

УДК 51-74

**А. В. Вишнеков**, д-р техн. наук, проф.,  
e-mail: avishnekov@hse.ru,

**В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: vladimir.v.erokhin@gmail.com,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
"Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ: РИСКИ И РЕШЕНИЯ

*Поступила в редакцию 21.03.2013*

*Рассматривается методика автоматизированного выбора проектного решения системы на кристалле (СНК) в условиях многокритериальности, основанная на применении методов теории принятия решений. Особое внимание уделяется вопросам построения и анализа иерархии критериев оценки проектного решения СНК с учетом критериев электромагнитной совместимости. Приводится пример расчета ценности альтернативных проектных решений СНК на основе предложенной методики.*

**Ключевые слова:** проектное решение, лицо, принимающее решение, система на кристалле, критерии оценки качества проектного решения, СФ-блок, IP-блок

Систему на кристалле (СНК) можно определить как функционально законченное микроэлектронное изделие, содержащее все необходимые для работы компоненты (кроме, может быть, ЗУ) и работающее, как правило, под управлением операционной системы или сложной мониторной программы.

Современные СНК могут содержать на одном кристалле до нескольких десятков различных сложных устройств, таких как один или несколько процессоров, память, порты ввода-вывода, типовые интерфейсы (USB, Ethernet), блоки специальной обработки информации и другие сложные функциональные блоки (СФ-блоки, они же IP-блоки). Здесь надо отметить, что уже один процессор может быть весьма сложным устройством, например, 64-разрядный RISC-процессор с сопроцессором обработки чисел с плавающей точкой и другими сопроцессорами.

Новейшими тенденциями в развитии СНК является включение в их состав высокочастотных блоков приемопередатчиков, что требует тщательного учета ранее неактуального фактора электро-

магнитной совместимости в процессе проектирования СНК наряду с другими критериями.

Таким образом, СНК — система очень высокой степени сложности. По некоторым оценкам, разработка СНК с нуля может потребовать до нескольких сотен человеко-лет. В то же время ускорение научно-технического прогресса требует быстрого выхода на рынок, показатель time-to-market — один из важнейших для успешного выхода на рынок, позволяющий оправдать высокие затраты на разработку и производство СНК. Опоздавший же с выходом на рынок рискует потерять все свои вложения в разработку.

При разработке СНК, состоящих из законченных сложных функциональных блоков (СФ-блоков), возможны следующие подходы:

- покупка готового СФ-блока, как правило, проверенного в кремнии (silicon-proven), за качество которого отвечает производитель. В этом случае в зависимости от вида СФ-блока его качество может быть полностью гарантировано продавцом (покупка СФ-блока в виде топологической конструкции) или частично, когда продавец отвечает только за качество RTL (RTL-register transfer level) кода, в случае поставки СФ-блока в виде RTL-кода, когда топологию выполняет покупатель;
- использование СФ-блоков собственной разработки;
- использование СФ-блоков, полученных из открытых источников, как правило, не проверенные в кремнии. В этом случае не гарантируется ни качество кода, ни качество его тестирования и верификации.

На начальной стадии проектирования кристалла СНК, после того как закончены проектирование архитектуры и структуры СНК, необходимо решить, каким образом наиболее целесообразно приобрести тот или иной СФ-блок. Главный критерий здесь — скорость выпуска изделия, а ограничителем выступает стоимость проекта. Следует отметить, что качество проектирования, являющееся важнейшим фактором, существенно влияет на стоимость. Например, если образец СНК выпускается отлаженным в недостаточной степени, то велик риск повторного запуска производства кристалла, что сильно удорожает проект.

Оптимальным с точки зрения скорости разработки СНК является первый подход, однако он и самый затратный с финансовой точки зрения.

Крупные фирмы почти всегда в состоянии пойти по этому варианту. Для среднего бизнеса, который не обладает большими финансовыми ресурсами, он не всегда приемлем.

Второй подход в чистом виде используется достаточно редко из-за почти неизбежного увеличения сроков разработки СНК. Однако он необходим в случае, если блок является инновационным или требуется экономия финансовых ресурсов. Как правило, полностью избежать разработки собственных блоков не удается.

Третий подход возможен в случае наличия необходимого СФ-блока в открытом доступе. Однако здесь имеются следующие риски:

- блоки, как правило, не проверены в кремнии;
- блоки выставлены не в полнофункциональном варианте, который требуется дополнительно оплатить;
- блок может быть не оттестирован адекватно;
- требуется доработка блока, например, изменение его внешнего интерфейса.

Таким образом, в этом случае в конечном итоге риски могут выливаться в дополнительные затраты.

Затраты на разработку СНК складываются из:

- покупки СФ-блоков;
- разработки СФ-блоков;
- стоимости разработки аппаратной части СНК (собственно разработка, тестирование, верификация проекта);
- разработки программной части;
- стоимости опытной партии (одной или нескольких в зависимости от результатов тестирования);
- стоимости промышленной партии.

На данной стадии рассмотрения проблемы целесообразно ограничить обсуждение оптимизацией затрат на разработку аппаратной части СНК. Здесь и далее будем считать, что трудоемкость проектирования СНК из уже готовых СФ-блоков не зависит от того, каким образом получены те или иные СФ-блоки: куплены ли они, разработаны самостоятельно или получены каким-то другим путем. В этом случае вопрос сводится к способу получения СФ-блоков, из которых состоит СНК.

Для решения данной задачи предлагается использовать методы теории принятия решений. Данные методы позволяют разложить сложную процедуру принятия решения в условиях многокритериальности в последовательность процедур, которые человек может проводить безошибочно по результатам психологических исследований.

Для автоматизации выбора правильной стратегии разработки СНК лицом, принимающим решение (ЛПР), необходимо учитывать целый ряд критериев, к которым, в частности, можно отнести:

- стоимость проектирования СФ-блока ( $Q_1$ );
- стоимость средств разработки, используемых при проектировании СФ-блока ( $Q_2$ );
- время разработки ( $Q_3$ );

- качество разработки ( $Q_4$ );
- электромагнитную совместимость с другими СФ-блоками ( $Q_5$ );
- качество сопровождения ( $Q_6$ );
- стоимость сопровождения ( $Q_7$ ).

С точки зрения электромагнитной совместимости наиболее чувствительными устройствами являются такие блоки, как аналого-цифровые, цифро-аналоговые преобразователи, умножители частоты (PLL) и некоторые другие.

Ранее основными критериями при разработке СНК были стоимость, площадь, производительность и надежность. Критерий электромагнитной совместимости либо отсутствовал, либо имел второстепенное значение, но сейчас он выходит на первый план. Теперь производители СНК вынуждены разрабатывать свою продукцию в соответствии с нормами электромагнитной совместимости. Критерий электромагнитной совместимости СНК необходимо разложить на следующие критерии: электромагнитного излучения и электромагнитной помехоустойчивости [5].

В настоящее время поставщики IP-блоков не указывают данные по этим двум критериям, поэтому разработчик вынужден проводить цикл измерений самостоятельно для принятия решений по критерию электромагнитной совместимости IP-блоков в СНК. Разработчик СНК должен расставить весовые коэффициенты результатам измерений, полученных на основе применения нижеуказанных методов.

Для оценки *электромагнитного излучения* IP-блоков в соответствии с современными стандартами (IEC 61967, IEC 62132) используют следующие методы измерений [6]:

- ✓ метод измерения электромагнитного излучения с помощью ТЕМ-камеры (критерий  $Q_5^{11}$ );
- ✓ метод поверхностного сканирования ( $Q_5^{12}$ );
- ✓ метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом ( $Q_5^{13}$ );
- ✓ стендовый метод с применением клетки Фарадея ( $Q_5^{14}$ );
- ✓ метод магнитного зонда ( $Q_5^{15}$ ).

Для оценки *электромагнитной помехоустойчивости* используют следующие методы измерений [6]:

- ✓ метод измерения с помощью ТЕМ-камеры (критерий  $Q_5^{21}$ );
- ✓ метод инъекции объемного тока ( $Q_5^{22}$ );
- ✓ метод прямого введения мощности ( $Q_5^{23}$ );
- ✓ стендовый метод с применением клетки Фарадея ( $Q_5^{24}$ ).

Результаты измерений являются значениями соответствующих частных критериев оценки электромагнитной совместимости. Разработчик СНК на основе метода аналитических иерархий рассчитывает веса базовых и частных критериев оценки проектного решения.

Определим разновидности процедур, выполняемых ЛПР, по степени сложности [1, 2]:

- сложные процедуры (С) — при выполнении которых ЛПР допускает упрощение полученной информации, так как обобщенный анализ ее по результатам психологических исследований невозможен;
- допустимые процедуры (Д) — типичные для ЛПР процедуры, многократно совершаемые им на практике, либо процедуры, выполнение которых не требует упрощения исходной информации, хотя анализ ее достаточно сложен;
- неопределенные процедуры (Н, НС, НД) — процедуры, по которым отсутствуют результаты психологических исследований, но анализ уже известных факторов позволяет вынести предварительное решение о допустимости (НД) или сложности процедуры (НС).

Типовые процедуры, используемые ЛПР в методах поддержки принятия решений:

1. Процедуры с критериями:
  - 1) назначение весов критериев (С);
  - 2) ранжирование критериев по важности (С).
2. Процедуры с альтернативами:
  - 1) сравнение двух альтернатив и выделение лучшей из них (С);
  - 2) выбор лучшей альтернативы из группы (С);
  - 3) нахождение "идеальной альтернативы", близость к которой определяет качество текущего решения (С).
3. Процедуры с оценками:
  - 1) сравнение двух оценок по шкале одного критерия (Д);
  - 2) сравнение изменений оценок двух критериев (определение превосходства одного из них);
  - 3) определение количественного изменения оценки одного критерия, которое эквивалентно изменению оценки другого (критерии принимаются равноценными) (НС);
  - 4) определение удовлетворительного значения по каждому критерию (НД);
  - 5) выделение всех или части критериев, оценки по которым должны быть улучшены, могут быть ухудшены, либо остаться не хуже установленного удовлетворительного уровня (совокупность процедур 1 и 2) (Д);
  - 6) выделение оценок по критериям, неудовлетворительным (удовлетворительным) в какой-то степени (Д).

К основной особенности рассматриваемой задачи принятия решения относится наличие численных и лингвистических критериев.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод аналитических иерархий, использующий допустимые процедуры [3].

Постановка задачи принятия решений может выглядеть следующим образом. Цель решения задачи — определить стратегию разработки СНК.

Критерии выбора рациональной стратегии приведены выше ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$ ). Требуется выбрать наиболее рациональную стратегию разработки СНК.

Решение задачи состоит из совокупности этапов.

На первом этапе строится модель поставленной задачи принятия проектного решения в виде многоуровневой иерархии. Основными уровнями иерархии являются уровни цели, критериев и альтернатив. Однако число подуровней в уровне критериев может варьироваться в зависимости от сложности оценки альтернативных проектных решений по заданным базовым критериям. Базовые критерии могут описываться иногда с помощью достаточно сложной иерархии частных критериев.

На втором этапе проводится попарное сравнение критериев по степени важности в соответствии с принятой шкалой оценки степени предпочтительности [3]. Результаты заносятся в таблицу сравнительной важности критериев.

На третьем этапе по каждому из базовых или частных критериев проводится попарное сравнение альтернативных вариантов проектного решения СНК. Результаты также заносятся в таблицу сравнительной предпочтительности альтернатив.

На четвертом этапе рассчитываются веса критериев и ценность альтернативных проектных решений СНК по каждому критерию.

На пятом этапе вычисляется итоговое значение функции ценности каждой альтернативы с учетом всех критериев оценки проектных решений СНК.

На шестом этапе альтернативные проектные решения СНК ранжируются по степени предпочтительности для ЛПР на основе величины итоговой функции ценности. Чем больше значение функции ценности, тем данное проектное решение СНК более предпочтительно.

Для проверки мнений ЛПР на согласованность при заполнении таблиц попарных сравнений критериев и альтернатив необходимо рассчитывать индекс согласованности  $L$  [3]. Подсчитывается среднее значение индекса согласованности  $R$  для кососимметричных матриц, заполненных случайным образом. Для матрицы размера  $n = 7$  индекс  $R = 1,32$ . Вычисляется отношение согласованности  $T = L/R$ . Если значение  $T > 0,1$ , рекомендуется таблицу попарных сравнений заполнить заново.

*Достоинства метода аналитических иерархий для решения поставленной задачи:*

- возможность сравнения альтернативных проектных решений СНК с учетом численных и лингвистических критериев оценки качества проектного решения;
- метод применим, даже если значения оценок по критериям невозможно рассчитать, а можно лишь оценить степень предпочтительности одной альтернативы над другой по рассматриваемому критерию.

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>
Q <sub>1</sub>	1	3	1/3	1	5	5	5
Q <sub>2</sub>	1/3	1	1	1/3	5	5	5
Q <sub>3</sub>	3	1	1	3	5	7	5
Q <sub>4</sub>	1	3	1/3	1	9	5	5
Q <sub>5</sub>	1/5	1/5	1/5	1/9	1	3	1
Q <sub>6</sub>	1/5	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1
Q <sub>7</sub>	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1	1

### Недостатки метода:

- увеличение списка рассматриваемых не доминирующих альтернатив ведет к пересмотру степени предпочтительности между существующими парами альтернатив;
- шкала предпочтительности альтернатив четко не обоснована.

Рассмотрим пример выбора проектного решения блока СНК с использованием метода аналитических иерархий.

СНК должна содержать следующие СФ-блоки:

- ♦ Блок А может быть куплен у фирмы AF1 (альтернатива A1), он проверен в кремнии, стоит AS1, или у фирмы AF2 (альтернатива A2), он прототипирован в FPGA по цене AS2. Блок может быть разработан собственными силами (альтернатива A3). Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование, составляет AS3.
- ♦ Блок В может быть куплен у фирмы BF1, он проверен в кремнии, стоит BS1, или взят в открытом доступе (BF2), в кремнии не проверен, интерфейс требует доработки, ориентировочная стоимость которой BS2. Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование фирмы, составляет BS3. Стоимость средств САПР, используемых для разработки/доработки включена в указанные суммы.
- ♦ Блок С. Альтернатив нет, необходимо разрабатывать своими силами. Стоимость разработки собственными силами, включая отладку и тестирование фирмы, составляет CS3.

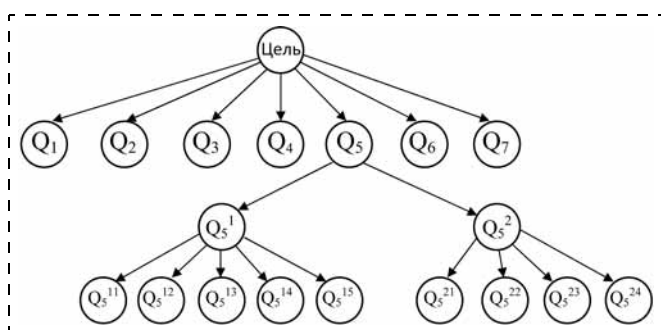
Необходимо выбрать рациональный (устраивающий ЛПП) вариант с точки зрения минимизации затрат.

1. Построим иерархию критериев для оценки предлагаемых альтернатив (см. рисунок).

Первый уровень иерархии — цель решения задачи — выбор проектного решения СНК.

Второй уровень — уровень базовых критериев Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>6</sub>, Q<sub>7</sub>, содержит два подуровня.

Первый подуровень — подуровень вложенных критериев критерия оценки электромагнитной со-



Иерархия критериев оценки проектного решения СНК

вместимости Q<sub>5</sub>. Этот критерий включает два подкритерия Q<sub>5</sub><sup>1</sup> и Q<sub>5</sub><sup>2</sup> — соответственно критерий оценки электромагнитного излучения и критерий электромагнитной помехоустойчивости.

Второй подуровень — подуровень частных критериев оценки электромагнитного излучения Q<sub>5</sub><sup>11</sup>, Q<sub>5</sub><sup>12</sup>, Q<sub>5</sub><sup>13</sup>, Q<sub>5</sub><sup>14</sup>, Q<sub>5</sub><sup>15</sup> и электромагнитной помехоустойчивости Q<sub>5</sub><sup>21</sup>, Q<sub>5</sub><sup>22</sup>, Q<sub>5</sub><sup>23</sup>, Q<sub>5</sub><sup>24</sup>.

2. Заполним кососимметричную матрицу сравнительной важности базовых критериев оценки качества проектного решения по блоку А (табл. 1) [3].

При заполнении таблицы проводится сравнительная оценка пар критериев по шкале, принятой в методе аналитических иерархий [3].

Значения элементов выбираются из ряда 1, 3, 5, 7, 9 в зависимости от сравнительной степени важности пар критериев.

Вычисляем цену каждого критерия W<sub>Qi</sub> по формуле

$$W_{Qi} = \sqrt[n]{Q_{i1} Q_{i2} \dots Q_{in}}; \quad (1)$$

где n — размерность матрицы парных сравнений критериев (табл. 1).

W<sub>Q1</sub> = 1,993, W<sub>Q2</sub> = 1,456, W<sub>Q3</sub> = 2,862, W<sub>Q4</sub> = 2,167, W<sub>Q5</sub> = 0,428, W<sub>Q6</sub> = 0,324, W<sub>Q7</sub> = 0,399.

Вычисляем сумму цен критериев W<sub>Qi</sub> = 8,92.

Вычисляем итоговые веса базовых критериев W<sub>Qi</sub> по формуле

$$W_{Qi}^* = \frac{W_{Qi}}{\sum_{i=1}^n W_{Qi}}, \quad (2)$$

W<sub>Q1</sub><sup>\*</sup> = 0,207, W<sub>Q2</sub><sup>\*</sup> = 0,151, W<sub>Q3</sub><sup>\*</sup> = 0,297, W<sub>Q4</sub><sup>\*</sup> = 0,225, W<sub>Q5</sub><sup>\*</sup> = 0,044, W<sub>Q6</sub><sup>\*</sup> = 0,034, W<sub>Q7</sub><sup>\*</sup> = 0,041.

Веса частных вложенных критериев рассчитываются аналогичным образом путем нормирования их значений с учетом веса критериев более высо-

Таблица 2

Q <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	1/3	1/6
A <sub>2</sub>	3	1	1/4
A <sub>3</sub>	6	4	1

кого уровня ( $W_{Q_5} = W_{Q_5}^1 + W_{Q_5}^2$ ). Так, для данного примера  $W_{Q_5}^1 = 0,321$ ,  $W_{Q_5}^2 = 0,107$ ,

$$W_{Q_5}^{*11} = 0,0074, W_{Q_5}^{*12} = 0,0069, W_{Q_5}^{*13} = 0,0066,$$

$$W_{Q_5}^{*14} = 0,0060, W_{Q_5}^{*15} = 0,0053,$$

и, соответственно,

$$W_{Q_5}^{*21} = 0,0021, W_{Q_5}^{*22} = 0,0032, W_{Q_5}^{*23} = 0,0029,$$

$$W_{Q_5}^{*24} = 0,0025.$$

Веса частных критериев приведены без расчетов.

3. Фиксируем критерии и вычисляем относительную ценность альтернатив по каждому критерию путем заполнения матриц сравнительной важности альтернатив A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> по критериям Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>6</sub>, Q<sub>7</sub> (аналогично п. 1).

*Критерий Q<sub>1</sub>* (табл. 2).

Вычисляем цену каждой альтернативы  $V_{Q_i}$  аналогично формуле (1):

$$V_{A_1Q_1} = 0,38, V_{A_2Q_1} = 1,44, V_{A_3Q_1} = 2,88.$$

Сумма цен альтернатив  $V_{Q_1} = 4,70$ .

Вычисляем  $V_{Q_1}^*$  аналогично формуле (2):

$$V_{A_1Q_1}^* = 0,08, V_{A_2Q_1}^* = 0,31, V_{A_3Q_1}^* = 0,61.$$

*Критерий Q<sub>2</sub>* (табл. 3).

Таблица 3

Q <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	8	8
A <sub>2</sub>	1/8	1	5
A <sub>3</sub>	1/8	1/5	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_2} = 4,00, V_{A_2Q_2} = 0,85, V_{A_3Q_2} = 0,29.$$

Сумма  $V_{Q_2} = 5,14$ .

Вычисляем  $V_{Q_2}^*$ :

$$V_{A_1Q_2}^* = 0,78, V_{A_2Q_2}^* = 0,17, V_{A_3Q_2}^* = 0,06.$$

*Критерий Q<sub>3</sub>* (табл. 4).

Таблица 4

Q <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	1	8
A <sub>2</sub>	1	1	8
A <sub>3</sub>	1/8	1/8	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_3} = 2,00, V_{A_2Q_3} = 2,00, V_{A_3Q_3} = 0,25.$$

Сумма  $V_{Q_3} = 4,25$ .

Вычисляем  $V_{Q_3}^*$ :

$$V_{A_1Q_3}^* = 0,47, V_{A_2Q_3}^* = 0,47, V_{A_3Q_3}^* = 0,06.$$

*Критерий Q<sub>4</sub>* (табл. 5).

Таблица 5

Q <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	2	4
A <sub>2</sub>	1/2	1	2
A <sub>3</sub>	1/4	1/2	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_4} = 2,00, V_{A_2Q_4} = 1,00, V_{A_3Q_4} = 0,5.$$

Сумма  $V_{Q_4} = 3,50$ .

Вычисляем  $V_{Q_4}^*$ :

$$V_{A_1Q_4}^* = 0,57, V_{A_2Q_4}^* = 0,29, V_{A_3Q_4}^* = 0,14.$$

*Критерий Q<sub>5</sub>*.

Вычисляем  $V_i$ :

$$V_{A_1Q_5} = 1,26, V_{A_2Q_5} = 0,63, V_{A_3Q_5} = 1,26.$$

Сумма  $V_{Q_5} = 3,14$ .

Вычисляем  $V_{Q_5}^*$ :

$$V_{A_1Q_5}^* = 0,40, V_{A_2Q_5}^* = 0,20, V_{A_3Q_5}^* = 0,40.$$

Ценность альтернатив по критерию Q<sub>5</sub> вычисляется с учетом вложенных критериев Q<sub>5</sub><sup>1</sup> и Q<sub>5</sub><sup>2</sup>, а также Q<sub>5</sub><sup>11</sup>, Q<sub>5</sub><sup>12</sup>, Q<sub>5</sub><sup>13</sup>, Q<sub>5</sub><sup>14</sup>, Q<sub>5</sub><sup>15</sup> и Q<sub>5</sub><sup>21</sup>, Q<sub>5</sub><sup>22</sup>, Q<sub>5</sub><sup>23</sup>, Q<sub>5</sub><sup>24</sup>. Матрицы попарного сравнения альтернатив по указанным критериям не приводятся, так как принцип их заполнения аналогичен.

Критерий  $Q_6$  (табл. 6).

Таблица 6

$Q_6$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1	1/6
$A_2$	3	1	1/6
$A_3$	6	6	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_6} = 0,55, V_{A_2Q_6} = 1,00, V_{A_3Q_6} = 3,00.$$

Сумма  $V_{Q_6} = 4,55$ .

Вычисляем  $V_{Q_6}^*$ :

$$V_{A_1Q_6}^* = 0,25, V_{A_2Q_6}^* = 0,22, V_{A_3Q_6}^* = 0,66.$$

Критерий  $Q_7$  (табл. 7).

Таблица 7

$Q_7$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1	5
$A_2$	1	1	5
$A_3$	1/5	1/5	1

Вычисляем  $V_{Q_i}$ :

$$V_{A_1Q_7} = 1,71, V_{A_2Q_7} = 1,71, V_{A_3Q_7} = 0,34.$$

Сумма  $V_{Q_7} = 3,76$ .

Вычисляем  $V_{Q_7}^*$ :

$$V_{A_1Q_7}^* = 0,45, V_{A_2Q_7}^* = 0,45, V_{A_3Q_7}^* = 0,09.$$

Для заполнения таблиц сравнительной важности критериев и альтернатив по отдельным критериям может потребоваться привлечение группы экспертов. В этом случае целесообразно применение групповых методов поддержки принятия решения: метода минимального расстояния (если число альтернатив  $n \leq 10$ ) и метода ранжирования альтернатив [4].

4. Вычисляем итоговые веса каждого варианта проектного решения по блоку А по формуле

$$C_j = W_{Q_1}^* V_{A_jQ_1}^* + W_{Q_2}^* V_{A_jQ_2}^* + \dots + W_{Q_n}^* V_{A_jQ_n}^* \quad (3)$$

Здесь  $n$  — число базовых критериев оценки качества решения СНК;  $j = 1, 2, \dots, m$ , где  $m$  — число альтернативных проектных решений СНК.

$$C_1 = 0,207 \cdot 0,08 + 0,151 \cdot 0,78 + 0,297 \cdot 0,47 + 0,225 \cdot 0,57 + 0,044 \cdot 0,40 + 0,034 \cdot 0,25 + 0,041 \cdot 0,45 = 0,4469;$$

$$C_2 = 0,207 \cdot 0,31 + 0,151 \cdot 0,17 + 0,297 \cdot 0,47 + 0,225 \cdot 0,29 + 0,044 \cdot 0,20 + 0,034 \cdot 0,22 + 0,041 \cdot 0,45 = 0,3296;$$

$$C_3 = 0,207 \cdot 0,61 + 0,151 \cdot 0,06 + 0,297 \cdot 0,06 + 0,225 \cdot 0,14 + 0,044 \cdot 0,40 + 0,034 \cdot 0,66 + 0,041 \cdot 0,09 = 0,2284.$$

Таким образом, наиболее целесообразно выбрать альтернативу  $A_1$  — покупку блока А у фирмы F1.

Аналогичным образом принимаем решения по блокам В и С.

Предлагаемый подход к решению задачи автоматизации определения базовой структуры СНК и способов реализации блоков в условиях большого числа критериев (наряду с общепринятыми критериями оценки качества проектного решения СНК метод позволяет учесть целый ряд новых критериев, в частности, критерий электромагнитной совместимости блоков СНК и др.) дает возможность обоснованно выбрать компромиссный вариант проектного решения СНК.

#### Список литературы

1. Ларичев О. И., Зуев О. А., Гнеденко Л. С. Метод "ЗАПРОС" (Замкнутые Процедуры у Опорных Ситуаций) решения слабоструктурированных проблем выбора при многих критериях. Препр. М.: ВНИИСИ, 1978. 7 с.
2. Tversky A. Intransitivity of preferences // Psychol. Rev. 1969. Vol. 76, N 1. P. 31–49.
3. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.
4. Васильев Ф. Н., Вишнеков А. В., Феропонтова Е. С. Методы поддержки принятия групповых решений // Качество и ИПИ-технологии. 2007. № 2. С. 51–55.
5. Redoute J.-M., Steyaert M. EMC of Analog Integrated Circuits, Analog Circuits and Signal Processing. Hardcover: Springer, 2010. 243 p.
6. Шумахер У. Полупроводниковая электроника. URL: [http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/Infineon\\_n\\_Russian\\_Semiconductor\\_Book\\_/Semiconductor\\_book\\_ru.html](http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/Infineon_n_Russian_Semiconductor_Book_/Semiconductor_book_ru.html)