критериев оцен-

ки важности рассматриваемого IP-блока для заданного проекта.

**Группа 1 критериев** (технико-эксплуатационные).

K1.1. Техничко-эксплуатационные характеристики.

K1.1.1. Удельная потребляемая мощность.

K1.1.2. Площадь, занимаемая блоком на кристалле.

K1.1.3. Тактовая частота.

K1.2. Архитектура.

K1.2.1. Система команд.

K1.2.2. Разрядность.

**Группа 2 критериев** (стоимостные и временные).

K2.1. Цена лицензии.

K2.2. Схема оплаты.

K2.3. Сроки поставки.

**Группа 3 критериев** (проектные).

K3.1. Сложность интеграции в конечный продукт.

K3.1.1. Наличие исчерпывающей документации.

K3.1.2. Наличие тестового обеспечения.

K3.1.3. Срок интеграции.

**Группа 4 критериев** (дополнительные).

K4.1. Репутация фирмы-производителя.

На первом этапе решения задачи следует определить веса критериев. При этом следует учесть иерархическую структуру системы критериев (см. рисунок), где для окончательного сравнения альтернативных IP-блоков используются критерии в конечных вершинах (листьях) этого иерархического графа. При расчете веса  $W$  критерия самого нижнего уровня иерархии его локальный вес в своей иерархической группе следует умножить на вес соответствующего составного критерия и/или вес группы критериев. Например, для веса критерия "K1.1.3. Тактовая частота" справедлива следующая формула:

$$W_{K1.1.3}^{\text{итог}} = W_{K1.1.3}^{\text{лок}} \times W_{K1.1}^{\text{лок}} \times W_{\text{гр1}}$$

Рассмотрим пример групповой процедуры принятия решений для ранжирования групп критериев по степени важности. Используем метод предпочтений. Допустим в оценке участвуют три эксперта, каждый из которых оценивает группы 1—4 по значимости для проекта исходя из своего профессионального опыта (табл. 1). Максимальный балл получает наиболее важная группа критериев.

Далее эти оценки преобразуют по следующему правилу (согласно методу предпочтений): новую преобразованную оценку вычисляют как разность числа групп (в нашем случае — 4) и первоначальной экспертной оценки группы (табл. 2). Затем рассчитывают суммарную оценку каждой группы всеми экспертами и общую сумму  $C$  всех оценок  $C_{\text{гр}i}$  (табл. 2 — предпоследняя строка). Окончательные веса групп критериев вычисляют по формуле  $W_{\text{гр}i} = C_{\text{гр}i}/C$  (табл. 2 — последняя строка).

Для расчета весов критериев всех последующих уровней иерархии применим ту же процедуру и рассчитаем итоговые веса критериев с учетом их

иерархической вложенности. Затем проранжируем все критерии, находящиеся в конечных вершинах иерархической структуры (см. рисунок) по значению их весов: наиболее важным будет критерий с максимальным весом. Допустим, что в результате

Таблица 1  
Оценки важности групп критериев, выставленные экспертами

Table 1  
Estimations of the importance of the groups of criteria, done by experts

Эксперты Experts	Важность группы $i$ критериев Importance of group $i$ of the criteria			
	Группа 1 Group 1	Группа 2 Group 2	Группа 3 Group 3	Группа 4 Group 4
Эксперт 1 Expert 1	1	2	4	3
Эксперт 2 Expert 2	2	1	4	3
Эксперт 3 Expert 3	1	3	2	4

Таблица 2  
Преобразованные оценки важности групп критериев

Table 2  
Transformed estimations of importance of the groups of criteria

Эксперты Experts	Преобразованная оценка группы $i$ Transformed estimation of group $i$				$C = \sum(C_{\text{гpi}})$
	Группа 1 Group 1	Группа 2 Group 2	Группа 3 Group 3	Группа 4 Group 4	
Эксперт 1 Expert 1	3	2	0	1	18
Эксперт 2 Expert 2	2	3	0	1	
Эксперт 3 Expert 3	3	1	2	0	
Суммарная оценка группы Total estimation of group $C_{\text{гpi}}$	8	6	2	2	
Вес группы критериев Weight of group of criteria $W_{\text{гpi}}$	0,45	0,33	0,11	0,11	

Таблица 3  
Определение степени удовлетворения альтернативы критерию 5

Table 3  
Definition of the degree of satisfaction of the alternatives by criterion 5

Альтернатива Alternative	Удельная потребляемая мощность (до 20 мкВт/МГц) Specific power consumption (up to 20 mcW/MHz)	Степень удовлетворения Degree of satisfaction
IP1	12,1	Удовлетворительная Satisfactory
IP2	10,5	Удовлетворительная Satisfactory
IP3	9,6	Удовлетворительная Satisfactory
IP4	17,3	Удовлетворительная Satisfactory
IP5	27,3	Неудовлетворительная Unsatisfactory
IP6	24,0	Неудовлетворительная Unsatisfactory

процедур экспертных оценок получены 12 критериев ( $k = 12$ ) и следующее ранжирование критериев по важности для рассматриваемого проекта (1 — наиболее важный, 12 — наименее):

- 1) разрядность не менее 32 (вес 0,21);
- 2) система команд RISC (вес 0,17);
- 3) тактовая частота от 600 МГц (вес 0,14);
- 4) цена лицензии до 500 000 руб. (вес 0,11);
- 5) удельная потребляемая мощность до 20 мкВт/МГц (вес 0,09);
- 6) площадь, занимаемая блоком на кристалле 0,8 мм<sup>2</sup> (вес 0,08);
- 7) схема оплаты: с постоплатой или с частичной (до 25 %) предоплатой (вес 0,06);
- 8) наличие исчерпывающей документации полностью в наличии или будет предоставлена в течение 2 мес. (вес 0,05);
- 9) сроки поставки до 2 мес. (вес 0,03);
- 10) наличие тестового обеспечения, определяемая экспертом шкала степени тестового покрытия (вес 0,03);
- 11) репутация фирмы-производителя без нареканий (вес 0,02);
- 12) срок интеграции до 3 мес. (вес 0,01).

Также эксперты определяют граничные значения оценочных шкал для каждого из критериев.

На втором этапе решения задачи выбора IP-блока среди множества альтернатив предложено использовать метод лексикографического полуупорядочения, согласно которому весь список альтернатив анализируют на предмет удовлетворения самому важному критерию (в нашем примере "Разрядность"). Степень удовлетворения определяется по следующему правилу:

- удовлетворительная альтернатива — значение проверяемого параметра IP-блока находится в границах оценочной шкалы соответствующего критерия;
- неудовлетворительная альтернатива — значение проверяемого параметра IP-блока выходит за границы оценочной шкалы соответствующего критерия.

Рассмотрим пример полуупорядочения шести альтернатив по критерию "Удельная потребляемая мощность до 20 мкВт/МГц" (табл. 3). Из примера видно, что критерию 5 удовлетворяют альтернативы IP1, IP2, IP3, IP4 (выделенные серым фоном строки табл. 3).

Аналогичные процедуры проводим для всех критериев, начиная с наиболее важного. После каждой процедуры полуупорядочения множество "удовлетворительных" альтернатив может значительно сократиться. Остановиться следует тогда, когда в этом множестве останется 10 и менее альтернатив.

Далее переходим к этапу 3 и покажем пример применения метода аналитических иерархий для выбора наиболее подходящего IP-блока из отобранных удовлетворительных.

Отметим, что для применения метода аналитических иерархий критерии отбора могут пересматриваться (табл. 4), поскольку многие оставшиеся после применения метода полуупорядочения в списке рассмотрения "удовлетворительные" альтернативы уже соответствуют ранее сформулированным критериям. Так, например, критерий "Удельная потребляемая мощность до 20 мкВт/МГц" изменим на "Минимальная удельная потребляемая мощность (до 20 мкВт/МГц)". Это говорит о том, что среди всех удовлетворительных блоков (с мощностью до 20 мкВт/МГц) наиболее ценным для проекта будет IP-блок с минимальным потреблением энергии.

Пусть, например, нужно выбрать один из четырех ( $n = 4$ ) показанных в табл. 4 альтернативных вариантов с указанными характеристиками при обозначенных обновленных критериях.

Рассмотрим пример применения метода аналитических иерархий для перечня альтернатив, заданных табл. 4. Метод аналитических иерархий позволяет рассчитать взвешенные оценки для каждой из альтернатив, с помощью которых можно будет выбрать наиболее удовлетворяющую выставленным требованиям (по максимальной взвешенной оценке) альтернативу.

Сначала следует составить матрицы попарного сравнения IP-блоков. Сравнение будет проходить по каждому критерию отдельно. В матрице каждый элемент  $y_{ij}^l$  показывает взаимную ценность альтернативы  $IP_i$  по отношению к альтернативе  $IP_j$  по критерию  $l$  с использованием следующих сравнительных оценок: равнозначна — 1; умеренно лучше — 3; умеренно хуже — 1/3; существенно лучше — 5; существенно хуже — 1/5; значительно лучше — 7; значительно хуже — 1/7; во много раз лучше — 9; во много раз хуже — 1/9 [5].

Если составление таких матриц сложно для ЛПР, то следует привлекать группу экспертов, которые оценят взаимную важность альтернатив, используя описанный выше метод предпочтений или метод ранга [7].

Пусть, например, были получены следующие оценочные матрицы  $Y^1$ — $Y^{12}$  при сравнении по каждому критерию отдельно:

$$Y^1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 5 \\ 3 & 1 & 1/3 & 7 \\ 5 & 3 & 1 & 9 \\ 1/5 & 1/7 & 1/9 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^2 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 7 & 1/3 \\ 1/7 & 1 & 3 & 1/7 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 3 & 7 & 7 & 1 \end{pmatrix};$$

Критерии/характеристики\* альтернативных IP-блоков

Таблица 4

Criteria/characteristics\* of the alternative IP units

Table 4

Критерии Criteria			Значение характеристики альтернативы $IP_i$ Value of the characteristic of an alternative $IP_i$			
№	Вес Weight $W_i$	Обновленное название Updated name	IP1	IP2	IP3	IP4
K1	0,09	Минимальная удельная потребляемая мощность (до 20 мкВт/МГц) <i>Minimal specific power consumption (up to 20 <math>\mu</math>W/MHz)</i>	12,1	10,5	9,6	17,3
K2	0,08	Минимальная площадь блока на кристалле (до 0,8 мм <sup>2</sup> ) <i>Minimal area of the unit on a chip (up to 0.8 mm<sup>2</sup>)</i>	0,41	0,75	0,74	0,39
K3	0,14	Максимальная тактовая частота (от 600 МГц) <i>Maximal clock frequency (from 600 MHz)</i>	610	885	951	600
K4	0,17	Система команд RISC <i>RISC instruction set</i>	Да Yes	Да Yes	Да Yes	Да Yes
K5	0,21	Разрядность не менее 32 <i>Bit capacity not less than 32</i>	Да Yes	Да Yes	Да Yes	Да Yes
K6	0,11	Минимальная цена лицензии (до 500 тыс. руб.) <i>Minimal license price (up to 500 thousand rubles)</i>	370	340	480	250
K7	0,06	Схема оплаты <i>Payment scheme</i>	Удовл. Satisfact.	Хор. Good	Хор. Good	Удовл. Satisfact.
K8	0,03	Минимальные сроки поставки (до 2 мес.) <i>Minimal delivery time (up to 2 months)</i>	1	1,5	1	1
K9	0,05	Наличие документации <i>Availability of documentation</i>	Да Yes	Да Yes	Да Yes	Да Yes
K10	0,03	Наличие тестового обеспечения <i>Availability of the test support</i>	Да Yes	Да Yes	Да Yes	Да Yes
K11	0,01	Минимальный срок интеграции (до 3 мес.) <i>Minimal integration time (up to 3 months)</i>	2	1,5	1,5	2,5
K12	0,02	Репутация производителя <i>Reputation of the manufacturer</i>	Удовл. Satisfact.	Удовл. Satisfact.	Удовл. Satisfact.	Удовл. Satisfact.

\* Данные цифры, да и сами критерии достаточно условны и взяты для примера. Они могут варьироваться в зависимости от типа IP-блока, от требований и возможностей заказчика. Например, требование "Максимальная тактовая частота" справедливо для выбора как статического, так и динамического IP-блока, тогда как для выбора динамического IP-блока актуально также требование "Минимальная тактовая частота".

\* The given criteria are rather conditional and were taken for an example. They can vary, depending on the IP unit, requirements and resources of a customer. For example, "Maximal clock frequency" is fair for selection of a static and dynamic IP unit, whereas for selection of a dynamic IP unit "Minimal clock frequency" is also good.

$$Y^3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 3 \\ 5 & 1 & 1/3 & 7 \\ 7 & 3 & 1 & 9 \\ 1/3 & 1/7 & 1/9 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^4 = Y^5 = Y^9 = Y^{10} = Y^{12} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^6 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 5 & 1/7 \\ 3 & 1 & 5 & 1/5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/9 \\ 7 & 5 & 9 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^7 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^8 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1 & 5 & 1 & 1 \\ 1 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^{11} = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/5 & 3 \\ 5 & 1 & 1 & 7 \\ 5 & 1 & 1 & 7 \\ 1/3 & 1/7 & 1/7 & 1 \end{pmatrix}.$$

Согласно методу аналитических иерархий на основании значений элементов этих матриц  $y_{ij}^l$  ( $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; n = 4$ ) и весов критериев  $W_l$  ( $l = 1, \dots, k; k = 12$ ) рассчитывается ценность  $U_i$  каждой  $i$ -й альтернативы для реализации проекта по следующей формуле:

$$U_i = \sum_{l=1}^k \left[ \frac{n \sqrt[n]{\prod_i y_{ij}^l}}{\sum_i n \sqrt[n]{\prod_j y_{ij}^l}} W_l \right].$$

Альтернатива с наивысшей ценностью и будет искомым решением. В нашем случае были получены следующие оценки:  $U_1 = 0,20$ ;  $U_2 = 0,24$ ;  $U_3 = 0,30$ ;  $U_4 = 0,26$ . Откуда можно сделать вывод, что наиболее оптимальным выбором с учетом значимости всех критериев будет IP-блок IP3.

### Заключение

Использование предлагаемой методики позволяет выбирать наиболее приемлемый IP-блок в ре-

альных условиях, когда число и характер критериев оценки качества IP-блоков может варьировать конструктор в зависимости от условий выполнения проекта. Достоинством предлагаемой методики является также возможность рассмотрения на начальном этапе большого числа альтернативных вариантов IP-блоков, предлагаемых компаниями-поставщиками. Полученные с помощью данной методики результаты ранжирования предлагаемых IP-блоков по степени предпочтительности позволят конструкторам принимать более взвешенные решения.

Важным достоинством предлагаемой методики также является возможность автоматизации процесса выбора рационального решения с учетом особенностей конкретного проекта.

### Список литературы

1. Игликов А., Алексеев М., Палташев Т. Виртуальные компоненты — шанс для России // Открытые системы. 2012. № 03. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.osp.ru/os/2012/03/13015149/> (дата обращения: 11.04.2016).
2. Янг Дж., Макхесни Б. Оптимизация процессорных ядер // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2012. № 7. С. 126—136. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/3466> (дата обращения: 19.04.2016).
3. СКАН. Сайт фирмы. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scanru.ru/object.php?id=794> (дата обращения: 20.04.2016).
4. Лобанов А. А. Метод предпочтений как инструмент поддержки принятия решений // Перспективы науки и образования. 2015. № 2 (14). С. 36—43.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Вачнадзе Р. Г. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
6. Sadjadi S. J., Habibian M., Khaleli V. A multi-objective decision making approach for solving quadratic multiple response surface problems // Intern. J. Contemp. Math. Sci. 2008. Vol. 3, N 32. P. 1595—1606.
7. Иванова Е. М., Вишнеков А. В., Ерохин В. В. Автоматизация процедуры выбора микроконтроллера // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 7. С. 14—21.

A. V. Vishnekov<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, avishnekov@hse.ru, V. V. Erokhin<sup>2</sup>, Ph. D., Associate Professor, vladimir.v.erokhin@gmail.com, E. M. Ivanova<sup>1</sup>, Ph. D., Associate Professor, emivanova@hse.ru

<sup>1</sup> National Research University Higher School of Economics,

<sup>2</sup> Progress Research Institute of Microelectronics, Moscow

## Concerning the Question of Selection of an IP Unit for the System on Chip Development

*The article is devoted to the questions concerning the selection of the most rational IP units for the SoC design from the alternative versions available on the sites of the manufacturers and suppliers. The aim of this work is to develop techniques for selection of an IP unit on the basis of the decision making methods. The proposed method employs the experience and knowledge of the experts in the given subject area and the opinion of the decision-makers (project managers, engineers and designers). The technique is based on an original combination of the lexicographic ordering method, the analytical hierarchy method and the method of preferences. The technique allows us to automate the process of selection of the most appropriate version of the IP units corresponding to the given criteria and constraints, and reduce the decision-making period.*

**Keywords:** IP unit, SoC, decision making methods, lexicographic semi-ordering method, analytical hierarchy method, preferences method

## Introduction

Advancement of SoC designing resulted in reduction of the time and costs for development of the complex-functional units (IP units) on the basis of the repeated usage technology. Many companies offer different-purpose IP units. At that, the IP units of one class and purpose can have various functional, technical-operational, design, cost and technical characteristics, and the number of the offered versions can be great enough. As a result, the developers face a complicated question of selection of an IP unit for a product to be developed. Such a problem appears frequently enough, if not with any IP unit, for example, with selection of one of the alternative cryptomodules or the processing units for various controllers.

The results of the research show, that a choice of a rational version, in case the number of the criteria for estimation of the quality of the taken decisions is more than 5–7, is an extremely labor-consuming problem. It is necessary to consider also the fact that the number of versions of the use of IP units can be bigger ( $> 10$ ), and this will complicate the problem for the designers even more. In order to simplify selection of an IP unit in accordance with the requirements and specific features of a SoC project a technique is necessary making it possible to automatize the process with the use of experience, knowledge and preferences of a developer. It can be based on the use of support for the decision-making, making it possible to present the procedure for finding of the most rational solution in the form of a sequence of the elementary procedures, during implementation of which a person, as a rule, makes no mistakes.

## Problem statement

The problem of selection of an IP unit is rather complex and multicriterion. At that, some of the criteria have a contradictory and even mutually exclusive character, this refers, for example, to the factors of cost and functionality, or complexity of integration into the final product. The total number of  $K$  criteria for selection is great ( $K > 10$ ). The criteria may have a computational character (price, power consumption, productivity, the area occupied by the unit on a chip) and a linguistic character (architecture, complexity of integration into the end-product, payment scheme). The number of versions from the companies-suppliers of the necessary IP units can be quite considerable ( $N > 10$ ).

### **Criteria for selection of an IP unit [1, 2]:**

1. Functionality (the list of the nested criteria depends on the purpose).

2. Architecture (for the classes of complex-functional products, such as processor IP cores [3]).

The basic estimation parameters are the following:

- architecture of CP (RISC/CISC);
- instruction set (completeness, optimality from the point of view of application);
- ALU Bit capacity;
- number of general purpose registers;

- availability and volume of the cache memory of instructions and data;
- clock frequency;
- access time to the main memory in the synchronization steps;
- bit width of the address and data buses.

In a number of cases additional parameters can be taken into consideration:

- number of stages of the conveyor;
- arrangement of the multibyte numbers in memory (Big/Little Endian);
- possibility of reconfiguration of the IP unit parameters;
- others.

3. Technical-operational characteristics (list of the nested criteria depends on a concrete purpose).

4. Licence price.

5. Kind of delivery:

- open RTL code — Soft-IP;
- synthesized code (netlist), tied to a concrete technology — Firm-IP;
- ready topology — Hard-IP.

6. Reputation of the firm-supplier.

7. Complexity of integration into the end-product:

- availability of the exhaustive documentation;
- availability and completeness of the test support;
- time of integration into a project.

8. Value and importance:

- mode of its use by a client (number of projects with the use of the unit);
  - mass circulation of the developed products (SoC).
9. Payment scheme.
10. Life cycle support:

- support from the supplier of the IP unit;
- possibility of a tailor-made modification;
- portability to a new technological process;
- possibility of additional contractual works.

### **Additional criteria for selection of Soft IP and Firm IP units**

1. A check done by the supplier in silicon.

2. Clock frequency for the set manufacturing technology.

3. Expected performance.

4. Power consumption (theoretical or real).

5. The area occupied by the unit on a chip.

6. Compliance with the standard specifications (if necessary).

7. Verification costs in silicon

8. Means for support of the program development.

9. Manufacturing technologies (for Firm-IP).

### **Additional criteria for selection of a Hard IP unit**

1. Clock frequency.

2. Performance.

3. Power consumption.

4. The area occupied by a unit on a chip.

5. Compliance with the existing standards.

6. Possibility of selection of an alternative supplier in a force majeure case.

## Stages of selection of an IP unit

The process of solving the selection problem can be divided into several stages.

**Stage 1.** Formation of a list of the selection criteria and their ranging. At the first step of stage 1 all the numerous criteria can be divided into the following groups:

- Functional;
- Technical-operational;
- Design;
- Cost and time;
- Support and follow up of a product;
- Technological;
- Additional.

At the second step of stage 1 we range the groups of criteria by the degree of their importance on the basis of the method of preferences [4] (if experts are involved), using the procedure of the method of analytical hierarchies [5] (if the problem is solved by a decision making person, DMP).

The method of preferences allows us to calculate the values of the criteria taking into account the opinions of the experts, who consider various points of view concerning the selection of an IP unit. The given method can be automated easily, however, in case a big number of the available criteria a concordance factor should be calculated for checking the coordination of the experts' opinions. Since the number of the groups of criteria is not big ( $< 10$ ), the probability of reaching a coordinated opinion of experts during their ranging is rather high.

At the third step of stage 1 the weight of the criteria of each group is calculated. Since the total number of the criteria equals to 16—20, in each subgroup there will be 3—4 criteria, and then their weight within the group can be calculated on the basis of the method of analytical hierarchies, by constructing a three-level hierarchical system of criteria. Within the system the first level of the hierarchy will be of the groups of the criteria, the second level will be of simple or compound criteria within a group, the third level will be of the nested criteria for the compound ones of the second level (see figure).

At the fourth step of stage 1 we will calculate the total weight of all the criteria by the method of analytical hierarchies (the problem is solved by DMP) or the method of preferences (experts are involved).

**Stage 2.** Stage-by-stage reduction of a multitude of IP units. Since the number of versions of the selected IP units can be considerable, for its reduction it is possible to use the method of lexicographic semi-ordering [6]. According to the method, we compare and select the acceptable alternatives, consistently by each criterion, beginning with the most important ones. We realize the cyclic procedure for all the criteria, till the list of the alternatives is reduced to a small number ( $\leq 10$ ).

During comparison of the alternatives by all the criteria, in view of their big number, the probability, that the IP units of many firms-developers will satisfy the set criteria, is insignificant. That means, by applying such

a selection, it is possible to reduce essentially the number of the alternatives.

This process can be regulated by changing the borders of the intervals of the admissible values of the criteria. If the criteria are not numerical, but linguistic, then the verbal scales of the values of the criteria for them are introduced for establishment of an interval of estimations.

**Stage 3.** Selection of the most acceptable IP unit. If the number of the alternatives is reduced to 10 or less, then for a definitive determination of the alternative, most satisfying the criteria, we use the method of analytical hierarchies, because it allows us to undertake the most detailed comparison of the alternatives with the use of a set scale for estimation of preference in a pairwise comparison [5].

## An example of solving the problem of selection of an IP unit

Let us assume that a group of experts or a DMP approaches the problem of selection of a HARD IP unit (for example, for DDR4-memory controller). At that, certain restrictions are set on the values of its characteristics, violation of which makes an IP unit improper for the project. Among such restrictions we can name the functional characteristics of the IP unit (interface with a certain type of bus, depth of buffering of the input and output data, etc.), technological process of manufacturing (Hard IP), etc.

Let us assume that the expert group has chosen for comparison the following set of criteria for estimation of importance of the considered IP unit for the set project.

### Group 1 of criteria.

K 1.1. Technical-operational characteristics.

K 1.1.1. Specific power consumption.

K 1.1.2. The area occupied by the unit on a chip.

K 1.1.3. Clock frequency.

K 1.2. Architecture.

K 1.2.1. Instruction set.

K 1.2.2. Bit capacity.

### Group 2 of criteria.

K 2.1. License price.

K 2.2. Payment scheme.

K 2.3. Delivery time.

### Group 3 of criteria.

K 3.1. Complexity of integration into the end-product.

K 3.1.1. Availability of exhaustive documentation.

K 3.1.2. Availability of the test support.

K 3.1.3. Integration time.

### Group 4 of criteria.

K 4.1. Reputation of the firm-manufacturer.

At the first stage of solving the problem it is necessary to determine the weights of the criteria. At that, it is necessary to take into account the hierarchical structure of the system of criteria (see figure), where for a final comparison of the alternative IP units the criteria in the end tops (leaves) of the hierarchical column are used. During calculation of weight  $W$  of a criterion of the lowest level of hierarchy its local weight in the hierarchical group should be multiplied by the weight of the corre-



sponding compound criterion and/or weight of a group of criteria. For example, for criterion of weight "K 1.1.3. Clock frequency" the following formula is fair:

$$W_{K1.1.3}^{\text{итог}} = W_{K1.1.3}^{\text{лок}} \times W_{K1.1}^{\text{лок}} \times W_{\text{гп1}}$$

Let us consider an example of the group procedure of decision-making for ranging of the groups of criteria by the degree of their importance. We will use the method of preferences. Let us assume that three experts participate in the estimation, each of which estimates groups 1—4 by their importance for the project, proceeding from his (hers) professional experience (table 1). The maximal point is given to the most important group of the criteria.

These estimations are transformed by the rule (according to the method of preferences): a new estimation is calculated as a difference of the number of groups (in our case — 4) and the initial expert estimation of the group (table 2). Then the total estimation is calculated of each group  $C_{\text{гп}i}$  by all experts and the total sum  $C$  of all estimations (table 2 — the penultimate line). The final weights of the groups of criteria are calculated according to the formula  $W_{\text{гп}i} = C_{\text{гп}i}/C$  (table 2 — the last line).

For calculation of the weights of the criteria of the subsequent levels of the hierarchy we will apply the same procedure and calculate the total weight of the criteria with account of their hierarchical nesting. Then we will range the criteria, which are in the end tops of the hierarchical structure (see figure), by their weights: the most important is the criterion with the maximal weight. Let us assume that as a result of the expert estimations we received 12 criteria ( $k = 12$ ) and the following ranging of the criteria by their importance for the project (1 — the most important, 12 — the least important).

1. Bit capacity not less than 32 (weight 0.21).
2. RISC instruction set (weight 0.17).
3. Clock frequency — from 600 MHz (weight 0.14).
4. License price — up to 500 000 rubles (weight 0.11).
5. Specific power consumption — up to 20  $\mu\text{W}/\text{MHz}$  (weight 0.09).
6. The area occupied by the unit on a chip — 0.8  $\text{mm}^2$  (weight 0.08).
7. Payment scheme: with a post payment or with a partial (up to 25 %) advance payment (weight 0.06).
8. Availability of a comprehensive documentation: completely available or to be provided within 2 months (weight 0.05).
9. Time of delivery up to 2 months (weight 0.03).
10. Availability of the test support, the scale of degree of a test covering defined by an expert (weight 0.03).
11. Spotless reputation of the firm-manufacturer (weight 0.02).
12. Time of integration up to 3 months (weight 0.01).

Also the experts determine the boundary values of the estimated scales for each criterion.

For the second stage of selection of an IP unit among the numerous alternatives the method of lexicographical semi-ordering is proposed, according to

which the whole list of the alternatives is analyzed to see, if they satisfy the most important criterion (in our case — Bit capacity). The degree of satisfaction is defined by the following rule:

- A satisfactory alternative — the checked parameter of the IP unit is within the limits of the scale of the criterion estimation;
- An unsatisfactory alternative — the checked parameter of the IP unit is beyond the limits of the scale of the criterion estimation.

Let us consider an example of the semi-ordering of six alternatives by the criterion "Specific power consumption up to 20  $\mu\text{W}/\text{MHz}$ " (table 3). From the example it is visible, that criterion 5 is satisfied by alternatives IP1, IP2, IP3, IP4 (the set off lines).

Similar procedures are followed for all the criteria, beginning from the most important one. After each procedure of semi-ordering the number of "the satisfactory" alternatives can be reduced. We should stop, when there are 10 or less alternatives.

Then we transfer to stage 3 and demonstrate application of the method of analytical hierarchies for selection of the most suitable IP unit out of the selected satisfactory ones.

We should point out, that for the analytical hierarchies the criteria of selection may be reconsidered (table 4), because many of "the satisfactory" alternatives, which after application of the method of semi-ordering remained in the consideration list, already correspond to the criteria formulated above. Thus, we will replace the criterion "Specific power consumption up to 20  $\mu\text{W}/\text{MHz}$ " with the "*Minimal* specific power consumption (up to 20  $\mu\text{W}/\text{MHz}$ )". This means that among the satisfactory units (with power up to 20  $\mu\text{W}/\text{MHz}$ ) the most valuable will be the IP unit with the minimal consumption of energy.

Let us assume that it is necessary to select one of the four ( $n = 4$ ) (table 4) of the alternative variants with the specified characteristics at the designated updated criteria.

Let us consider application of the method of analytical hierarchies for the list of the alternatives presented in table 4. The method allows us to calculate the weighed estimations for each of the alternatives, with the help of which it will be possible to choose the alternative, meeting the set requirements most fully (by the maximal weighed estimation).

It is necessary to make up matrixes for a paired comparison of the IP units. The comparison will be done by each criterion separately. In a matrix each element  $y_{ij}^l$  shows mutual value of alternative IP $i$  in relation to IP $j$  by criterion  $l$  with the use of the comparable estimations: equivalent — 1, moderately better — 3, moderately worse — 1/3, essentially better — 5, essentially worse — 1/5, considerably better — 7, considerably worse — 1/7, many times better — 9, many times worse — 1/9 [5].

If making up of such matrixes is difficult for a DMP, it is necessary to involve a group of experts, who will es-

estimate the mutual importance of the alternatives, using the method of preferences or the method of rank [7].

Let us assume that we got estimation matrixes  $Y^1 - Y^{12}$  during a separate comparison by each criterion.

$$Y^1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 5 \\ 3 & 1 & 1/3 & 7 \\ 5 & 3 & 1 & 9 \\ 1/5 & 1/7 & 1/9 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^2 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 7 & 1/3 \\ 1/7 & 1 & 3 & 1/7 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 3 & 7 & 7 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 3 \\ 5 & 1 & 1/3 & 7 \\ 7 & 3 & 1 & 9 \\ 1/3 & 1/7 & 1/9 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^4 = Y^5 = Y^9 = Y^{10} = Y^{12} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^6 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 5 & 1/7 \\ 3 & 1 & 5 & 1/5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/9 \\ 7 & 5 & 9 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^7 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y^8 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1 & 5 & 1 & 1 \\ 1 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad Y^{11} = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/5 & 3 \\ 5 & 1 & 1 & 7 \\ 5 & 1 & 1 & 7 \\ 1/3 & 1/7 & 1/7 & 1 \end{pmatrix}.$$

According to the method of analytical hierarchies on the basis of the values of the elements of these matrixes  $y_{ij}^l$  ( $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; n = 4$ ) and weights of the criteria  $W_l$  ( $l = 1, \dots, k; k = 12$ ), for realization of the project value  $U_i$  of each  $i$  — alternative is calculated according to the formula:

$$U_i = \sum_{l=1}^k \left[ \frac{n \sqrt[n]{\prod_i y_{ij}^l}}{\sum_i n \sqrt[n]{\prod_j y_{ij}^l}} W_l \right].$$

The alternative with the highest value will be the sought-for solution. In our case the following estima-

tions were received:  $U_1 = 0.20$ ;  $U_2 = 0.24$ ;  $U_3 = 0.30$ ;  $U_4 = 0.26$ . Hence, it is possible to draw a conclusion, that the IP unit IP3 will be the optimal choice with the account of the importance of all the criteria.

## Conclusion

Use of the technique allows us to choose the most acceptable IP unit in real conditions, when the number and character of the criteria for estimation of the quality of IP units can vary depending on the conditions. An advantage of the technique is a possibility of consideration at the initial stage of a big number of the alternative versions of the IP units offered by the firms-suppliers. The results of ranging of the IP units received by means of this technique by the preference degree will allow the designers to take more weighed decisions.

An important advantage of the offered technique is also a possibility of automation of selection of a rational decision taking into account the specific features of a concrete project.

## References

1. **Iglikov A., Alekseev M., Paltashev T.** Virtual'nye komponenty — shans dlja Rossii, *Otkrytye sistemy*, 2012, no. 03. URL: <http://www.osp.ru/os/2012/03/13015149/> (data obrashhenija: 11.04.2016).
2. **Jang Dzh., Makhesni B.** Optimizacija processornyh jader, *Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes*, 2012, no. 7, pp. 126—136. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/3466> (data obrashhenija: 19.04.2016).
3. **Sajt firmy "SKAN"**, URL: <http://www.scanru.ru/object.php?id=794> (data obrashhenija: 20.04.2016).
4. **Lobanov A. A.** Metod predpochtenij kak instrument podderzhki prinjatija reshenij, *Perspektivy nauki i obrazovanija*, 2015, no. 2 (14), pp. 36—43.
5. **Saati T.** *Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij*, per. s angl. Vachnadze R. G., Moscow, Radio i svjaz', 1993, 278 p.
6. **Sadjadi S. J., Habibian M., Khaledi V.** A multi-objective decision making approach for solving quadratic multiple response surface problems, *Intern. J. Contemp. Math. Sci.*, 2008, vol. 3, no. 32, pp. 1595—1606.
7. **Ivanova E. M., Vishnekov A. V., Erohin V. V.** Avtomatizacija procedury vybora mikrokontrollera, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2014, no. 7, pp. 14—21.

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2016 г.

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**Васильев В. Ю.** Тренды развития технологий и производства компонентов и узлов микросистемной техники . . . . . № 7

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

**Булярский С. В., Булярская С. А., Павлов А. А.** Термодинамика легирования азотом углеродных нанотрубок . . . . . № 2

**Воробьева А. И., Шулицкий Б. Г., Лабунов В. А., Кашко И. А., Гирель К. В.** Массивы углеродных нанотрубок, синтезированные в шаблоне из тонкого пористого оксида алюминия . . . . . № 1

**Глушков Г. И., Тучин А. В., Битюцкая Л. А., Лямичев А. В., Борментов Е. Н.** Управление спиновой поляризацией электронов электрическим полем в одностенных ультракоротких углеродных нанотрубках (0, 9) . . . . . № 9

**Залуцкая А. А., Савинский Н. Г., Проказников А. В.** Селективное резонансное поглощение электромагнитного излучения наноструктурированными системами . . . . . № 3

**Каргашев В. А., Каргашев В. В.** Изображение нанорельефа при интерпретации измерений методом имитационного моделирования . . . . . № 3

**Ларионов Ю. В.** Вариация изображения выступа в ходе его многократного сканирования в низковольтном РЭМ . . . . . № 11