

УДК 621.382 : 519.816

Я.А. Чуйков, В.С. Харченко, А.Е. Перепелицын

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ FPGA: МЕТОДИКА И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО

Предлагается методика и инструментальное средство для рационального выбора кристалла с учетом требований к энергоэффективности конкретных проектов. Объектом исследования являются технические характеристики элементной базы FPGA. Анализируются архитектурные особенности кристаллов, их классификация по типу хранения конфигурации данных, методы снижения энергопотребления FPGA. На основе проведенного анализа разработана методика и инструментальное средство выбора кристаллов с учетом требований к проекту.

**Ключевые слова:** энергопотребление, системы поддержки принятия решений, энергоэффективность, FPGA.

### Введение

Обеспечение надежности и безопасности систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA, критичных с точки зрения энергопотребления, зависит от использования кристаллов, соответствующих требованиям, заданным на этапе проектирования [1]. Применение кристаллов FPGA в подобных системах позволяет решить ряд проблем, прежде всего, благодаря гибкому инструментарию разработки и реализации проектов, а также существенному упрощению процедур верификации [2]. Одной из областей применения FPGA являются разработка портативного медицинского оборудования. Разработка портативных устройств с использованием FPGA позволяет разработчикам сохранить необходимую гибкость [3] и снизить потребляемую мощность [4]. Компании производители, такие как Xilinx, Altera, Microsemi и др., предоставляют широкий спектр кристаллов ПЛИС (включая FPGA) с разными характеристиками и архитектурными особенностями [3].

Важным этапом процесса проектирования специализированных устройств на базе FPGA является принятие оптимального или рационального решения по выбору требуемого кристалла. Обзор литературы и анализ инженерной практики показывает, что на текущий момент не существует метода принятия решений по выбору FPGA с учетом различных критериев.

Одним из основных среди них является энергопотребление, от которого зависит цена, надежность и время автономной работы устройств. Это актуализирует исследования в области снижения энергопотребления как самих FPGA, так и систем на их основе, с учетом требований и ограничений по другим характеристикам [5].

**Целью данного исследования** является повышение удобства и обоснованности выбора кристаллов FPGA с требуемыми характеристиками. Для

достижения поставленной цели необходимо решить задачи анализа и классификации архитектурных особенностей кристаллов и технологий снижения их энергопотребления, существующих методов поиска решений по выбору кристаллов FPGA, а также разработать методику принятия решений по выбору энергоэффективных FPGA с учетом требований конкретных проектов.

### 1. Анализ FPGA кристаллов

**Анализ архитектурных особенностей.** FPGA является одной из разновидностей ПЛИС, логика работы которых может быть задана посредством схемотехнического и текстового описания, выполненного на одном из языков описания аппаратуры, например, VHDL. Основными компонентами FPGA являются [6]:

- блоки ввода-вывода (БВВ);
- конфигурируемые логические блоки (КЛБ);
- межсоединения.

Конфигурация этих элементов разработчиком при проектировании системы позволяет получить необходимую логику работы, которая может быть модифицирована в течение малого времени даже во время работы FPGA в составе устройства.

Каждый из БВВ может быть сконфигурирован для реализации буфера (входного, выходного, с тремя состояниями, с запоминанием и других видов), что позволяет обеспечить сопряжение необходимого вида с внешними схемами. КЛБ позволяют реализовывать как комбинационные схемы, так и автоматы с памятью [7]. Межсоединения в FPGA служат для организации связей между любыми перечисленными типами блоков. Они состоят из сети проводящих линий, в местах пересечений которых расположены программируемые переключающие точки, что позволяет реализовать практически любой требуемый маршрут цепи и получить для критических цепей задержку менее 0,1 нс. Для разводки

по кристаллу сигналов с минимальной задержкой используются длинные линии [8]. Программирование описанных составных частей FPGA происходит посредством внесения данных в теневое ЗУ.

**Классификация FPGA.** По типу хранения конфигурации FPGA бывают трех типов: SRAM, FLASH, Antifuse.

SRAM – это технология, достоинством которой является возможность многократного перепрограммирования FPGA. К недостаткам SRAM реализации стоит отнести невысокое быстродействие, а также необходимость загрузки конфигурации при каждом включении питания, что требует размещения на плате дополнительного загрузчика. Это приводит к повышению стоимости конечного изделия.

FPGA на основе Flash. Преимуществом данного типа является сохранение конфигурации при выключении питания во внутренней Flash памяти. Однако, к недостаткам FPGA на основе Flash стоит отнести дороговизну и малое количество циклов перезаписи конфигурации.

Antifuse – однократно программируемые FPGA. Недостатком технологии Antifuse является возможность лишь однократного программирования FPGA, а значит внесение каких-либо изменений в дальнейшем невозможно. К достоинствам таких FPGA относится работа на больших частотах, а также меньшая подверженность сбоям при влиянии радиации, из-за того, что конфигурация задана в виде перемычек.

## 2. Анализ технологий снижения энергопотребления

Мощность, потребляемая FPGA, делится на статическую и динамическую. Статическая мощность потребляется тогда, когда устройство включено, сконфигурировано и находится в состоянии ожидания. Динамическая мощность потребляется после того как устройство включится и находится в активном рабочем режиме.

При разработке новой системы на основе FPGA типа SRAM, помимо статической и динамической мощности потребления, необходимо также учесть ещё три режима энергопотребления: включение питания, конфигурирование, различные режимы пониженного энергопотребления.

При включении и конфигурировании мощность, потребляемая FPGA, может быть довольно значительной, и это необходимо учитывать при разработке системы питания и при выборе батареи. В энергонезависимых FPGA на базе флэш-памяти отсутствуют режимы запуска и конфигурирования, что упрощает задачу проектирования и снижает общее энергопотребление системы. Это делает их очень привлекательными для использования в проектах с малым энергопотреблением. Динамическая мощность зависит от разводки и топологии кристал-

ла. Необходимо по максимуму группировать связанные блоки схемы рядом друг с другом, так как это способствует уменьшению длины проводников, что, в свою очередь, уменьшает емкостную нагрузку и снижает рассеиваемую мощность. Современные САПР способны оптимизировать проекты для снижения энергопотребления. Учитывая количество узлов и тактовых сигналов в схеме можно добиться снижения энергопотребления до 25% [9].

Для снижения энергопотребления системы используют метод выборочного снижения питания отдельных блоков чипа или микросхем на плате, реализовывая несколько шин питающих напряжение, не связанных друг с другом. Это позволяет выполнить выборочное отключение определенных блоков FPGA [10]. Для снижения энергопотребления может быть также использована макрооптимизация. Некоторые стандартные логические элементы могут предлагаться в различных версиях, оптимизированных для высокой производительности, высокой плотности упаковки или низкой мощности потребления.

Высокопроизводительные версии рассеивают большую мощность, поэтому снижение мощности потребления может быть достигнуто при применении высокопроизводительных макросов, только когда они требуются. Например, быстрый сумматор потребляет в 10 раз больше энергии, чем более медленный сумматор со сквозным переносом [11].

## 3. Анализ существующих методов поиска оптимальных решений по выбору кристаллов FPGA

Перед началом процесса проектирования системы, реализуемой в FPGA, необходимо очень ответственно подойти к выбору элементной базы. Необходимо принять во внимание не только требуемые параметры кристалла FPGA, а и предоставляемые средства разработки и верификации, от которых зависит как стоимость проектирования, так и инструментарий, предоставляемый САПР.

Анализ существующих методов принятия решений [12 – 14] показывает, что объединение ряда подходов прикладной теории принятия решений, различающихся способом представления и обработки знаний, и количественных методов прогнозирования, базирующихся на оценках экспертов, позволяет получить новый подход принятия решений, основанный на объединении параметров разнородных условий [15].

Используемый подход основывается на отношениях порядка среди альтернатив (классическая модель принятия решений, в которой, каждой альтернативе ставится в соответствие некоторое число) и на отношениях включения (поведенческая модель, основанная на принадлежности альтернатив к некоторому множеству).

При построении алгоритма выбора FPGA используется поиск на основе целевого набора функций, так как для каждой архитектуры микросхемы будет сформирована частная критериальная функция, и каждый исход выбора необходимо оценить вещественным числом [16].

При этом учитываются: целевая функциональность, на основе которой будут формироваться варианты решений, коэффициент важности критерия, нормированные значения характеристик и информация о микросхемах, которая хранится в БД [17].

Практика проектирования цифровых систем с применением FPGA показывает, что, в случае отсутствия вариантов решения при выборе микросхемы, разработчик пересматривает архитектуру разрабатываемого устройства и корректирует требования к параметрам микросхем и сигналов, а также предпочтения выбора элементной базы [18].

#### 4. Разработка методики и инструментального средства для выбора кристалла FPGA с учетом требований проектов

**Разработка методики.** Разработан алгоритм выбора, позволяющий объединить параметры FPGA и требования к проекту в единую целевую функциональность, а также учитывает варианты пересмотра требуемых параметров микросхем при отсутствии решения (рис. 1). Решение поставленной задачи разбиваем на два этапа: фильтрация FPGA по первой группе параметров; выбор наилучшего FPGA исходя из значений второй группы параметров.

В первую группу входят те параметры, по которым нельзя однозначно оценить FPGA: производитель, семейство, технологический процесс, напряжение питания, температурный диапазон. По этим параметрам производится предварительная фильтрация с целью сужения области поиска, наиболее подходящего кристалла FPGA под поставленную задачу.

Во вторую группу входят те параметры, по которым можно оценить насколько данный кристалл FPGA является лучше относительно других: частота, энергопотребление, объем памяти, надёжность, скорость обмена, количество I/O. Значения параметров этой группы будут формировать общую оценку FPGA. Параметры второй группы разбиваются ещё на две подгруппы:

- параметры, увеличение значений которых является положительным явлением, т.е. пользователь всегда будет стремиться выбрать FPGA с их максимальными значениями;

- параметры, уменьшение значений которых является положительным явлением, т.е. пользователь всегда будет стремиться выбрать FPGA с их минимальными значениями;

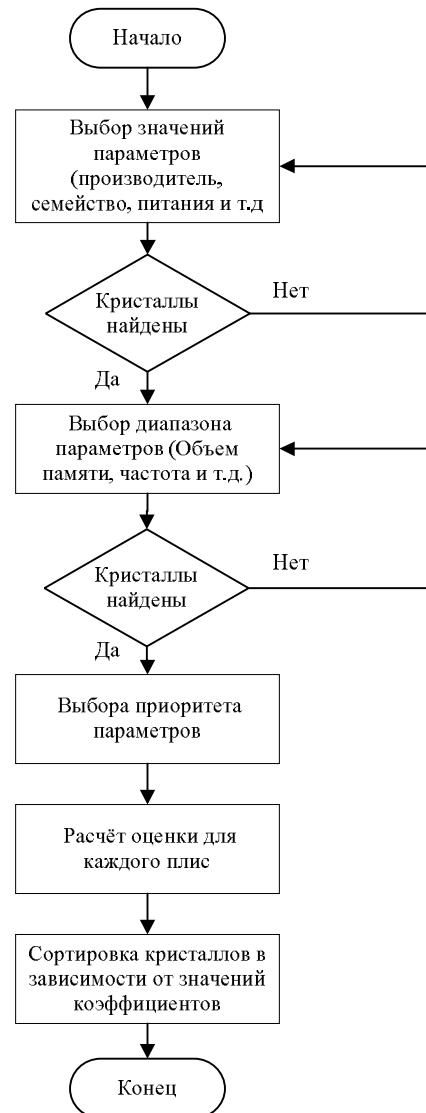


Рис. 1. Алгоритм объективного выбора FPGA

В первую подгруппу входят такие параметры как: частота, объём памяти, надёжность, скорость обмена. Во вторую подгруппу входят параметры: энергопотребление, количество I/O.

Формула для общей оценки FPGA имеет вид:

$$q = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i,$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент, определяющий вклад параметра в общую оценку,  $x_i$  – нормированное значение параметра.

В зависимости от того, к какой подгруппе второй группы относится параметр, выражение для определения значения  $x_i$  будет принимать вид:

$x_i = (b_i - b_{\min}) / (b_{\max} - b_{\min})$  – для параметров из первой подгруппы,

$x_i = (b_{\max} - b_i) / (b_{\max} - b_{\min})$  – для параметров из второй подгруппы,

где  $b_i$  – значение параметра,  $b_{\min}$  – минимальное значение параметра  $b_i$  в данной выборке,  $b_{\max}$  – максимальное значение параметра  $b_i$  в данной выборке.

Таким образом, при увеличении (уменьшении) значения параметра из первой подгруппы, его нормированное значение увеличивается (уменьшается), а при увеличении (уменьшении) значения параметра из второй подгруппы – уменьшается (увеличивается).

Сумма значений весовых коэффициентов определяет диапазон общей оценки, а их отношение – вклад каждого параметра относительно других в формирование значения общей оценки:

$$x_i = \begin{cases} \frac{b_i - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}}, & \text{если максимизация значений;} \\ \frac{b_{\max} - b_i}{b_{\max} - b_{\min}}, & \text{если минимизация значений.} \end{cases}$$

**Разработка инструментального средства.**

Разработана система поддержки решений по выбору энергоэффективных кристаллов с учетом требований конкретных проектов, интерфейс которого представлен на рис. 2.

Графический интерфейс пользователя состоит из трех основных областей. Базовые опции состоят из шести параметров фильтров. Для того чтобы провести фильтрацию и сузить область поиска были добавлены следующие фильтры: производитель – представлены такие производители как Altera, Xilinx, Microsemi; семейство представляет собой набор в зависимости от выбранного производителя; техпроцесс – это технология производства кристалла, измеряется в нанометрах; питание, уровень напряжения, подаваемый на цепь питания ядра; температурный диапазон определяет температурные условия эксплуатации; количество выводов, доступных для управления пользователем.

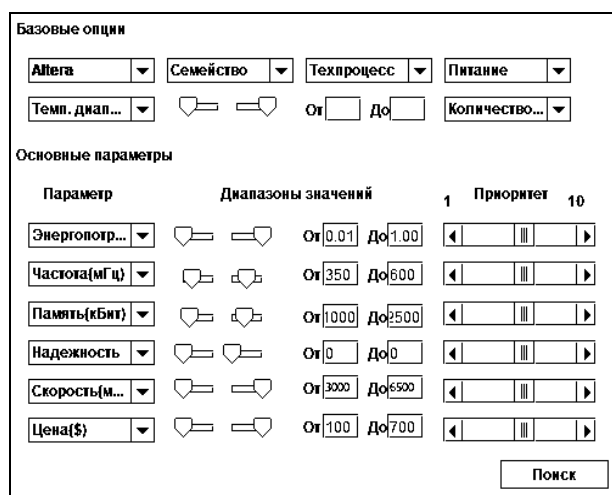


Рис. 2. Интерфейс окна приложения

Блок ввода основных параметров состоит из шести характеристик: энергопотребление; надежность, отказоустойчивость системы; частота, максимальная частота глобального тактового сигнала; память, объём ОЗУ; цена, за одну единицу; скорость обмена приемопередатчика.

После проведения тестирования была получена система, состоящая из проверенных и корректно взаимодействующих между собой компонентов.

**Пример выполнения алгоритма.** Для демонстрации работы алгоритма рассмотрим пример. Предположим, необходимо выбрать кристалл с малым энергопотреблением на множестве из 6 кристаллов компании Altera с различными характеристиками (см. табл. 1). При этом требования к другим характеристикам следующие: частота должна быть не менее 500 Mhz; объем памяти не менее 4000 Bits; скорость обмена не менее –5000 Gbps.

Таблица 1

Описание кристаллов Altera

Название	Энергопотр.	Частота	RAM	Ско-сть	I/O
90CF1152C	0.7225	568.18	520	6375	58
90EF1152I	0.7225	507.61	520	5000	58
90FF1508C	0.7225	568.18	520	6375	50
90FF1508I	0.7225	507.18	520	5000	50
130GF1508C	0.9538	539.66	747	6375	34
130GF1508I	0/9538	507.61	747	5000	34

Для осуществления поиска кристалла с минимальным энергопотреблением, устанавливаем приоритет на максимум, ограничиваем при этом другие характеристики и устанавливаем их приоритет 1 (рис. 3, табл. 2).

Входные данные: энергопотребление – 10; частота – 1; RAM – 1; скорость – 1; кол-во I/O – 1. Результат: исходя из графика, следует, что кристалл под номером 3 является рациональным вариантом с минимальным энергопотреблением.

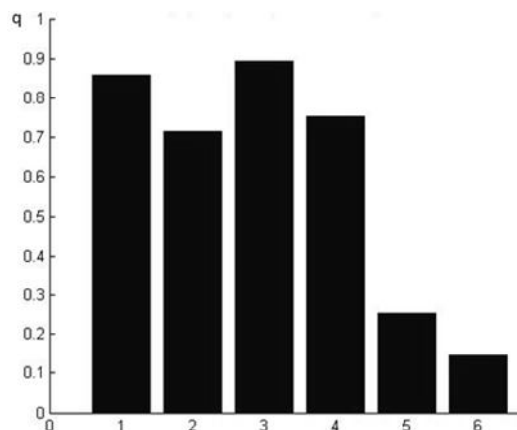


Рис. 3. График полученных оценок q для каждого кристалла

Таблица 2

Значения характеристик кристалла

Название	Энергопотр.	Частота	RAM	Ско-сть	I/O
90CF1152C	0.7225	568.18	520	6375	58
90EF1152I	0.7225	507.61	520	5000	58
<b>90FF1508C</b>	<b>0.7225</b>	<b>568.18</b>	<b>520</b>	<b>6375</b>	<b>50</b>
90FF1508I	0.7225	507.18	520	5000	50
130GF1508C	0.9538	539.66	747	6375	34
130GF1508I	0/9538	507.61	747	5000	34

## Выводы

В данной работе рассмотрен вопрос выбора энергоэффективных кристаллов для проектов с применением FPGA. Предложен метод рационального выбора кристалла, учитывая требования к проекту. В основу метода положена идея установки приоритетности определенной характеристики исходя из требований. Разработано инструментальное средство, реализующее предложенную методику.

Направления дальнейших исследований: создание онлайн-сервиса по обеспечению поиска кристаллов, учитывая разные критерии и разработка дополнительных рекомендаций для реализации систем различной сложности.

## Список литературы

1. Ranta, J. *The Current State of FPGA Technology in the Nuclear Domain* [Text] / J. Ranta // *VTT Technology 10*. – Espoo: VTT Technology, 2012. – 62 p.
2. Федухин, А.В. ПЛИС-системы как средство повышения отказоустойчивости [Текст] // А.В. Федухин, А.А. Муха // *Математичні машини і системи*. – 2010. – № 1. – С. 198-204.
3. Перепелицын, А.Е. Анализ применения ПЛИС технологий в медицинском оборудовании [Текст] / А.Е. Перепелицын, В.С. Харченко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 7 (59). – С. 125-130.
4. The drive to lower power // <http://signal-processing.mil-embedded.com/articles/the-drive-lower-power> [Electronic resource] – Access mode: <http://signal-processing.mil-embedded.com/articles/the-drive-lower-power/> – 12.06.2015.
5. Вычужанин, В. Минимизация энергопотребления проектируемых устройств на ПЛИС типа FPGA [Текст] / В. Вычужанин // *Современная электроника*. – 2011. – № 4. – С. 58-61
6. Самсонова, И.А. Исследование методов снижения энергопотребления во встраиваемых приложениях на базе DSP и FPGA [Текст] / И.А. Самсонова, А.Н. Мирошкин // *"Информатика та комп'ютерні технології" (ИКТ-2013)*, 2013. – С. 37-41.
7. Farooq, U. *Tree-based Heterogeneous FPGA Architectures Application Specific Exploration and Optimization* [Text] / U. Farooq, Z. Marrakchi, H. Mehrez. – Springer; 2012. – 188 p.
8. FPGA tutorial [Electronic resource] – Access mode: <http://www.radio-electronics.com/> – 22.09.2015.
9. Serrano, J. *Introduction to FPGA Design* [Text] / J. Serrano // *CAS – CERN Accelerator School: Course on Digital Signal Processing*, 2007. – P. 231-247.
10. The drive to lower power [Electronic resource] – Access mode: <http://signal-processing.mil-embedded.com/> – 22.09.2015.
11. *Selecting the Ideal FPGA Vendor for Military Programs* [Electronic resource] – Access mode : <https://www.altera.com/> – 22.09.2015.
12. Турыгин, И.Г. Специальное программное обеспечение классификации и выдачи структурированной информации о ПЛИС [Текст] / И.Г. Турыгин, О.С. Литвинская // *Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: труды X Всерос. НТК*. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2012. – С. 82-84.
13. Турыгин, И.Г. Обобщенная модель выбора ПЛИС при проектировании цифровых устройств обработки информации [Текст] / И.Г. Турыгин, О.С. Литвинская // *Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: труды XI Всерос. НТК*. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2013. – С. 67-70.
14. Орлов, А.И. Теория принятия решений : Учебное пособие [Текст] / А.И. Орлов. – М.: Март, 2004. – 656 с.
15. Черноуцкой, И.Г. Методы оптимизации в теории управления [Текст] / И.Г. Черноуцкой. – СПб.: Питер, 2004. – 256 с.
16. Черноморов, Г.А. Теория принятия решений: Учебное пособие / Г.А. Черноморов. / Новочеркасск: ред. журн. "Изв. вузов Электромеханика", 2002. – 276 с.
17. Турыгин, И.Г. Многокритериальный выбор программируемых логических интегральных схем при проектировании устройств обработки цифровой информации [Текст] / И.Г. Турыгин, О.С. Литвинская // *Инфокоммуникационные технологии*. – Самара: ООО «Аэропринт», 2013. – Т. 12. – № 4. – С. 58-62.
18. Литвинская, О.С. Принятие решения по выбору средств реализации алгоритмов цифровой обработки информации при проектировании технической системы [Текст] / О.С. Литвинская // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего*. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2011. – № 3. – С. 67-72.

Поступила в редколлегию 24.12.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.А. Фурман, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

## ВИБІР ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПЛІС: МЕТОДИКА ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАСІБ

Я.А. Чуйков, В.С. Харченко, А.Е. Перепелицын

Пропонується методика та інструментальний засіб для раціонального вибору кристалу з урахуванням вимог до енергоефективності конкретних проектів. Об'єктом дослідження є технічні характеристики елементної бази FPGA. Аналізуються архітектурні особливості кристалів, їх класифікація за типом зберігання конфігурації даних, методи зниження енергоспоживання FPGA. На основі проведеного аналізу розроблена методика та інструментальний засіб вибору кристалів з урахуванням вимог до проекту.

**Ключові слова:** енергоспоживання, системи підтримки прийняття рішень, енергоефективність, FPGA.

## SELECTION OF POWER-EFFICIENT FPGA: TECHNIQUE AND TOOL

Y.A. Chuikov, V.S. Kharchenko, A.E. Perepelitsyn

The technique and tool for the rational selection of FPGA chip based on requirements to the specific projects are proposed. The technical characteristics of FPGA package is the object of research. Architectural features of FPGA packages, their classification by type of configuration data storage and methods of FPGA power consumption lowering are analyzed. The technique of FPGA chip selection based on the requirements of the project is developed. The decision support software tool based on this technique is developed.

**Keywords:** power consumption, decision support systems, energy efficiency, FPGA.