

Технологии обработки данных: программируемое и непрограммируемое

Кулешов С.В., Зайцева А.А., Аксенов А.Ю.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Санкт-Петербург

Резюме: В статье предлагается критический анализ классификации технологий обработки данных. В процессе анализа выявлена неоднозначность традиционной общепринятой терминологии и предлагается подход к классификации с учетом современного состояния техники.

Ключевые слова: обработка данных, технологии, программируемый, цифровой, аналоговый, программно-управляемый, программно-определяемый.

Data processing technologies: programming and non-programming

Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Aksenov A.Y.

Summary: The paper proposes the critical analysis for classification of data processing technologies. In the course of the analysis the ambiguity of the traditional standard terminology is revealed and the approach to classification taking into account the current state of the equipment is offered.

Keywords: data processing, technologies, programming, digital, analog, software-controlled, software-defined.

В последние десятилетия наблюдается интенсивное проникновение цифровых информационных технологий в повседневную жизнь. Происходит смещение с физических способов работы с устройствами (device centric) к логическим методам работы с данными (data centric) [1].

Размытие границ между программной (software) и аппаратной (hardware) составляющей в системах обработки данных, наметившееся в последние годы порождает недопонимание в терминах, связанных с обозначением технологий [2], например, до сих пор не утихают споры о том, к какому классу обработки данных относится термин «цифровые программируемые технологии»[3-6]. Возникают

неологизмы «цифровое в аналоговом» и «аналоговое в цифровом». Попробуем разобраться с тем, какие бывают технологии и в чем их особенности, преимущества и недостатки.

Наглядно классификацию технологий обработки данных можно представить на рисунке 1.

Цифровые непрограммируемые	Цифровые программируемые
Аналоговые непрограммируемые	Аналоговые проагмируемые

Рис. 1. Виды технологий обработки данных

Согласно такой классификации, системы обработки данных разделяют на цифровые и аналоговые, а также на программируемые и непрограммируемые (жесткие, не перестраиваемые).

Область **цифровых непрограммируемых** систем относится к системам, оперирующим с данными, представленными в дискретном виде. Разработка теоретических методов дала возможность решать на цифровых системах различные задачи с помощью ограниченного набора базовых арифметических и логических операций. Фактически, построение цифровой непрограммируемой системы сводится к декомпозиции задачи в формализме логических функций и синтезу системы, реализующей эти логические операции (рисунок 2).

В связи с тем, что реальное устройство, построенное в соответствии с формализованным описанием задачи, может решать только эту конкретную задачу, оно является не универсальным.

Основой цифровых непрограммируемых систем могут служить как электронные, так и другие технологии, обеспечивающие свойства цифровой логики – пневматические, механические и иные (рисунок 3).

Здесь и далее из всего многообразия использования различных физических принципов будем рассматривать технологии обработки данных только на примере электронных устройств.

Развитием цифровых непрограммируемых систем являются динамически реконфигурируемые логические схемы (ПЛИС/FPGA – field-programmable gate array) [8].

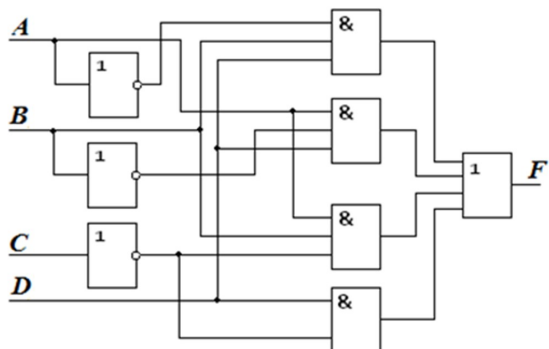


Рис. 2. Фрагмент цифровой непрограммируемой системы



Рис. 3. Фрагмент цифрового пневматического контроллера [7]

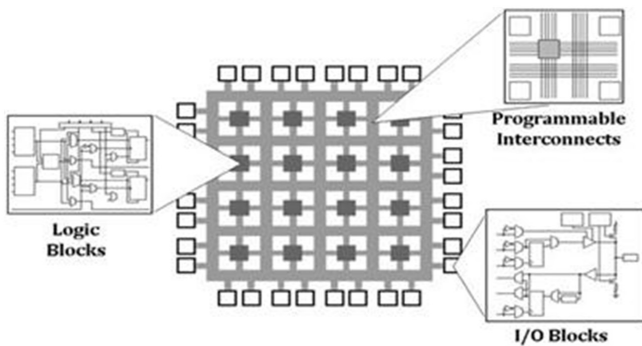


Рис. 4. Структурная схема FPGA

В самом простом варианте ПЛИС состоит из матрицы однородных ячеек, функцию каждой из которых можно поменять с помощью мультиплексоров, подсоединенных к битам конфигурационной памяти (рисунок 4). Одна ячейка может стать элементом логического ИЛИ с четырьмя входами и одним выводом, другая – сдвиговым регистром и т.д. Таким образом, конкретная конфигурация структуры ПЛИС, формирующая электронную цифровую схему, которая может быть процессором, контроллером и т.д., определяется битовой последовательностью, загружаемой в ПЛИС из конфигурационной памяти.

В отличие от электронной цифровой схемы, загруженной в ПЛИС, сама ПЛИС является программно-реконфигурируемым устройством, так как реконфигурирование ПЛИС формирует новую электронную схему (hardware), в то время как при программировании процессора (фиксированного hardware) ему предлагается цепочка последовательных инструкций программы (software).

Аналоговые системы (АС) предназначены, в первую очередь, для решения задач, описываемых системами дифференциальных уравнений: управление непрерывными процессами; моделирование в гидро- и аэродинамике; исследование динамики сложных объектов, электромагнитных полей; оптимизация и оптимальное управление, и др. До последнего времени АС были идеально приспособлены для осуществления автоматического контроля над производственными процессами, так как обеспечивали меньшую задержку в процессах управления по сравнению с существовавшими тогда цифровыми аналогами. Однако АС не могут решать задачи, связанные с хранением и обработкой больших объемов информации различного характера, задач, в которых требуется высокая степень точности и др., с которыми легко справляются цифровые вычислительные машины, использующие дискретную форму представления информации [9]. В АС, напротив, вся вычислительная система является и средой обработки, и программой, хранящейся в самой структуре системы, а не в отдельных ее узлах. Основа вычислительного процесса цифровой системы – алгоритм, представленный в форме программы. Для аналоговой машины программы не требуются – здесь речь идет о построении структурно-поведенческой модели [9].

По конструктивным признакам АС можно разделить на:

– АС матричного типа — аналоговая машина, в которой отдельные простейшие вычислительные блоки жестко соединяются в одинаковые типовые группы. В основном используется для моделирования дифференциальных уравнений. Задачу при этом

предварительно необходимо свести к равносильной ей системе дифференциальных уравнений первого порядка. Каждая типовая группа вычислительных элементов используется для моделирования одного уравнения. Адаптация к задаче на таких АС сводится к установке коэффициентов и начальных условий.

– АС структурного типа — аналоговая машина, в которой простейшие вычислительные блоки соединяются между собой в соответствии с математическими операциями решаемого уравнения. Используются для математического моделирования.

В отличие от цифровых непрограммируемых систем, **аналоговые непрограммируемые** системы оперируют с данными, представленными в виде непрерывных изменений значений некоторых физических величин. При этом в качестве физических переменных могут выступать сила тока электрической цепи, угол поворота вала, скорость и ускорение движения тела и т.п. Используя тот факт, что многие явления в природе математически описываются одними и теми же уравнениями, аналоговые управляющие системы (в [10] под ними понимаются аналоговые вычислительные машины) позволяют с помощью некоторого физического процесса моделировать другие процессы различной природы.

Решаемая такими устройствами задача (класс задач) жёстко определяется внутренним устройством аналоговой непрограммируемой системы и выполненными настройками.

К **аналоговым программируемым** технологиям можно отнести программируемые аналоговые матрицы (программируемых аналоговых интегральных схем — ПАИС, FPAА – field-programmable analog) [11]. Элементами программируемых аналоговых ячеек являются усилители, интеграторы, компараторы и пр. с программируемыми особенностями и характеристиками [12].

Обработка сигнала внутри ПАИС осуществляется схемами на переключаемых конденсаторах. В отличие от цифровых систем, где сигнал дискретен по времени и квантован по уровню, в дискретно-аналоговых системах сигнал дискретен только по времени [11].

Элементы для межсоединения коммутируют программируемые аналоговые блоки между собой, соединяя как входы блоков, так и выходы, организуя цепи обратной связи через другие аналоговые блоки (это достаточно часто требуется при разработке различных фильтров).

Основу ПАИС составляют конфигурируемые аналоговые блоки, каждый из которых содержит наборы элементов — программируемые

конденсаторы, операционные усилители, компаратор и регистр последовательного приближения (рисунок 5).

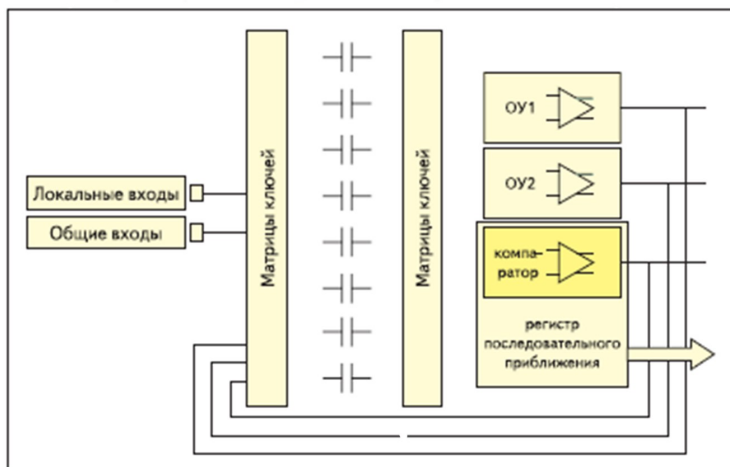


Рис. 5. Структурная схема ПАИС (FRAA)

Используя этот набор элементов, можно создавать конфигурируемые аналоговые модули: усилители, выпрямители, интеграторы, дифференциаторы, сумматоры, перемножители и т. п.

При включении микросхемы ПАИС конфигурационная память очищается, после чего конфигурационная логика автоматически загружает данные из конфигурационной памяти. После завершения загрузки данных ПАИС автоматически активизирует аналоговую структуру.

В ранних источниках подобные аналоговые программируемые системы относились к гибридным [10].

В приложениях, требующих динамического переконфигурирования аналоговой структуры в процессе работы, необходимо использовать внешний контроллер, позволяющий выполнять вычисления новых значений схемы, собирать эти значения в блок конфигурационных данных и передавать его в ПАИС. В этом случае новые конфигурационные данные загружаются в специальную область памяти ПАИС — теневое ОЗУ, а затем с приходом очередного такта синхронизации копируются в конфигурационную память, после чего микросхема начинает работать в новой конфигурации без прерывания процесса обработки сигнала [11], что реализует программно-конфигурируемый режим работы.

В настоящий момент наибольший интерес и практическую ценность представляют **цифровые программируемые технологии (ЦПТ)** [5]. Отличительной особенностью ЦПТ будем считать возможность реализации такого процесса на ЦПТ, который не является моделью какого-либо процесса, реализуемого в аналоговой технологии.

Наследуя особенности цифровых непрограммируемых систем работы с данными, представленными в дискретном, чаще символьном виде, они обладают новым качеством – возможностью изменения собственных свойств под влиянием этих данных.

Следует отличать влияние входных данных на временное изменение поведения системы, которое, например, возможно в аналоговых системах, содержащих интеграторы, или цифровых системах, содержащих элементы памяти, от цифровых программируемых систем, где под влиянием внешних сигналов или внутренних процессов меняется управляющая программа, определяющая принципы функционирования всей системы.

В программировании существует понятие гомоиконности – это свойство цифровых систем, в которых исполнимый код и данные имеют одинаковое представление. При этом исполнимый код может трактоваться как данные, а данные как исполнимый код [13].

Использование свойства гомоиконности в цифровых программно-управляемых системах дает возможность изменять программу в процесс работы системы [14, 15].

В цифровых программируемых системах обычно имеется наличие некоторой архитектуры, позволяющей осуществлять программно-управляемую обработку данных. К двум классическим широко используемым архитектурам относятся гарвардская (рисунок 6) и фон-неймановская (рисунок 7).

В гарвардской архитектуре характеристики устройств памяти для инструкций и памяти для данных не обязательно должны быть одинаковыми. В частности, ширина слова, тактирование, технология реализации и структура адресов памяти могут различаться. В некоторых системах инструкции могут храниться в памяти только для чтения, в то время как для сохранения данных обычно требуется память с возможностью чтения и записи. В некоторых системах требуется значительно больше памяти для инструкций, чем памяти для данных, поскольку данные обычно могут подгружаться с внешней или более медленной памяти. Такая потребность увеличивает битность (ширину) шины адреса памяти инструкций по сравнению с шиной адреса памяти данных [16].

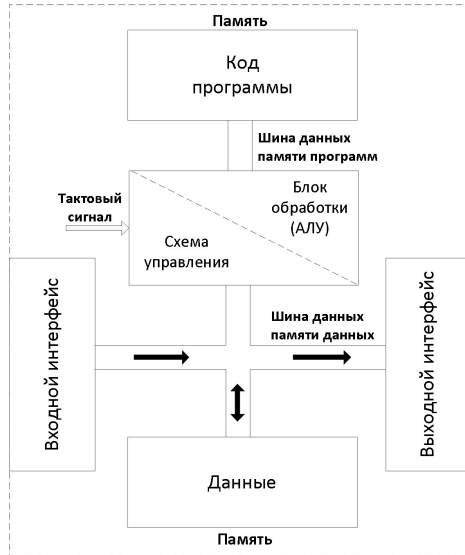


Рис. 6. Элементарная гарвардская машина (шина адреса не показана)

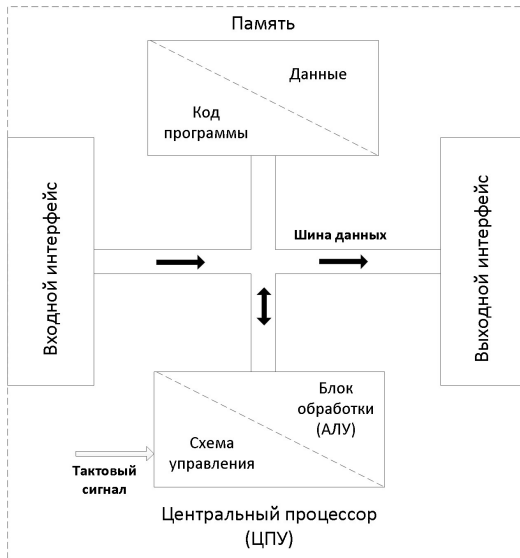


Рис. 7. Элементарная фон-неймановская машина (шина адреса не показана)

Революционной идеей, значение которой трудно переоценить, является принцип «хранимой программы». Первоначально программа задавалась путём установки перемычек на специальной коммутационной панели, что было весьма трудоемким занятием. Однако программа может также храниться в виде набора нулей и единиц, причем в той же самой памяти, что и обрабатываемые ею числа. Отсутствие принципиальной разницы между программой и данными дало возможность ЭВМ самой формировать для себя программу в соответствии с результатами обработки данных [16].

Возможны и другие варианты построения ЦС, если они способны обрабатывать данные, представленные в цифровой форме.

Недостатками рассмотренной классификации является путаница с отнесением некоторых типов устройств к определенному классу. Так ПЛИС, являясь по своей структуре цифровой программируемой средой, допускали возможность такого «программирования» только на этапе разработки системы, что делало их функционально неотличимыми от цифровых систем на логических элементах.

Для решения возникшего конфликта в классификации нужно ввести еще один параметр – возможность реконфигурировать систему в процессе работы. Исторически более ранний вариант предполагает возможность изменения системы в процессе ее проектирования и производства (Design-time реконфигурация). Последующие модификации (в том числе переориентация на другую задачу требуют изменение аппаратного обеспечения). Раннее развитие технологий лишь облегчало такую реконфигурацию (давала возможность перекоммутации блоков, перенастройку блоков и т.п.). Появление программно-управляемых устройств (зарождение программируемых технологий) стало переходным периодом к этапу, когда программно-управляемые системы (с жесткой архитектурой) были дополнены аппаратной средой, допускающей изменение структуры под воздействием этих программно-управляемых устройств, что стало основой программно-конфигурируемых (программно-определяемых) устройств, реконфигурируемых прямо в процессе работы (Run-time реконфигурация).

Разделение по параметру возможности динамического реконфигурирования системы в процессе работы позволило снять неоднозначность в отнесении устройств типа ПЛИС и ПАИС к программируемым или непрограммируемым технологиям.

	Design-time реконфигурация		Run-time реконфигурация	
	Непрограммируемые	Программируемые	Непрограммируемые	Программируемые
Аналоговые	Специализированные системы на аналоговых блоках	Универсальные АС из типовых аналоговых блоков	ПАИС	ПАИС с программно-управляемым процессором
Цифровые	Системы на логических элементах	Программно-управляемый процессор	ПЛИС	ПЛИС с программно-управляемым процессором

Рис. 8. Уточненная классификация с примерами технологий обработки данных

Сочетание <ПЛИС + процессор> и <ПАИС + процессор> является сочетанием программно-управляемого процессора и реконфигурируемой схемы, что дает программно-управляемую систему, которая приобретает способность быть программно-конфигурируемой. Подобный принцип может быть реализован, например, с помощью применения активных данных [15].

Проведенный в статье анализ классификации технологий позволил выявить основные особенности и ключевые отличия программируемых и непрограммируемых систем. В качестве отличительной особенности цифровых программируемых систем выделена возможность реализации на их базе такого процесса, который не является моделью какого-либо процесса, реализуемого в аналоговой технологии.

Мировая тенденция перехода от аналоговых средств трансляции информации широкоэмитательными станциями связи к глобальным магистральным коммуникационным цифровым сетям, появление GRID технологий и облачных вычислений заставляют по новому взглянуть на традиционные методологии обработки информации, а в некоторых случаях и пересмотреть принципы построения современных информационно-коммуникационных систем. Примером может служить компрессия видеоданных современными программами сжатия, алгоритмы которых не имеют физического аналога в реальном мире.

Следует также отметить наметившуюся тенденцию появления новых архитектур, являющихся надстройкой и логическим развитием существующих цифровых программируемых систем, которая состоит в переходе к программно-управляемой обработке данных на программно-конфигурируемой архитектуре. Это дает возможность расширения или даже полной замены функционала системы без изменения оборудования, производя при этом более гибкую настройку системы для повышения параметров быстродействия, энергоэффективности и управляемости.

Работа выполнена при частичной поддержке бюджетной темы №0073-2014-0005.

Библиография

1. А. Барсков. Ethernet вширь и вглубь // «Журнал сетевых решений/LAN», № 12, 2013
2. Александров В.В., Кулешов С.В., Юсупов Р.М. Технология программно-определяемых сред и импортозамещение // Информатизация и связь, №3 2016, стр. 154 – 157
3. Александров В.В. Цифровая программируемая инфокоммуникация // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2014, №6. С. 3-10
4. Александров В.В., Сарычев В.А. Цифровые программируемые технологии // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010.Т. 8.№11.С. 3–9.
5. Александров В.В., Кулешов С.В., Цветков О.В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. // СПб.: Наука. 2008. 244 с.
6. Кулешов С.В., Цветков О.В. Цифровая программируемая технология информационно-энергетической передачи данных. // "Информационно-измерительные и управляющие системы", №7, т.8, 2010. - С. 43-47.
7. Korane K.J. How to Avoid Electrical Hazards with Air Logic // URL: <http://www.clippard.com/cms/wiki/how-avoid-electrical-hazards-air-logic>
8. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы. Издательство: Додэка XXI, ДМК Пресс, 2015. 408 с.
9. Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. М: КНОРУС, 2013. 376 с.
10. Анисимов А.В., Артамонов А.Б., Лебедев А.Н. и др. Аналоговые и гибридные вычислительные машины: учеб. пособие по спец. ЭВМ. Под ред. А.Н. Лебедева и В.Б. Смолова. М.: Высш. шк., 1984. 320 с., ил.
11. Щерба А. Программируемые аналоговые ИС Anadigm: применение конфигурируемых аналоговых модулей в составе программы AnadigmDesigner2 // Компоненты и технологии, No 12, 2007, с. 12
12. Петросянец К., Суворов А., Харитонов И. Программируемые аналоговые матрицы фирмы Lattice Semiconductor // Chip News, 2001, №1
13. Homoiconic // URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Homoiconic> (дата обращения: 15.02.2017)
14. Кулешов С.В. Цветков О.В. Активные данные в цифровых программно-определяемых системах // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2014, №6. С. 12-19
15. Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. and Zaytseva A.A. Active Data in Digital Software Defined Systems Based on SEMS Structures. // Logical Analysis of Data and Knowledge with Uncertainties in SEMS – A.E. Gorodetskiy (ed.), Smart Electromechanical Systems, Studies in Systems, Decision and Control 49, 2016, pp. 61-69
16. Максимов Н.В., Партыка Т.Л., Попов И.И. Архитектура ЭВМ и вычислительных систем: Учебник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. 512 с.