

Н.Н. ПРОКОПЕНКО, Н.И. ЧЕРНОВ, В. ЮГАЙ
**СИНТЕЗ К-ЗНАЧНЫХ ЦИФРОВЫХ IP-МОДУЛЕЙ ДЛЯ
РОБОТОВ И ДАТЧИКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТОКОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ**

Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В. Синтез k-значных цифровых IP-модулей для роботов и датчиковых систем на основе линейных преобразований токовых логических сигналов.

Аннотация. Приведены результаты исследования двузначной и многозначной элементной базы (ЭБ) для цифровых структур, в т.ч. роботов и летательных аппаратов, функционирующей на основе линейных преобразований токовых логических сигналов. Цель исследований — разработка методов синтеза и аналоговых схмотехнических решений альтернативной цифровой ЭБ с улучшенными (в сравнении с традиционной элементной базой) техническими, технологическими и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: булева алгебра, линейная алгебра, двузначная логика, многозначная логика, линейное пространство, логический синтез, элементная база, k-значные логические элементы.

Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugay V.Y. **Synthesis of k-valued Digital IP-Modules for Robots and Sensor Systems Based on Linear Transformations of Current Logic Signals.**

Abstract. The paper presents the results of studies of a double-valued and a multi-valued elements stock (ES) for digital structures, including robots and flying vehicles, that operates by using linear transformations of current logic signals. A goal of the studies is to develop methods of synthesis and analog circuits engineering solutions of the alternative digital ES with the improved (as compared to the traditional elements stock) technical, technological and operational characteristics.

Keywords: Boolean algebra; linear algebra; double-valued logic; multi-valued logic; linear space; logic synthesis; elements stock; k-valued logic elements.

1. Введение. Условия работы электронных компонентов целого ряда современных технических устройств характеризуются наличием большого количества дестабилизирующих факторов: электрических помех, ионизирующих излучений, температуры и т.д. [1]. К подобным компонентам следует отнести электронную аппаратуру искусственных спутников Земли и космических аппаратов, атомных электростанций, манипуляторов технологических линий, роботов, выполняющих восстановление разрушенных объектов с повышенным уровнем радиоактивности, а также боевых роботов в реальных условиях их применения. Чтобы обеспечить надежное функционирование электронной аппаратуры применяются специальные меры ее защиты от внешних дестабилизирующих воздействий: радиационно-стойкая элементная база, различные виды экранирования, специфичные

конструкции и т.д. Это увеличивает время и повышает стоимость разработки, осложняет ее диагностику и контроль.

В ряде случаев при построении специализированных систем автоматического управления (САУ) приходится обрабатывать не потенциальные, а токовые сигналы многоканальных датчиков, обеспечивать логическое преобразование входных токовых координат, например, компараторов на основе классических дифференциальных каскадов в параллельных АЦП. Некоторые исполнительные элементы САУ также требуют многоуровневого и многозначного токового управления. В этой связи уместно поставить вопрос о применении для задач данного класса однозначных и многозначных цифровых устройств с входными и выходными токовыми логическими переменными.

Одним из перспективных направлений улучшения характеристик ЭК является разработка таких методов их построения, при которых цифровые IP-модули предлагаемого подкласса обладают потенциально более высокими параметрами, учитывающими воздействие указанных выше дестабилизирующих факторов. Такой подход требует разработки иных, отличных от существующих, методов логического синтеза, а также структурных и схемотехнических решений.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследования возможности создания микроэлектронной цифровой элементной базы на отличной от булевой, математической основе. Предложен альтернативный математический аппарат, методы синтеза, рассмотрены примеры логического синтеза и схемотехнического проектирования новой цифровой элементной базы различной значности, реализуемой на основе принципов аналоговой схемотехники.

2. Булева алгебра как аппарат логического синтеза. Первой логико-алгебраической системой, использованной для решения задач логического синтеза электронных и микроэлектронных логических схем, стала булева алгебра. Роль ее в разработке цифровых структур различного назначения переоценить невозможно: проектирование всех цифровых структур автоматики, вычислительной техники, систем управления, связи и т.д. произведено методами, в основе которых в качестве математического аппарата была использована булева алгебра.

Однако следует отметить, что булева логика первоначально была разработана как математический аппарат логического синтеза релейно-контактных схем, а потом приспособлена для нужд электроники. Последнее обстоятельство, вероятно, предопределило особенности применения булевой логики при проектировании БИС. Причиной таких особенностей стали такие ее свойства, как переборность решения задач минимизации булевых функций, кодирования состояний автомата, доопределения частичных булевых

функций и др. Следствием этих особенностей были предпринятые в разное время попытки «сместить» булеву логику с позиций наиболее подходящего для целей логического синтеза математического аппарата. Одной из таких попыток стала разработка спектральных методов, слабо зависящих от конкретных особенностей базисной системы элементов, приспособленных к синтезу цифровых структур на интегральных схемах, а также схемах с переменной структурой и схемах, адаптирующихся к изменениям среды, в которой они функционируют [3]. Еще одним привлекательным свойством спектрального подхода явилась пригодность его для синтеза схем, построенных на элементах с различным числом устойчивых состояний и цифроаналоговых схем.

По оценке самих разработчиков этого подхода основным недостатком спектральных методов является их приближенность, т. е. не абсолютная минимальность получаемых схемных решений. Кроме того, спектральные методы синтеза решали задачу проектирования цифровых структур на существующей элементной базе, т.е. не подменяли булеву логику на уровне проектирования ИС.

В качестве исходной установки по улучшению технических характеристик БИС авторами настоящей работы принято предположение о том, что такое улучшение должно быть результатом по крайней мере двух воздействий [4]:

— технологического (уменьшение габаритов элементов, повышение плотности размещения, применение новых материалов, совершенствование технологических процессов и т.д.);

— математического (разработка и использование иных, в том числе и не булевых, функциональных базисов и логических операций, имеющих упрощенную, по сравнению с булевой, аппаратную интерпретацию, разработка новых методов логического синтеза и т.д.).

Что касается технологии, то она находилась и продолжает находиться в постоянном развитии и именно ей мы обязаны успехами улучшения технических характеристик БИС. Особенности же булевой логики привели к тому, что ее математическая составляющая практически сохранилась в неизменном виде с момента ее создания и не оказала какого-либо существенного влияния на характеристики БИС (кроме, может быть, методов минимизации).

Поскольку мы намерены уделить основное внимание именно этой составляющей, то рассмотрим ее несколько подробнее. Особенности булевой алгебры как математического аппарата логического синтеза характеризуется рядом ограничений [5, 6]:

— математических — неадекватностью вербального (исходного) и алгебраического (конечного) описаний логической функции, реализуемой схемой (логическая функция сумматора не содержит

операции суммирования). Это требует дополнительных аппаратных и временных затрат на реализацию функций;

— технологических — использованием ограниченного количества функционально полных систем логических функций для построения схем (2 из 17 возможных). Это оставляет открытым вопрос об оптимальности используемых схемотехнических решений для построения конкретных логических схем;

— конструкторских — рост сложности схем вызывает технологические проблемы размещения все усложняющихся элементов и особенно проводников на ограниченной площади кристалла. Это требует постоянного уменьшения их размеров вплоть до величин, при которых перестают действовать физические законы их функционирования. Нанотехнологии, возможно, смогут увеличить быстродействие, но не смогут уменьшить размеры и плотность размещения элементов;

— эксплуатационных — потенциальный характер логических сигналов в БИС («нуль», «единица») определяет повышенный уровень внутренних помех и снижает помехоустойчивость БИС. Это определяет надежность функционирования БИС в составе сложных цифровых систем;

— энергетических — большое количество проводников в ограниченном объеме кристалла порождает соответствующее количество паразитных емкостных связей между ними, постоянный перезаряд которых требует непроизводительных энергетических затрат. Это снижает уровень полезного использования потребляемой мощности до 30-40%. Кроме того, возможности повышения плотности размещения элементов «упираются» в проблему теплоотвода.

Преодоление указанных ограничений возможно по крайней мере двумя путями:

— разработкой и использованием новых перспективных технологий — квантовых, молекулярных и т.д.;

— использованием многозначной элементной базы и многозначных IP-модулей для средств автоматики, вычислительной техники и систем управления и т.д.

Главный ограничительный фактор первого пути — его временная и материальная затратность: для достижения уровня инженерных решений необходимы еще более объемные исследования, создание технологий, оборудования, средств измерения и т.д. Вероятность достижения обещанных показателей пока не абсолютна. Первый путь — это, скорее, путь развития суперкомпьютеров. Вряд ли можно представить себе использование подобных технологий, например, в мобильной аппаратуре.

Второй путь — гораздо менее затратный: существующие материалы и технологии, оборудование, средства измерения могут быть использованы без каких-либо изменений.

Следует отметить, что развитию второго пути препятствует сама булева алгебра. Математический переход к многозначной булевой логике требует аналогичного перехода в средствах реализации многозначных цифровых устройств: требуются физические элементы с числом различных состояний, равным значности логики [7, 8]. Для двузначной логики это требование является легко выполнимым: естественных материалов и искусственных устройств с двумя различными состояниями достаточно много (реле, электронные лампы, полупроводники и т.д.). У многозначной логики ситуация иная: природных устройств с числом различных состояний больше двух не существует. Что же касается искусственных многозначных логических элементов, способных заменить природные, то они, несмотря на многочисленные попытки, пока не разработаны. Тем не менее исследования в области многозначной логики продолжаются, в том числе и на мировом уровне. Свидетельством тому являются ежегодные симпозиумы по многозначной логике под эгидой IEEE [9, 10]. Однако анализ публикаций последних лет даже этого мирового форума показывает, что основные направления исследований в области многозначной логики не связаны с созданием соответствующей элементной базы и многозначных средств обработки информации.

Авторами настоящей работы развивается иной, отличный от булева, подход к логическому синтезу и схемотехническому проектированию цифровых структур различной значности, основанный на замене части логических операций арифметическими. В сочетании с возникающими в этом случае особенностями представления реализуемых функций и методологии логического синтеза этот подход позволяет получать оригинальные [11-19] схемотехнические решения как двузначных, так и многозначных цифровых структур, в том числе IP-модулей и спецвычислителей для датчиковых систем роботов.

3. Базовая концепция линейного логического синтеза.

Необходимость развития математической составляющей воздействия на технические характеристики БИС предполагает, прежде всего, выделение «критических точек» БИС, улучшение ситуации в которых возможно математическими средствами. В их числе можно выделить следующие проблемы:

- непроизводительные затраты оборудования на выполнение промежуточных преобразований исходных данных решаемой задачи;
- рост числа межсоединений в кристалле БИС;
- создание в одном кристалле аналоговых и цифровых элементов БИС.

Первая проблема состоит в том, что логические элементы (других элементов в БИС нет) используются для реализации не только логических операций, но и операций, не являющихся таковыми с точки зрения дискретной математики: сложение, сдвиг, сумма по модулю, нахождение меньшего из чисел и т.д. Для этого синтезированы логические функции и реализованы цифровые схемы, адекватно моделирующие соответствующие «нелогические» операции. При этом в процессе решения прикладной задачи выполняется тройное преобразование: переход от численного представления данных исходной задачи к логическому (АЦП), выполнение операций средствами логики и интерпретация логического результата соответствующими числовыми значениями (ЦАП). Возможным путем упрощения ее решения является использование такого математического аппарата синтеза элементов БИС, который требовал бы минимального преобразования исходного представления задачи для получения ее решения (выполняемая функция записывается в том виде, в котором она будет реализована).

Суть второй проблемы состоит в том, что рост сложности БИС сопровождается снижением эффективности использования площади кристалла (до 75% ее занимают межсоединения), ухудшением энергетических показателей БИС (до 80% энергии затрачивается на перезаряд емкостей линий связи), частотных свойств и т.д. Возможным путем ее решения является использование математического аппарата логического синтеза, обеспечивающего уменьшение количества элементов и преимущественным использованием монтажных логических операций.

Наличие третьей проблемы определяется современной тенденцией создания «систем-на-кристалле» (СнК) и различием требований к техническим характеристикам аналоговых и цифровых IP-модулей. Возможным путем ее решения является выполнение цифровых элементов БИС на принципах аналоговой элементной базы и изготовление СнК в едином технологическом цикле.

Возможные средства решения этих проблем перечислены ниже:

— токовое представление сигналов (для уменьшения внутренних помех, количественного представления логических значений);

— использование арифметических операций (для уменьшения объема дополнительных преобразований, аппаратных затрат и числа линий связи);

— перенесение значности из схемы в сигнал (для ликвидации проблемы создания многозначных структур на двузначных элементах и замены ключевой схмотехники линейной схмотехникой).

Перечисленные факторы являются исходными положениями базовой концепции линейного синтеза k -значных цифровых

структур [4, 5]. Из нее следует, что соответствующая ей алгебраическая структура должна:

- использовать арифметические операции, в первую очередь, сложение, вычитание и умножение на постоянный коэффициент, и некоторые другие;

- иметь большую свободу выбора логических операций, а следовательно, исходных схмотехнических решений компонентов БИС, чем булева алгебра;

- использовать в качестве средства для своей реализации линейную аналоговую схмотехнику.

В качестве математического аппарата для реализации этой концепции была выбрана линейная алгебра [6]. Аргументами в пользу такого выбора являются:

- возможность использовать для формирования базисов иных операций, отличных от операций линейного пространства;

- использование арифметических операций, не зависящих от значности;

- минимум непроектируемых преобразований и, следовательно, минимальная избыточность схмотехнических решений;

4. Линейная алгебра как математический аппарат логического синтеза. Система $A \rightarrow \langle A; +, \cdot, \theta; P \rangle$, где $P \rightarrow \langle P; +, \cdot, 0, 1 \rangle$ — поле, θ — нулевой вектор, $A \rightarrow \langle A; +, \cdot, \theta; P \rangle$ — векторное (линейное) пространство над полем P , называется линейной алгеброй над полем.

Линейное пространство. Интерпретируя эту алгебраическую систему определенным образом, можно получать алгебры с различными свойствами. Например, интерпретируя A как множество термов булевых функций $f(x_1, \dots, x_n)$, операции «+» и «-» как $\max(x_1, \dots, x_n)$, $\min(x_1, \dots, x_n)$, получаем алгебру $A \rightarrow \langle A; \max, \min, \theta; P \rangle$. Точно также, оставив семантику операций в первоначальном виде (т.е. определив их как обычные арифметические операции), можно рассматривать приведенную систему как линейную алгебру на множестве A векторов линейного пространства. В этом случае множество k -значных логических функций совпадает с множеством векторов k -мерного линейного пространства, а множество термов, необходимых для представления функций представляет собой некоторый базис линейного пространства, образование векторов которого может производиться с использованием любых математических операций.

Базовым множеством этой структуры является множество векторов линейного пространства соответствующей размерности. При этом множество булевых векторов является подмножеством пространства векторов линейного пространства.

Столь гибкая структура обеспечивает:

- возможность создания самых различных базисов и представлений логических функций на их основе;
- формирование значений k -значных переменных суммированием значений двузначных переменных, т.е. формированием многозначных функциональных элементов из двузначных функциональных элементов;
- использование арифметических операций при соответствующем выборе физического представления сигнала (например, в виде квантов тока) дает возможность реализовать некоторые из них монтажно, т.е. без использования функциональных элементов, уменьшая тем самым аппаратные затраты.

Поскольку структура представления k -значных логических функций (т.е. будущей схмотехнической реализации) в линейных пространствах не зависит от значности, представляется целесообразным перенесение значность логики в сигнал. При этом схмотехническая реализация будет иметь вид линейной аналоговой схемы, значность преобразования сигнала в которой будет определяться значностью сигнала. В сочетании со способом получения многозначных сигналов в виде алгебраической суммы двузначных предлагаемый подход к синтезу k -значных логических функций выглядит вполне логичным и законченным. Для схмотехнической реализации k -значных логических функций вполне пригодны двузначные функциональные элементы.

Логическое проектирование цифровых структур в линейной алгебре совпадает с представлением векторов в линейных пространствах и включает в себя операции:

- формирование базиса линейного пространства;
- представление вектора реализуемой логической функции в данном базисе.

Для формирования базисов из логических переменных можно построить различные конструкции линейно независимых векторов с заданными свойствами. В качестве примера на рисунке 1 приведены базисная и обратная матрицы одного из возможных двузначных базисов для функций двух аргументов (базис Жегалкина).

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ | x_1 - x_2 | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Базисная и обратная матрицы двузначного базиса двух аргументов

Элемент $|x_1 - x_2|$ базисной матрицы представляет собой арифметическую интерпретацию булевой операции $x_1 \oplus x_2$.

Аналогичный трехзначный базис двух аргументов представлен на рисунке 2.

$$J = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ |1 - x_1| \\ |1 - x_2| \\ |x_1 - x_2| \\ |x_1 - |1 - x_2|| \\ |x_2 - |1 - x_1|| \\ ||x_1 - |x_1 - x_2|| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Базисная и обратная матрицы трехзначного базиса двух аргументов

Представление логической функции в данном базисе производится путем умножения вектора-строки значений функции на столбцы обратной базисной матрицы. При этом получается вектор коэффициентов разложения исходного представления логической функции по данному базису. Умножая коэффициенты этого вектора на базисные векторы, получаем представление логической функции в данном базисе. Например, представление конъюнкции двух аргументов в базисах, приведенных на рисунках 1 и 2 имеет вид

$$x_1 \& x_2 = \frac{x_1 + x_2 - |x_1 - x_2|}{2}$$

как для двузначных, так и для трехзначных аргументов.

Аффинное пространство. Использование представления логических функций в аффинных пространствах приводит к линейной интерпретации их порогового представления. Например, операции основной функционально полной системы представляются в аффинном пространстве предикатами

$$\begin{aligned} x_1 \& x_2 &= P((x_1 + x_2) > 1), \\ x_1 \vee x_2 &= P((x_1 + x_2) > 0), \\ \bar{x} &= P(1 > x). \end{aligned}$$

Логические условия, представленные в скобках предикатов, могут быть реализованы вычитанием (усеченной разностью), например:

$$\begin{aligned} x_1 \& x_2 &= (x_1 + x_2) \div 1 = 1 \div [2 \div (x_1 + x_2)]; \\ x_1 \vee x_2 &= 1 \div [1 \div (x_1 + x_2)]. \end{aligned}$$

5. Линейная схмотехника и ее особенности.
Схмотехническая реализация функциональных компонентов

линейных цифровых структур предполагает наличие библиотеки реализаций базовых операций, определяемых выбранным базисом. Выбрав в качестве основной операции базиса, например, операцию усеченной разности и проанализировав состав базисных векторов, можно получить набор таких реализаций, приведенный в таблице 1.

Таблица 1. Схемотехническая реализация линейных базовых операций

Структура	Схема
Инвертор знака	
Алгебраическая сумма (усеченная разность, элемент пороговый последовательный, повторитель)	
	<p style="text-align: center;">$y_1 = x_0 - y_0$ $y_1 = x_0 - y_0$</p>
	<p style="text-align: center;">$-y_1 = -(x_0 - y_0)$ $-y_1 = x_0 - y_0$</p>

Из таблицы следует, что основными функциональными структурами линейной схемотехники для данного базиса являются:

- токовое зеркало;
- сумматор токов (монтажное соединение токовых зеркал);
- токовый инвертор;
- последовательный дифференциальный каскад (элемент вычитания).

Из приведенного набора компонентов можно построить универсальный логический элемент (аналог булева инвертора), реализующий операцию усеченной разности и представляющий результат реализации в виде, удобном для дальнейшего использования. Принципиальная схема универсального логического элемента усеченной разности показана на рисунке 3.

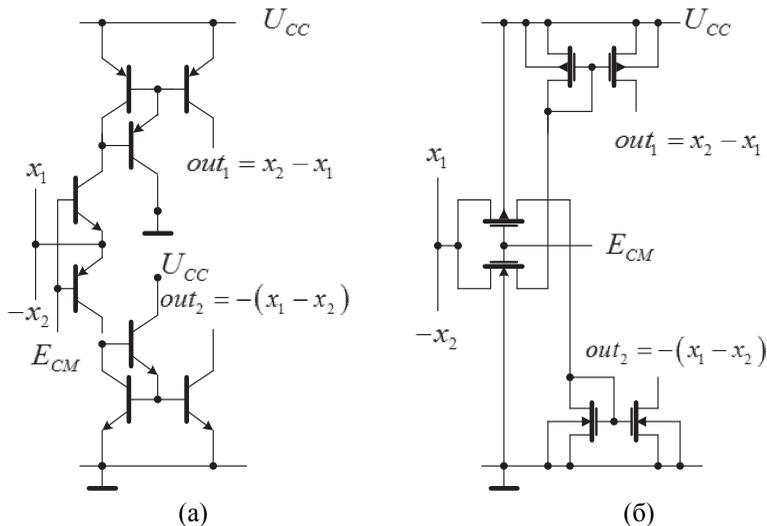


Рис. 3. Варианты построения элемента усеченной разности:
(а) биполярная схема, (б) КМОП-схема

На рисунке 3 символами x_1 и x_2 обозначены алгебраически складываемые кванты токов. Результат суммирования подается на объединенные эмиттеры (источники) транзисторов. При $x_1 > x_2$ получаем $out_1 = 0$, а на выходе out_2 формируется инвертированная по направлению разность квантов входных токов. При $x_1 < x_2$ выходы out_1 и out_2 по уровням сигналов меняются местами. При отсутствии необходимости один из токовых инверторов также может быть удален из схемы.

На рисунке 4 показаны осциллограммы входных и выходных сигналов логического элемента усеченной разности (см. рисунок 3, а), полученные в среде Cadence на моделях техпроцесса компании Zarlink со следующими параметрами транзисторов: NPN – FT = 2 ÷ 8.5 ГГц, $U_{кэ0}$ = 6 В, $\beta \approx 160$ –175; PNP – FT = 2 ÷ 8.5 ГГц, $U_{кэ0}$ = 6 В, $\beta \approx 160$ –170.

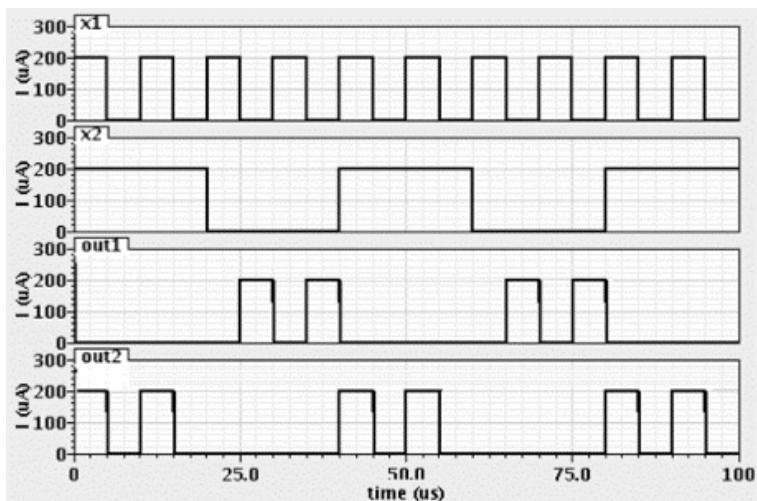


Рис. 4. Осциллограммы входных и выходных сигналов элемента усеченной разности, рисунок 3а

6. Заключение. Полученные результаты исследования позволяют считать линейный синтез k -значных логических элементов ($k = 2, 3, \dots$) одним из перспективных направлений логического синтеза спецвычислителей роботов, датчиковых систем и средств автоматки. Это связано с тем, что данный подход:

- снимает ограничения, накладываемые булевой алгеброй на процесс синтеза (например, отсутствие процедуры минимизации, необходимость наличия k -значных функциональных элементов);

- делает процесс логического синтеза независимым от значности;

- использует для синтеза цифровых структур аналоговые схемы, работающие в активном режиме, что увеличивает частотный диапазон работы элементов (задержки составляют десятки пикосекунд/элемент);

— обеспечивает возможность учета эксплуатационных характеристик будущих элементов еще на этапе логического синтеза (за счет выбора подходящего базиса);

— обеспечивает высокую технологичность изготовления логических элементов (схемы состоят только из транзисторов);

— обеспечивает минимизацию аппаратных затрат за счет применения монтажной реализации отдельных операций.

По материалам проведенных исследований получено 28 патентов на схемные решения k -значных логических элементов, более 10 заявок на патенты находятся в стадии экспертизы.

Литература

1. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем // М.: Изд-во МГТУ им. Баумана. 2005. 384 с.
2. Многозначные логики и их применения: Логики в системах искусственного интеллекта / Под ред. Финна В.К. // М.: УРСС. 2008. Т. 2. 240 с.
3. *Карповский М.Г., Москалев Э.С.* Спектральные методы анализа и синтеза дискретных устройств // М.: Энергия. 1973. 144 с.
4. *Чернов Н.И., Югай В.Я.* Неклассический синтез цифровых структур средствами аналоговой схемотехники // Труды IX Международного научно-практического семинара «Проблемы современной аналоговой схемотехники». 2012. с. 138–144.
5. *Chernov N.I., Yugaï V.Ya., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V.* Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. Pp. 146–149.
6. *Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я.* Линейный логический синтез двужначных цифровых структур в линейных пространствах // Конгресс «IS&IT'13». «Интеллектуальные системы'13», «Интеллектуальные САПР-2013»: труды конференций. Т.1. Москва: Физматлит. 2013. С. 278–283.
7. *Lukasiewicz J.* Logika trojwartosciowa // Ruch Filozoficzny. 1920. vol. 5. no. 9. (In Polish).
8. *Post E.L.* Introduction to a General Theory of Elementary Propositions // Amer. Journ. of Math. 1921.vol. 43. no 3. pp. 163–185.
9. *Stankovic M., Stojkovic S., Stankovic R.S.* Representation of Incompletely Specified Binary and Multiple-Valued Logic Functions by Compact Decision Diagrams // IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 142–147.
10. *Nagayama S., Sasao T., Butler J.T.* Analysis of Multi-state Systems with Multi-state Components Using EVMDDs // IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 122–127.
11. *Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Чернов В.И., Югай В.Я.* Одноразрядный полный сумматор с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2504074. 2014.
12. *Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Дворников О.В.* Мажоритарный элемент с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2506696. 2014.
13. *Чернов Н.И., Прокопенко Н.Н., Югай В.Я., Дворников О.В.* Логический элемент «Исключающее ИЛИ» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2506695. 2014.

14. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. Логический элемент «И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2509412. 2014.
15. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Дворников О.В., Югай В.Я. Логический элемент «И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2509413. 2014.
16. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я., Будяков П.С. RS-триггер с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2514789. 2014.
17. Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Логический элемент «2-И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 513717. 2014.
18. Чернов Н.И., Югай В.Я., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В. Логический элемент «2-И» с многозначным внутренним представлением сигналов // Патент России № 2513478. 2014.
19. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я., Бутырлагин Н.В. Устройство для выделения модуля разности двух входных токов // Патент России № 2520416. 2014.

References

1. Vorotnikov S.A. *Informacionnyye ustrojstva robototekhnicheskikh sistem* [Information devices Robotic Systems]. M: Izd-vo MGTU im. Baumana. 2005. 384 p. (In Russ.).
2. Finn V.K. *Mnogoznachnyye logiki i ih primenenija: Logiki v sistemah iskusstvennogo intellekta* [Many-valued logics and their applications: Logic in artificial intelligence systems]. M.: URSS. 2008. Vol. 2. 240 p. (In Russ.).
3. Карповский М.Г., Москалева Е.С. *Спектральные методы анализа и синтеза дискретных устройств* [Spectral methods of analysis and synthesis of discrete devices]. M.: Energy. 1973. 144 p. (In Russ.).
4. Chernov N.I., Jugaj V.Ja. [Neoclassical synthesis of digital structures by means of analog circuitry]. *Trudy IX Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminarara «Problemy sovremennoj analogovoj shemotehniki»* [Proceedings of the XI International "Problems of modern analog circuit design" scientific-practical seminar]. 2012. pp.138–144. (In Russ.).
5. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V. Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces. Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. pp. 146–149.
6. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Jugaj V.Ja. [Linear logic synthesis double digital structures in linear spaces]. *Kongress «IS&IT'13». «Intellektual'nye sistemy'13», «Intellektual'nye SAPR-2013»: trudy konferencij* [Congress «IS & IT'13». "Intelligent sistemy'13", "Intelligent CAD 2013": conference proceedings]. vol.1. Moscow: FIZMATLIT. 2013. pp. 278–283 (In Russ.).
7. Lukasiewicz J. Logika trojwartosciowa. *Ruch Filozoficzny*. 1920. vol. 5. no. 9. (In Polish).
8. Post E.L. Introduction to a General Theory of Elementary Propositions. *Amer. Journ. of Math.* 1921.vol. 43. no 3. pp. 163–185.
9. Stankovic M., Stojkovic S., Stankovic R. S. Representation of Incompletely Specified Binary and Multiple-Valued Logic Functions by Compact Decision Diagrams. IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic, 2012, pp. 142–147.
10. Nagayama S., Sasao T., Butler J.T. Analysis of Multi-state Systems with Multi-state Components Using EVMDDs. IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic. 2012. pp. 122–127.

11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya. *Odnorazrjadnyj polnyj summator s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Single-bit full adder with the internal representation of a multi-valued signals]. Pat. No. 2504074. 2014. (In Russ.).
12. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Dvornikov O.V. *Mazhoritarnyj jelement s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Majority element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2506696 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
13. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Dvornikov O.V. *Logicheskij jelement «Iskljuchajushhee ILL» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic Exclusive OR Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2506695 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
14. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya. *Logicheskij jelement «I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2509412 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
15. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Dvornikov O.V., Yugai V.Ya. *Logicheskij jelement «I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2509413 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
16. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Budyakov P.S. *RS-trigger s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [RS-Trigger with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2514789 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
17. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. *Logicheskij jelement «2-I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic 2-AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2513717 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
18. Chernov N.I., Yugai V.Ya., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. *Logicheskij jelement «2-I» s mnogoznachnym vnutrennim predstavleniem signalov* [Logic 2-AND Element with Multi-Valued Internal Representation of Signals]. Pat. No. 2513478 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).
19. Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Butyrlagin N.V. *Ustrojstvo dlja vydelenija modulya raznosti dvuh vhodnyh tokov* [Unit for Extracting Modulus of Difference of Two Input Currents]. Pat. No. 2520416 of Rus. Fed. 2014. (In Russ.).

Прокопенко Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники, Донской государственной технической университет (ДГТУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 599. prokopenko@sssu.ru; ул. Шевченко, 147, Шахты, 346500; р.т.: 8(8636) 226050, Факс: 8(8636) 226050.

Prokopenko Nikolay Nikolayevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of the information systems and radio engineering department, Don State Technical University (DSTU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 599. prokopenko@sssu.ru; 147, Shevchenko st., Shakhty, 346500, Russia; office phone: 8(8636) 226050, Fax: 8(8636) 226050.

Чернов Николай Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления института радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет (ЮФУ). Область научных интересов: логический синтез

цифровых структур. Число научных публикаций — 120. chernovni@yandex.ru; пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А, Таганрог, 347928; р.т.: 89198883412.

Chernov Nikolay Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of the automatic control systems department, Southern Federal University (SFU). Research interests: logic synthesis, multi-valued logic. The number of publications — 120. chernovni@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; office phone: 89198883412.

Югай Владислав Яковлевич — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления института радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет (ЮФУ). Область научных интересов: аналоговая микроэлектроника, аналого-цифровая схемотехника. Число научных публикаций — 68. yugtag@gmail.com; пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А, Таганрог, 347928; р.т.: +79054302206.

Yugay Vladislav Yakovlevich — Ph.D., associate professor, associate professor of the automatic control systems department, Southern Federal University (SFU). Research interests: analog microelectronics, analog-to-digital circuitry. The number of publications — 68. yugtag@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; office phone: +79054302206.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

Acknowledgements. The article was prepared within the framework of the project 16-19-00122 of the Russian Science Foundation for 2016-2018.

РЕФЕРАТ

Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. **Синтез k -значных цифровых IP-модулей для роботов и датчиковых систем на основе линейных преобразований токовых логических сигналов.**

Рассмотрены вопросы выбора математического аппарата логического проектирования элементной базы для работы при высоком уровне электрических помех, повышенной радиации и температуры, сопровождающих робототехнические системы в боевых условиях. Таким математическим аппаратом была выбрана линейная алгебра.

Показано, что особенностью линейной алгебры является возможность свободного выбора аналоговых схмотехнических решений при реализации компонентов цифровых структур и цифровых IP-блоков в целом. Кроме того, логическая функция в линейной алгебре имеет вид разностного представления, при этом выходной сигнал конкретного логического элемента определяется как разность сигналов двух его функциональных узлов, на которые одновременно действуют возмущающие воздействия. В результате влияние возмущений нейтрализуются и диапазон условий работоспособности расширяется.

Разработаны новые, специфичные для аппарата линейной алгебры, методы логического синтеза, а также основные варианты схмотехнических решений цифровой элементной базы рассматриваемого класса. Замечательными особенностями линейной алгебры являются два обстоятельства: единство ТТЛ- и КМОП-схмотехники, а также возможность логического и схмотехнического проектирования как двузначных, так и многозначных IP модулей. Все приведенные схмотехнические решения подверглись моделированию в среде Cadence. Результаты моделирования подтверждают наличие повышенных технических, технологических и эксплуатационных характеристик у линейных цифровых элементов в сравнении с функционально идентичными традиционными элементами потенциальной логики.

SUMMARY

Prokopenko N.N., Chernov N. I., Yugai V. Ya. **Synthesis of k-Valued Digital IP-Modules for Robots and Sensor Systems Based on Linear Transformations of Current Logic Signals.**

The questions of choice of the mathematical apparatus for the logic design of element base to function at high electric noise level, higher radiation and temperature affecting systems of robotics in conditions of fighting are considered. Linear algebra was chosen to be such a body of mathematics.

It was demonstrated that a certain freedom of choice of the analog circuits engineering solutions while implementing components of digital structures and digital IP-units. In addition, a logic function in linear algebra has a form of the difference representation, as this takes place, an input signal of the concrete logic element is determined as a difference of signals of his two functional units which are simultaneously exposed with the external disturbing influences. In consequence of this, environmental influences are neutralized, and a range of performance conditions is widened.

The new, specific for the particular body of linear algebra, the methods of logic synthesis and also the main variants of circuits engineering solutions of the digital elements stock of the class under consideration had been developed. Two peculiar things are the remarkable features of linear algebra: unification of TTL- and CMOS-circuits engineering, and also a possibility of logic and circuits engineering design both double- and multi-valued IP-modules. All the relieved circuits engineering solutions were simulated in the Cadence environment. The results of the computer-aided simulating are confirmed with the presence of enhanced technical, technological and operational characteristics of linear digital elements as compared with functionally identical traditional elements of potential logic.