
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 681.5;512.64;621.37

**ТОКОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
И IP-МОДУЛИ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

© 2019 Н.В. Бутырлагин^{*}, Н.И. Чернов^{*}, Н.Н. Прокопенко^{*/**}, А.В. Бугакова^{*}

^{*}Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

^{**}Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград, Россия

Рассмотрены особенности проектирования специальной электронной компонентной базы (ЭКБ) для систем автоматического управления и контроля ядерных энергетических установок. В отличие от классических потенциальных цифровых устройств – ЭКБ данного класса базируется на свойствах токовых логических элементов (ТЛЭ). Дано более полное и систематическое изложение основных положений синтеза ТЛЭ. Описан процесс синтеза функций основной функционально полной системы при использовании наборов логико-арифметических и логических операций. Сформулированы направления дальнейших исследований в области токовой ЭКБ. Обсуждаются линейные представления логических функций Булевой и линейной алгебры для двузначной и трехзначной логик. Рассмотрены базовые компоненты ТЛЭ. Представлены схемы, реализующие логические операции в различных базисах – «усеченная разность», «модуль разности», «сравнение», а также их комбинаций. Показаны преимущества ТЛЭ по сравнению с потенциальными цифровыми логическими элементами.

Ключевые слова: электронная компонентная база, системы автоматического управления, цифровые токовые структуры, логические элементы, представления логических функций, двузначная логика, трехзначная логика, надёжность.

Поступила в редакцию 10.02.2019

После доработки 22.02.2019

Принята к публикации 28.02.2019

Введение. Вычислительные устройства систем автоматического управления и контроля ядерных энергетических установок [1] выполняются сегодня в технологиях классической цифровой электронной компонентной базы (ЭКБ), которая работает с потенциальными логическими сигналами [2]. Предельные возможности данного класса цифровой ЭКБ, математической основой синтеза которой является булева алгебра, хорошо изучены и предельно использованы [3]. Существенные результаты здесь получены за счёт радиационно-стойких и высокотемпературных технологических процессов [4]. Что касается потенциальных микроэлектронных изделий с малыми топологическими нормами (7-28 мкм), то для задач ответственного применения они не рекомендуются из-за снижения надёжности. Нишей для их практического использования пока остаются мобильные устройства интернета вещей и другая бытовая техника.

В последние годы активно развиваются исследования в области альтернативных логических элементов и вычислительных устройств, обрабатывающих не потенциальные, а токовые логические сигналы [5-8]. Однако это направление не может пока конкурировать с потенциальной ЭКБ, прежде всего из-за отсутствия серийных микросхем данного класса. В то же время ряд задач построения специальных

контроллеров, сверхбыстродействующих АЦП, преобразователей сигналов датчиков с токовым выходом и т.п., могут быть решены путём реализации токовых устройств на базовых матричных кристаллах, в том числе ОАО «Интеграл» г. Минск, ООО «Дизайн центр «Союз» и др. [9].

Авторы настоящей работы более 30 лет посвятили изучению нетрадиционных (неклассических) методов логического синтеза и схемотехнической реализации цифровых структур. Время показало целесообразность исследований в этом направлении, поскольку возможности развития классических методов синтеза и реализации таких структур практически исчерпаны либо приближаются к физическому пределу [6]. Справедливости ради следует отметить, что «классика» создания цифровых структур развивалась, в основном, за счет совершенствования технологии, логический синтез оказался более статичной составляющей развития. Математический аппарат логического синтеза (булева алгебра) до настоящего времени сохранился в неизменном (с момента его создания) виде.

Справедливости ради стоит отметить, что неклассический синтез цифровых структур не стоял на месте [10]. Именно это обстоятельство привело авторов настоящей работы, в первую очередь, к необходимости перехода к иному, отличному от булевой логики, математическому аппарату логического синтеза. Как оказалось, в последствие, такая замена привела к соответствующей замене схемотехники и класса реализуемых цифровых структур (синтез потенциальных структур заменился синтезом токовых). Осознание возникающих при этом новых возможностей и особенностей логического синтеза и схемотехнической реализации цифровых токовых структур (ЦТС) привело авторов к необходимости формирования базовой концепции создания ЦТС, указывающей эти особенности и возможности, определяющей исходные логические и схемотехнические структуры, используемые при создании ЦТС, и методы их синтеза [11].

Намечающийся переход на считающиеся перспективными новые принципы построения цифровых структур (молекулярные, квантовые, оптические и т.д.) обусловлен тем, что традиционная схемотехника достигла пределов своего развития:

- возможности дальнейшего повышения степени интеграции за счет уменьшения размеров отдельных транзисторов ограничены нарушением физических процессов их функционирования.

- увеличение количества линий связей между элементами приводит к неэффективному использованию полезной площади кристалла (межсоединения занимают до 80%) и увеличению паразитных емкостей внутри БИС, что ограничивает быстродействие и ухудшает их энергетические характеристики (до 75% энергии затрачивается на перезаряд межпроводных емкостей) [12].

Отсюда следует, что непосредственными задачами дальнейшего улучшения технических характеристик традиционных БИС являются:

- уменьшение потребного количества транзисторов на реализацию операций, т.е. снижение функциональной избыточности схемотехники БИС;
- уменьшение количества линий связи в БИС.

Средствами решения этих задач являются две основных составляющих процесса создания БИС: логическое проектирование и технология.

Возможности логического проектирования в решении этих задач:

- уменьшения аппаратных затрат можно достичь за счет уменьшения промежуточных преобразований информации при преобразовании исходного описания задачи в форму обработки ее внутри БИС и обратно;

- поскольку исходное описание алгоритмов функционирования цифровых структур чаще всего формулируется в математической форме, для обработки

информации внутри БИС следует использовать математические операции, требующие минимальных затрат на их реализацию (главным образом, арифметические) с представлением сигналов в форме, удобной для обработки (например, в токовой);

– уменьшения числа связей можно достичь повышением их информативности, т.е. переходом к внутреннему многозначному представлению сигналов.

Технологические возможности улучшения частотных и энергетических характеристик БИС состоят в использовании технологий создания БИС, основанных на использовании токового представления сигналов. Естественные ограничения возможностей по развитию новых технологий приводят к осознанию необходимости максимального использования существующих технологий для создания БИС с техническими характеристиками, превышающими характеристики существующих БИС. Одним из таких направлений является создание многозначных (многоуровневых) БИС. При этом булев подход в этом направлении «натывается» на отсутствие аппаратных средств для его реализации (физических элементов с числом состояний, превышающим 2). В этом плане токовые схемы являются более перспективными, поскольку многозначный токовый сигнал может быть получен простым суммированием двузначных квантов тока (много – это совокупность единиц!). Формирование же таких сигналов на существующей элементной базе не составляет проблемы.

Реализация ЦТС – «попутное» решение еще одной проблемы современных тенденций создания цифровых устройств – «систем-на-кристалле» [13-15] – совмещения технологий изготовления цифровых и аналоговых схем (цифровые функциональные элементы ЦТС: сумматоры, токовые зеркала – аналоговые!).

Наконец, эксплуатационные особенности линейных БИС, реализованных на токовых зеркалах, определяются пониженными требованиями к стабильности напряжения питания, что позволяет обойтись без стабилизированных источников питания, объем и вес которых может достигать 50–70% объема и веса аппаратуры в целом. Кроме того, токовые сигналы обеспечивают минимальный уровень внутренних помех.

Перечисленные и другие особенности ЦТС определяют целесообразность их разработки и создания, а, значит, и методов логического синтеза, схемотехнического проектирования и применения в устройствах управления и обработки информации.

Первоначальные результаты формирования базовой концепции логического синтеза и схемотехнической реализации ЦТС, сформулированные авторами на базе предыдущих исследований, были опубликованы в 2013 году [11]. Последующие исследования привели к получению новых, переосмыслению полученных ранее результатов и уточнению некоторых положений базовой концепции. Поэтому целью настоящей работы является более полное и систематическое изложение основных положений базовой концепции и формулирование направлений дальнейших исследований логического синтеза и схемотехнического проектирования ЦТС.

Базовая концепция линейного синтеза ЦТС. Основные положения. Альтернативный подход к логическому синтезу многозначной цифровой элементной базы, предложенный авторами [16-17], состоит в переходе от логических (качественных) значений логических переменных к численным (количественным) значениям. Как показывает анализ, столь простая замена представления приводит к принципиальным изменениям в логическом синтезе и схемотехнической реализации многозначных ИС в целом. Эти изменения состоят в следующем:

1) Логическое значение переменной определяется не состоянием реализующей схемы, а количественным значением формируемого ею сигнала. Поскольку имеющиеся в распоряжении разработчиков элементы – двузначные, то многозначный сигнал может

быть сформирован естественным способом – суммированием двузначных значений. Это предполагает использование арифметических операций в логическом синтезе и соответствующих средств их реализации – в схемотехнике и технологии.

2) Увеличивается число комбинаций арифметических и логических операций, пригодных для использования в логическом синтезе, и, следовательно, количество возможных схемотехнических решений. Помимо собственно арифметических операций линейного пространства (сложения, вычитания, умножения и деления на конечное число) возможно использование «логико-арифметических» операций, в частности:

$$\begin{aligned}
 & \text{– усеченной разности } y = x_1 \div x_2 = \begin{cases} x_1 - x_2 & \text{при } x_1 \geq x_2 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \\
 & \text{– модуля разности } y = |x_1 - x_2| = \begin{cases} x_1 - x_2 & \text{при } x_1 \geq x_2 \\ 0 & \text{при } x_1 = x_2 \\ x_2 - x_1 & \text{при } x_2 > x_1 \end{cases},
 \end{aligned}$$

и логических операций, в частности:

$$\text{– сравнения } y = x_1 > x_2 = \begin{cases} 1, & \text{если "истина"} \\ 0, & \text{если "ложь"} \end{cases}.$$

Возможно, есть и другие операции, пригодные для использования в логическом синтезе ЦТС.

3) Использование этих операций для формирования базисов возможно как в «одиночном» (усеченная разность $\div$, модуль разности $| \cdot |$ или сравнение $>$) так и в «групповом» (усеченная разность $\div$, сравнение $>$; усеченная разность $\div$, модуль разности $| \cdot |$; сравнение $>$, модуль разности $| \cdot |$ или усеченная разность $\div$, усеченная разность $\div$, модуль разности $| \cdot |$) режимах, т.е. набор базисных векторов может быть (с)формирован с использованием либо только одной либо нескольких из представленных выше операций, а также с применением (либо без применения) операций линейного пространства. Примеры базисов указанных типов будут приведены далее.

4) Линейная алгебра – готовый математический аппарат логического синтеза ЦТС, применимый в логиках любой значности. Аппарат линейной алгебры хорошо разработан, широко известен и доступен для освоения. Остается оценить практику, смысл и последствия известных матричных преобразований в линейном синтезе.

5) Логический синтез в этом случае это – представление вектора в данном базисе. Процесс линейного логического синтеза, как известно, состоит в получении коэффициентов разложения синтезируемой функции по выбранному базису. Для получения этих коэффициентов вектор-строка значений реализуемой функции скалярно умножается на вектор-столбцы обратной базисной матрицы. Представление логической функции в данном базисе записывается в виде алгебраической суммы взвешенных полученными коэффициентами векторов базиса. Средством упрощения полученного выражения может быть его факторизация (приведение подобных членов и применение допустимых преобразований выражений, построенных на основе используемых операций).

Выбор базиса определяется:

- математически – требованием линейной независимости векторов базиса;
- технологически – простотой реализации и логической мощностью (минимальным количеством базисных векторов в представлении реализуемой

логической функции) при синтезе заданных логических функций.

В приведенной ниже таблице 1 показаны представления наиболее применяемых логических операций в двузначной и трехзначной логиках.

Таблица 1 – Линейные представления логических функций [Linear representations of logical functions]

таблица 1. Линейные представления логических функций [Linear Representations of Logical Functions]			
Булева алгебра	Линейная алгебра		
Двузначная логика			
$\&, \vee, -$	$x_1 \dot{-} x_2$	$ x_1 \dot{-} x_2 $	$x_1 > x_2$
$\&(x_1, x_2)$	$(x_1 + x_2) \dot{-} 1$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 - x_1 \dot{-} x_2)$	$(x_1 + x_2) > 1$
$\vee(x_1, x_2)$	$1 \dot{-} [1 \dot{-} (x_1 + x_2)]$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 + x_1 \dot{-} x_2)$	$(x_1 + x_2) > 0$
$\bar{x}$	$1 \dot{-} x$	$ 1 \dot{-} x $	$1 > x$
$\oplus(x_1, x_2)$	$x_1 + x_2 - 2[(x_1 + x_2) \dot{-} 1]$	$ x_1 - x_2 $	$(x_1 > x_2) + (x_2 > x_1)$
Многозначная (трехзначная) логика			
$\min(x_1, x_2)$	$x_1 - (x_1 \dot{-} x_2)$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 - x_1 \dot{-} x_2)$	$x_1 - (x_1 > x_2)$
$\max(x_1, x_2)$	$x_1 + (x_2 \dot{-} x_1)$	$\frac{1}{2}(x_1 + x_2 + x_1 \dot{-} x_2)$	$x_1 + (x_2 > x_1)$
$x \oplus i$	$x + i - k[1 \dot{-} (k \dot{-} (x + i))]$	-	$x + i - k[(x + i) > (k - 1)]$
$\oplus(x_1, x_2)$	$x_1 + x_2 - k[1 \dot{-} (k \dot{-} (x_1 + x_2))]$	$\frac{1}{2}(1 - x_1 - x_2 - 3 1 \dot{-} x_2 +$ $+ 3 1 \dot{-} x_1 \dot{-} x_1 \dot{-} x_2)$	$x_1 + x_2 - k[(x_1 + x_2) > (k - 1)]$

6) Использование арифметических операций для представления логических функций в линейных пространствах предполагает выбор такой формы физического сигнала-носителя, которая позволяла бы реализовать их максимально просто. Поэтому авторами предлагается использовать токовую форму представления сигналов, поскольку сложение и вычитание токов осуществляется монтажно (возможно потребуются выходной формирователь), т.е. без аппаратных затрат! При соответствующем выборе величины кванта тока их возможное количество в диапазоне напряжения питания может быть вполне достаточным для выбранной значности логики.

7) Разностное представление результата выполнения некоторой операции $f(x^{(\bar{n})}) = \varphi_1(x^{(\bar{n})}) - \varphi_1(x^{(\bar{n})})$ определяет малую зависимость его значения от действия возмущающих воздействий и, следовательно, возможность работы элементов на начальном (нелинейном!) участке выходной характеристики, т.е. в микроном режиме и строить токовые БИС с минимальным энергопотреблением. Кроме того, разностное представление является средством схемотехнического повышения устойчивости ЭКБ к внешним возмущениям (девиация питания, температура, радиационное воздействие), в конечном итоге – средством повышения надежности.

8) Схемотехническая реализация токовой формы представления сигнала состоит в представлении значений термов реализуемой логической функции величинами токов зеркал, знаков токов – направлениями токов (втекающих и вытекающих) и их последующем алгебраическом суммировании. Монтажная реализация последней операции обеспечивает уменьшение аппаратных затрат и улучшение технических и эксплуатационных характеристик элементной базы. Кроме того, токовое представление сигналов обеспечивает минимальный уровень внутренних помех.

Для физического представления сигналов в этом случае удобно использовать

кванты входящего или выходящего токов, а реализацию арифметических операций производить монтажным объединением соответствующих наборов квантов с последующим формированием выходного сигнала для последующего использования. Двухзначной функциональной элементной базой, реализующей арифметические операции, вполне достаточно для реализации значений, больших 1, причем эти реализации хорошо согласуются с их математическим представлением в виде суммы двухзначных значений.

9) Логический синтез и реализация ЦТС возможна в виде:

- многозначно-многозначном (многозначные переменные – многозначные функции, многозначный базис);
- многозначно-двухзначном (многозначные переменные – совокупность двухзначных функций, многозначный базис);
- двухзначно-двухзначном (двухзначные переменные – совокупность двухзначных функций, двухзначный базис);
- двухзначно-многозначном (двухзначные переменные – многозначные функции, двухзначный базис).

При этом все четыре вида реализуются единообразно: представление реализуемой функции вектором (набором векторов), выбор базиса, получение вектора представления (набора векторов) и логического выражения (выражений) функции в данном базисе.

О логическом синтезе линейных ЦТС. Как уже было отмечено выше, логический синтез в линейной алгебре – это представление вектора значений реализуемой логической функции в заданном базисе линейного пространства. Приведем процесс и результаты линейного логического синтеза функций основной функционально полной системы при использовании различных наборов операций, приведенных выше. Они (процесс и результаты) не зависят от значности.

В двухзначной линейной логике булев логический синтез с использованием функционально полной «штриха Шеффера» может быть описан как синтез в базисе:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_1 x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Представления операций основной функционально полной системы в этом базисе имеют вид:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= x_1 x_2; \\ \max(x_1, x_2) &= x_1 + x_2 - \min(x_1, x_2); \\ x \oplus i &= 1 - x. \end{aligned}$$

Многозначные базисы с аналогичными свойствами могут быть построены как обобщения соответствующих двухзначных базисов. Ниже приведен один из таких возможных трехзначных базисов, построенный на основе «традиционного» обобщения булевых операций, с помощью которого можно получить представления любой трехзначной логической функции в линейно-многозначной форме.

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1^1 \\ x_1^2 \\ x_2^1 \\ \min(x_2^1, x_1^1) \\ \min(2x_2^1, x_1^1) \\ x_2^2 \\ \min(x_2^2, 2x_1^1) \\ \min(x_2^2, x_1^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

где $x_i^j = \min(x_i, j)$, с обратной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Трехзначные обобщения базовых двуместных операций в этом базисе имеют вид:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \min(x_1^2, x_2^2), \\ \max(x_1, x_2) &= x_1^2 + x_2^2 - \min(x_1^2, x_2^2). \end{aligned}$$

Представление операции $x \oplus i$ получим с помощью базиса одной переменной:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix},$$

с обратной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} x \oplus 1 &= 1 + 3x^1 - 2x^2; \\ x \oplus 2 &= 2 - 3x^1 + x^2. \end{aligned}$$

Как видно из последних выражений здесь использованы только «традиционная» логическая операция $\min(x_1, x_2)$ и операции линейного пространства.

Многозначно-двузначные представления базовых функций получаются разложением по данному базису двузначных разложений векторов функций. В таблице 2 приведены таблица истинности функции $\min(x_1, x_2)$, а также двузначные разложения базисных векторов и вектора функции.

Таблица 2 – Таблица истинности операции $\min(x_1, x_2)$ при унитарном кодировании [Truth table of operation $\min(x_1, x_2)$ with unitary coding]

x_2	x_1	$\min(x_1, x_2)$	x_{22}	x_{21}	x_{12}	x_{11}	φ_2	φ_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	2	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	1	0	1
1	2	1	0	1	1	1	0	1
2	0	0	1	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	1	0	1
2	2	2	1	1	1	1	1	1

Приведенный выше базис обеспечивает представление функции $\min(x_1, x_2)$ в виде $y = \varphi_1 + \varphi_2$, где:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \min(x_1^1, x_2^1) - \min(2x_1^1, x_2^1) + \min(x_1^2, x_2^2), \\ \varphi_2 &= \min(x_1^2, x_2^2) - \min(2x_1^1, x_2^2).\end{aligned}$$

Аналогичным образом получаются представления функций $\max(x_1, x_2)$:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= x_1^1 + x_2^1 - \min(x_1^1, x_2^1), \\ \varphi_2 &= x_1^2 - x_1^1 + x_2^2 - x_2^1 + \min(x_1^1, x_2^1) - \min(x_1^2, x_2^2).\end{aligned}$$

и $x \oplus i$

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= 1 + x^1 - x^2, \\ \varphi_2 &= 2x^1 - x^2.\end{aligned}$$

В силу открытости множества-носителя (множество натуральных чисел $\mathbb{N}$) здесь появляются новые возможности преобразования представлений функций. В «стандартном» варианте линейное пространство рассматривается как замкнутая структура. Это предполагает общий диапазон значности для всех векторов линейного пространства заданной размерности. И если в теории представление векторов с диапазоном значности, отличным от заданного, не является чем-то необычным, то в данном прикладном случае представление векторов функций с диапазоном значности, отличным заданного, является моделью получения представления функции одной значности от переменных другой значности, преобразования, отсутствующего в булевой алгебре!

Для получения двузначных представлений многозначных функций можно использовать базисы, элементами которых являются разложения многозначных переменных и применения к ним двузначных разложений многозначных функций. Таким двузначным аналогом для использованного выше базиса является базис:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{21} \\ \&(x_{11}, x_{12}) \\ \&(x_{12}, x_{12}) \\ x_{22} \\ \&(x_{11}, x_{22}) \\ \&(x_{12}, x_{22}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

с обратной базисной матрицей:

$$A^{(-1)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где базисные векторы $x_{11} - x_{22}$ являются унитарным разложением многозначных переменных x_1 и x_2 .

С помощью этого базиса получаем представление в виде простой суммы двужначных функций $\min(x_1, x_2)$ и $\max(x_1, x_2)$:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \varphi_1 + \varphi_2 = \underbrace{x_{11}x_{21}}_{\varphi_1} + \underbrace{x_{12}x_{22}}_{\varphi_2}, \\ \max(x_1, x_2) &= \max(x_1, x_2) = \varphi_1 + \varphi_2 = \underbrace{x_{11} \vee x_{21}}_{\varphi_1} + \underbrace{x_{12} \vee x_{22}}_{\varphi_2}, \end{aligned}$$

и циклического сдвига $x \oplus 1$:

$$x \oplus 1 = \underbrace{\bar{x}_2}_{\varphi_1} + \underbrace{x_1 \bar{x}_2}_{\varphi_2}.$$

Точно также с помощью последнего базиса можно получить двужначное представление исходных представлений функций.

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \min(x_{11}, x_{21}) + \min(x_{12}, x_{22}), \\ \max(x_1, x_2) &= x_{11} + x_{21} + x_{12} + x_{22} - \min(x_1^1, x_2^1) - \min(x_1^2, x_2^2), \\ x \oplus 1 &= 1 + x_1 - 2x_2. \end{aligned}$$

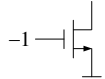
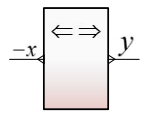
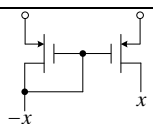
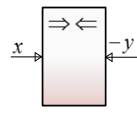
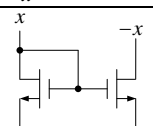
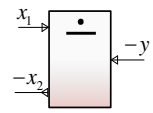
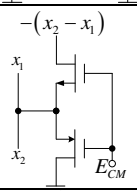
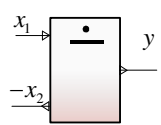
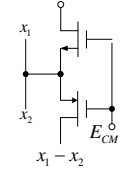
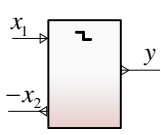
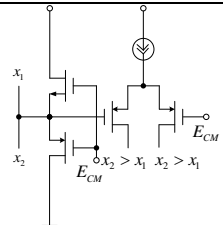
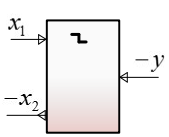
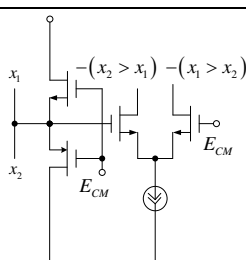
Таким образом, получены выражения базовых трехзначных функций со всеми возможными сочетаниями значностей функций и переменных в линейной логике-аналоге «традиционной» логики. Аналогичным образом могут быть получены выражения базовых и производных логических функций при использовании других арифметико-логических операций и их комбинаций.

О схмотехническом проектировании линейных ЦТС. В «традиционном» схмотехническом проектировании заложена идея формирования некоторого универсального для данной технологии функционального элемента («инвертора») и последующего использования его для построения БИС любой сложности. Такой подход является логичным, поскольку обеспечивает простоту топологического проектирования и выполнения геометрических, тепловых и т.д. расчетов БИС. С этой точки зрения полезно посмотреть достоинства линейного подхода к проектированию БИС. Рассмотрим их применительно к операциям, приведенным выше и их различным комбинациям.

Анализ представлений логических функций привел к выделению базовых математических (а, следовательно, и структурных, и схмотехнических) конструкций, используемых затем для описания (и построения) линейных логических схем.

Основные из этих конструкций и соответствующие им схемотехнические решения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Базовые компоненты линейных логических схем [Basic linear logic components]

Математическая конструкция	Схемотехническое решение
	
	
	
	
	
	
	
	

С помощью этих базовых конструкций мы будем формировать далее линейные, соответствующие им, схемотехнические реализации логических элементов. Для приведенных далее принципиальных схем можно предложить дуальные по направлению токов схемные решения.

Операция усечённая разность $\div$. Основной компонент схемы – аналоговый сумматор, к выходам которого подключены буферные схемы – токовые инверторы. При отсутствии необходимости использования внутри цифровой схемы один из токовых инверторов может быть исключен. Схема, реализующая операцию *усечённой разности* $\div$, приведена на рисунке 1.

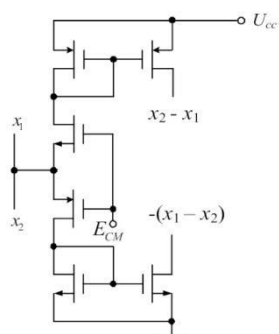


Рисунок 1 – Схемотехническая реализация операции *усечённой разности* $\div$ [Circuit implementation of the truncated difference operation $\div$]

Операция модуль разности $|-|$. Основной компонент схемы – сумматор по модулю, к выходу которого подключена буферная схема – токовый инвертор. Схема, реализующая операцию *модуль разности* $|-|$, приведена на рисунке 2.

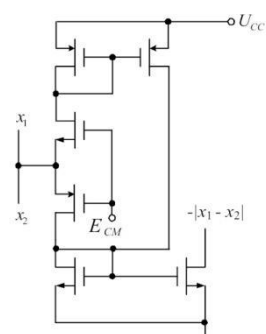


Рисунок 2 – Схемотехническая реализация операции *модуль разности* $|-|$ [Circuit implementation of the difference module operation $|-|$]

Операция сравнение $>$. Основной компонент схемы – компаратор, сравнивающий входные токи. Отличительная особенность компаратора – парафазный выход, увеличивающий его функциональные возможности. При необходимости на один или оба выхода могут быть подключены буферные схемы – токовые инверторы. Схема, реализующая операцию *сравнение* $>$, приведена на рисунке 3.

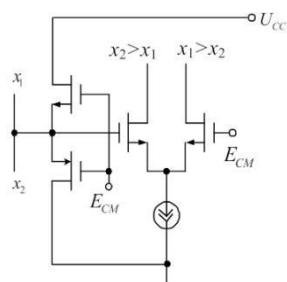


Рисунок 3 – Схемотехническая реализация операции *сравнение* $>$ [Circuit implementation of the operation comparison $>$]

Комбинация операций усеченная разность $(\div)$ и *сравнение* $(>)$. Компоненты схемы, реализующие входящие в комбинацию операции, подключены к общим входным сигналам аналогового сумматора и компаратора (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение). Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента.

Схема, реализующая операции усеченная разность $\div$, сравнение $>$, приведена на рисунке 4.

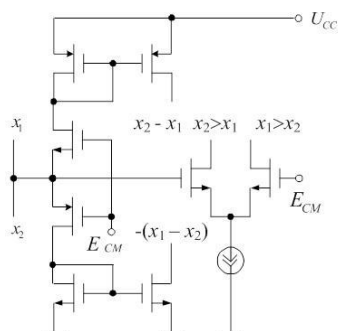


Рисунок 4 – Схемотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$, comparison $>$]

Комбинация операций усеченная разность $\div$ и модуль разности $|-|$. Верхний токовый инвертор выполняет две функции: выдает разностный сигнал на выход схемы и участвует в реализации операции модуля разности $|-|$. Реакция на входные сигналы – чисто токовая. Схема, реализующая операции усеченная разность $\div$, модуль разности $|-|$ приведена на рисунке 5.

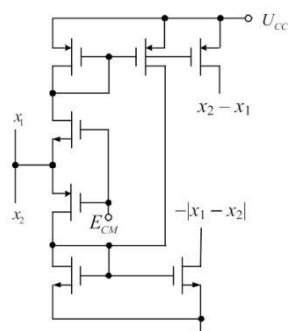


Рисунок 5 – Схемотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$ и модуль разности $|-|$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$ and modulus of difference $|-|$]

Комбинация операций сравнение $>$ и модуль разности $|-|$. Компоненты схемы, реализующие входящие в комбинацию операции, подключены к общим входным сигналам (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение). Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента. Схема, реализующая операции сравнение $>$ и модуль разности $|-|$, приведена на рисунке 6.

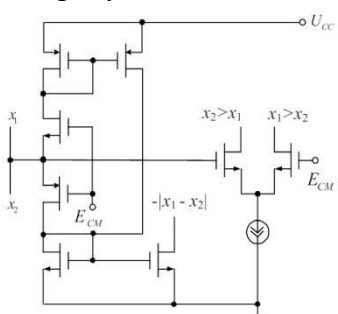


Рисунок 6 – Практическая реализация комбинации операций сравнение $>$ и модуль разности $|-|$ [Practical implementation of the combination of operations comparison $>$ and modulus of difference $|-|$]

Комбинация операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$. Компоненты схемы, реализующие операции усеченная разность $\div$ и сравнение $>$, входящие в комбинацию, подключены к общим входным сигналам (это допустимо, поскольку управляющим сигналом является напряжение), а реализация разности входных сигналов усеченная разность $\div$ является токовой. Дополнительные логические функции могут быть реализованы организацией связей между сигналами внутри элемента. Схема, реализующая комбинацию операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$, приведена на рисунке 7.

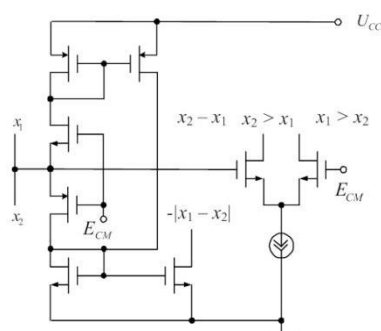


Рисунок 7 – Схемотехническая реализация комбинации операций усеченная разность $\div$, сравнение $>$, модуль разности $|-|$ [Circuit implementation of a combination of operations truncated difference $\div$, comparison $>$, modulus of difference $|-|$]

С использованием приведенных схемных реализаций операций можно строить логические элементы и схемы. Например, для элемента «И» основной функционально полной системы получены схемотехнические решения, приведенные на рисунках 8 и 9.

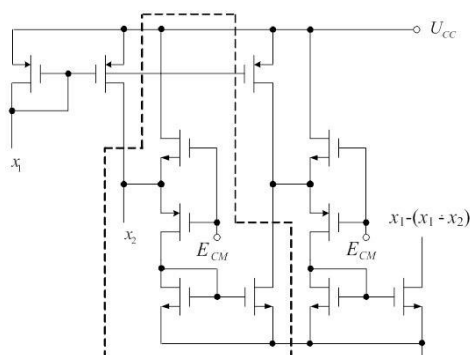


Рисунок 8 – Логический элемент «И» в базе усеченной разности $\div$ [The logical element "AND" in the basis of the truncated difference $\div$]

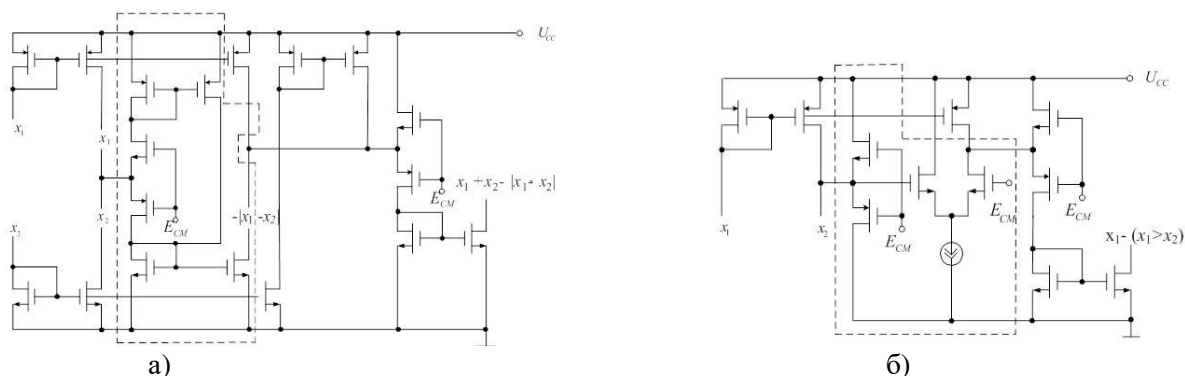


Рисунок 9 – Логический элемент «И» в базисах модуля разности $|-|$ (а) и сравнения $>$ (б) [The logical element "AND" in the bases of the modulus of the difference $|-|$ (a) and comparison $>$ (b)]

На приведенных схемах базовые функциональные элементы выделены пунктирной линией. Все, что находится за пределами функциональных элементов – это дополнительное оборудование, необходимое для обеспечения его успешного функционирования. Как видно из рисунков, оно может составлять значительную часть схемы, однако может быть «спрятано» в предыдущей или последующей схемотехнике.

Как показывает анализ, схемотехнические решения на основе комбинаций операций (рис. 4-7) отличаются лишь тем, что часть дополнительного оборудования, обеспечивающего реализацию заданной логической функции, оказывается внутри схемы элемента.

Выводы. Приведенный вариант базовой концепции логического синтеза и схемотехнического проектирования ТЦС является более полным, качественно определяющим различные аспекты процесса создания ТЦС на основе математического аппарата линейной алгебры.

Структурно двузначные ЦТС оказываются часто сравнимыми по сложности с булевыми. Однако неоспоримым преимуществом ЦТС является возможность создания на их основе элементов многозначной логики, сложность которых сравнивать не с чем.

Технические, технологические и эксплуатационные преимущества ЦТС определяют их право на существование, в том числе, в задачах автоматического управления и спецвычислителей для ядерных энергетических объектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев, В. Системы автоматического управления и контроля для атомных электростанций [Текст] / В. Дунаев, Е. Медведовский // Control Engineering. – № 3 (45). – 2013. – С. 22-31.
2. Хохлов, С.В. Перспективы развития отечественной радиоэлектронной промышленности [Текст] / С.В. Хохлов // Радиопромышленность. – 2014. – Вып. 4. – С. 9-18.
3. Красников, Г.Я. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше [Текст] / Г.Я. Красников, О.М. Орлов // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 7-8. – С. 124-128.
4. Бумагин, А. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства [Текст] / А. Бумагин // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – Вып. 1. – С. 50-56.
5. Wang, Z. Current-Mode CMOS Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing: A Tutorial. Analog Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing. 1. 1991. P. 287-295.
6. Wayne, K. Current-Mode CMOS Multiple-Valued Logic Circuits. IEEE. Journal of Solid-State. V.29. No 2. February 1994. P. 95-107.
7. Turgay, T. Implementation of Multi-Valued Logic Gates Using Full Current-Mode CMOS Circuits / T. Turgay, A. Morgul. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing, May 2004, Volume 39, Issue 2, P. 191–204.
8. Chang, Y.-H. The design of current mode CMOS multiple-valued circuits / Y.-H. Chang, J. Butler // Proceedings of 21st International Symposium on 'Multiple-Valued Logic, Victoria, 1991, pp. 130-138. DOI: 10.1109/ISMVL.1991.130718.
9. Дворников, О.В. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах [Текст] / О.В. Дворников, Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова // Труды СПИИРАН, 2016, 2(45). – С. 157-171.
10. Малашевич, Д.Б. Недвоичные системы в вычислительной технике [Текст] / Д.Б. Малашевич // Юбилейная Международная научно-техническая конференция «50 лет модулярной арифметике». – Зеленоград, 23-25 нояб., 2005. – С. 599-613.
11. Chernov, N.I. Basic Concept of Linear Synthesis of Multi-Valued Digital Structures in Linear Spaces / V.Ya. Yugai, N.N. Prokopenko, N.V. Butyrugin // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia. September 27-30. 2013. Kharkov National University of Radioelectronics. P. 146-149.

12. Андреев, А.С. Возможности преодоления барьера межсоединений в микроэлектронике [Текст] / А.С. Андреев, А.А. Шука // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 10 – С. 3-19.
13. Адамов, Ю.Ф. Проектирование систем на кристалле [Текст] / Ю.Ф. Адамов, Л.Ю. Шишина // Моск. гос. ин-т электрон. техники (техн. ун-т). – Москва : МИЭТ. – 2005. – 163 с.
14. Немудров, В. Системы-на-кристалле. / В. Немудров, Г. Мартин // Проектирование и развитие. – Москва : Техносфера, 2004. – 216 с.
15. Бухтеев, А.В. «Методы и средства проектирования систем на кристалле» / А.В. Бухтеев // Chip news, 2003. – №4, С. 4 – 14.
16. Prokopenko, N.N. Logic functions representation and synthesis of k-valued digital circuits in linear algebra / N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai, P.S. Budyakov // 2016. 24th Telecommunications Forum (TELFOR 2016). Belgrade, Serbia. 22-23 November, 2016. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818892.
17. Prokopenko, N.N. The Element Base of the Multivalued Threshold Logic for the Automation and Control Digital Devices / N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai, N.V. Butyrlagin // on International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2017, Astana, Kazakhstan. 29-30 June, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998508.

REFERENCES

- [1] Dunaev V., Medvedovskij E. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya dlya atomnyh ehlektrostantsij [Automatic Control and Monitoring Systems For Nuclear Power Plants]. Control Engineering. Vol. 3 (45). 2013. pp. 22-31 (in Russian).
- [2] Hohlov C.V., Perspektivy razvitiya otechestvennoj radioehlektronnoj promyshlennosti [Prospects for the Development of the Domestic Electronics Industry]. Radio industry. 2014. Vol. 4, pp. 9-18.
- [3] Krasnikov G.Ya., Orlov O.M. Otlichitel'nye osobennosti i problemy KMOP-tehnologii pri umen'shenii proektnoj normy do urovnya 0,18 mkm i men'she [Distinctive Features and Problems of CMOS Technology with a Decrease in the Design Standard to a Level of 0.18 Microns and Less]. «Russian nanotechnology». 2008. Vol. 3. No. 7-8, pp. 124-128 (in Russian).
- [4] Bumagin A., Gulin Yu., Zavodskov S., Krivyakin V., Rutkevich A., Steshenko V., Suhorukov A., Shishkin O. Specializirovannyye SBIS dlya kosmicheskikh primenenij: problemy razrabotki i proizvodstva [Specialized VLSI for Space Applications: Problems of Development and Production]. ELECTRONICS: Science. Technology. Business. Vol. 1. 2010, pp. 50-56 (in Russian).
- [5] Wang Z. Current-Mode CMOS Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing: A Tutorial. Analog Integrated Circuits for Analog Computation and Signal Processing, 1. 1991. P. 287-295.
- [6] Wayne K. Current-Mode Multiple-Valued Logic Circuits. IEEE. Journal of Solid-State. V.29. No 2, February 1994, P. 95-107.
- [7] Turgay T., Morgul A. Implementation of Multi-Valued Logic Gates Using Full Current-Mode CMOS Circuits. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. May 2004. Volume 39. Issue 2. P. 191-204.
- [8] Chang Y.-H., Butler J. The design of current mode CMOS multiple-valued circuits. Proceedings of 21st International Symposium on 'Multiple-Valued Logic. Victoria. 1991. P. 130-138. DOI: 10.1109/ISMVL.1991.130718.
- [9] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Perspektivy primeneniya novykh mikroskhem bazovogo matrichnogo i bazovogo strukturnogo kristallov v datchikovykh sistemah [Prospects for the Application of new Microcircuits of the Basic Matrix and Basic Structural Crystals In Sensor Systems]. SPIIRAN Proceedings. Vol. 2 (45). P. 157-171 (in Russian).
- [10] Malashevich D.B., Nedvoichnye sistemy v vychislitel'noj tekhnike [Non-Binary Systems in Computing]. Yubilejnaya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «50 let modularnoj arifmetike» [Anniversary International Scientific and Technical Conference «50 Years of Modular Arithmetic»]. Zelenograd. 23-25 November. 2005. P. 599-613 (in Russian).
- [11] 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). Rostov-on-Don. Russia. September 27-30. 2013. Kharkov National University of Radioelectronics. P. 146-149.
- [12] Andreev A.S., Shuka A.A. Vozmozhnosti preodoleniya bar'era mezhsoedinenij v mikroehlektronike [Opportunities to Overcome the Interconnect Barrier in Microelectronics]. Zarubezhnaya radioelektronika [Foreign Radio Electronics]. 1986. No.10. P. 3-19 (in Russian).

- [13] Adamov Yu.F., Shishina L.Yu. *Proektirovanie sistem na kristalle* [Design of Systems on a Crystal]. Mosk. gos. in-t e'lektron. tekhniki (texn. un-t). Moskva : MIE`T [Moscow State Institute of Electronic Equipment (Technical Institute). Moscow. MIET]. 2005. 163 p. (in Russian).
- [14] Nemudrov V., Nemudrov V., Martin G. *Sistemy na kristalle* [System-on-Chip]. *Proektirovanie i razvitie* Moskva : Tekhnosfera [Design and Development. Moscow: Technosphere]. 2004. 216 p. (in Russian).
- [15] Buhteev A.V., Buhteev A.V. *Metody i sredstva proektirovaniya sistem na kristalle* [Methods and Tools for Designing Systems on a Chip]. *Chip news*. 2003. No. 4. P. 4-14 (in Russian).
- [16] Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Budyakov P.S. Logic functions representation and synthesis of k-valued digital circuits in linear algebra. 2016. 24nd Telecommunications Forum (TELFOR 2016). Belgrade. Serbia. 22-23 November 2016. P. 1-4. DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818892.
- [17] Prokopenko N.N., Chernov N.I., Yugai V.Ya., Butyrlagin N.V. The Element Base of the Multivalued Threshold Logic for the Automation and Control Digital Devices. On International Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON-2017. Astana. Kazakhstan. 29-30 June. 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998508.

The Current Digital Logical Elements and IP-Modules for Problems of Automatic Control and Monitoring of Nuclear Objects

N.V. Butyrlagin^{*1}, N.I. Chernov^{*2}, N.N. Prokopenko^{*,3}, A.V. Bugakova^{*4}**

^{*} *Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 3440000*

¹*ORCID iD: 0000-0002-6363-5113*

WoS Researcher ID: B-9159-2014

Scopus Author ID: 55975353700

e-mail: nbutyrlagin@mail.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-2438-4825*

WoS Researcher ID: S-3745-2016

Scopus Author ID: 56434029200

e-mail: chernovni@yandex.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0001-9255-0015*

WoS Researcher ID: E-6820-2014

Scopus Author ID: 56543776600

e-mail: annabugakova.1992@mail.ru

^{*} *Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 3440000*

^{**} *Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)*

Sovetskaya st. 3, Zelenograd, Russia, 124681

³*ORCID iD: 0000-0001-8291-1753*

WoS Researcher ID: I-6599-2013

Scopus Author ID: 25227786700

e-mail: prokopenko@sssu.ru

Abstract – The paper considers the features of designing a special electronic component base (ECB) for automatic control systems and control of nuclear power plants. Unlike classical potential digital devices, ECB of this class is based on the properties of current logic elements (CLE). A more complete and systematic presentation of the main provisions of the CLE synthesis is given. The synthesis process of functions of the main functionally complete system using sets of logical arithmetic and logical operations is described. Directions for further research in the field of current ECB are formulated. Linear representations of logical functions of Boolean and linear algebra are discussed for two-valued and three-valued logics. The basic components of CLE are considered. The schemes that implement logical operations in various bases - “truncated difference”, “difference modulus”, “comparison” as well as their combinations are presented. The advantages of CLE compared with potential digital logic elements are shown.

Keywords: electronic component base, automatic control systems, digital current structures, logic elements, representations of logical functions, two-digit logic, three-digit logic, reliability.