

Колесников Дмитрий Васильевич – e-mail: kolesnikov.d@milandr.ru; 394056, г. Воронеж, ул. 206 стрелковой дивизии, 179; тел.: 89202199693; кафедра физики полупроводников и микроэлектроники; аспирант.

Petrov Boris Constantinovich – Voronezh State University; e-mail: edu@main.vsu.ru; 22, V. Nevskiy street, ap. 9, Voronezh, 394088, Russia; phone: +74732736590; the department of physics of semiconductors and microelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

Sukhoterin Eugene Valeriyovich – e-mail: suhoterin88@mail.ru; 50, Holzunova street, Voronezh, 394068, Russia; phone: +79616138319; the department of physics of semiconductors and microelectronics; postgraduate student.

Kolesnikov Dmitriy Vasilievich – e-mail: kolesnikov.d@milandr.ru; 394056, Voronezh, 179, 206 Strelkovoy divizii street; phone: +79202199693; the department of physics of semiconductors and microelectronics; postgraduate student.

УДК 512.64:621.37

Н.Н. Прокопенко, Н.И. Чернов, В.Я. Югай

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА БАЗИСА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ СТРУКТУР*

Рассматривается проблематика логического синтеза линейных многозначных цифровых ИС, как альтернативного традиционному подходу к логическому синтезу аналоговых ИС, основанному на различных многозначных обобщениях булевой алгебры. Рассмотрены математические, схемотехнические и технологические особенности линейного синтеза ИС. В качестве одной из основных проблем линейного синтеза рассмотрена проблема выбора базиса линейного пространства. Предложен один из возможных базисов для оптимального линейного синтеза цифровых ИС. В предложенном базисе рассмотрена реализация основных логических операций, используемых для логического синтеза цифровых структур. Показано применение этих операций в различных базисах для линейного логического элемента $\min(x_1, x_2)$. Проведено моделирование указанного логического элемента в системе MicroCap при использовании двузначных и трехзначных сигналов. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность и высокие технические характеристики схем логических элементов ИС, реализованных на основе линейного подхода, а также независимость схемотехнических решений по синтезу многозначных ИС от значности.

Многозначная логика; линейный синтез; базис линейного пространства; логический элемент.

N.N. Prokopenko, N.I. Chernov, V.Ya. Yugay

OPTIMIZATION OF THE BASIS CHOICE FOR LINEAR LOGIC SYNTHESIS OF THE DIGITAL STRUCTURES

Problems of the logic synthesis for linear multi-valued digital ICs, as an alternative to the traditional approach for logic synthesis of similar ICs based on the various multi-valued generalizations of Boolean algebra is considered. The mathematical, circuit design and technological features of the linear ICs synthesis are considered. The problem of the basis choice for the linear space as one of the main problems of the synthesis is discussed. One of the possible bases for optimal synthesis of the linear digital ICs are offered. The implementation of the basic logic operations, used for logic synthesis of digital structures, is considered by the proposed basis. Applying these operations in the different bases for the linear logic gate $\min(x_1, x_2)$ is shown. Simulations of the logical element in the MicroCap for using two-valued and triple-valued signals are performed. The

* Подготовлено в рамках Госзадания № 2014/38-2014 г. Минобрнауки РФ.

simulation results demonstrate the efficiency and high performance logic circuits ICs, implemented from a linear approach, as well as the independence of circuit designs from valuedness on the synthesis of multi-valued circuit.

Multi-valued logic; linear synthesis; basis of linear space; logic gate.

Введение. Известно [1], что технология приближается к физическим пределам уменьшения технических параметров элементов и связей в БИС. Одним из направлений улучшения параметров цифровых ИР-блоков в этих условиях является использование многозначной элементной базы.

Состояние развития многозначной логики как одного из возможных направлений создания современной элементной базы характеризуется сочетанием двух противоречивых тенденций.

Первая из этих тенденций состоит в росте объема усилий мирового сообщества ученых и специалистов на ее изучение и использование. Подтверждением тому является большой объем публикаций и проведение уже 42 международных симпозиумов по многозначной логике (*IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic*).

Вторая тенденция состоит в том, что несмотря на эти усилия, приемлемых для практического применения решений по синтезу многозначных логических структур до сих пор нет.

Анализ показывает, что традиционный математический аппарат логического синтеза многозначных цифровых структур, состоящий в обобщении булевого подхода на многозначный случай, имеет в значительной степени теоретическое значение. На его основе получены многозначные решения аналогов задач двузначных логического синтеза, таких как проблема функциональной полноты, минимизации логических функций и т.д.

В то же время проблема синтеза приемлемых схемотехнических решений многозначных логических элементов на его основе не решена. Во всяком случае многочисленные попытки последнего времени по разработке многозначной элементной базы с использованием многозначных аналогов булевой алгебры не привели к успеху. Основная причина – отсутствие природных физических элементов с более чем двумя устойчивыми состояниями для реализации элементов ИС.

Постановка задачи. Альтернативный подход к логическому синтезу многозначной цифровой элементной базы, предложенный авторами [2–5], состоит в переходе от логических (качественных) значений логических переменных к числовым (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 единственным способом – суммированием двузначных значений. Это предполагает использование арифметических операций в логическом синтезе и соответствующих средств их реализации – в схемотехнике и технологии.

2. Замена качественного представления количественным ведет к замене традиционных логических операций их арифметическими аналогами. Например, дизъюнкция заменяется минимумом $x_1 \& x_2 \rightarrow \min(x_1, x_2)$, конъюнкция – макси-

мумом $x_1 \vee x_2 \rightarrow \max(x_1, x_2)$, инверсия – циклическим сдвигом $\bar{x} \rightarrow x \oplus 1$ и т.д. Математическое представление и аппаратная реализация этих аналогов, естественно, отличаются от их логических оригиналов.

3. Увеличивается число операций, пригодных для использования в логическом синтезе, и, следовательно, количество возможных схемотехнических решений. Помимо собственно арифметических операций сложения, вычитания, умножения и деления возможно использование «логической» (усеченной) разности

$$a \div b = \begin{cases} a - b & \text{при } a \geq b, \\ 0 & \text{при } a < b, \end{cases}$$

модуля разности $|x_1 - x_2|$ и других операций и их комбинаций.

4. Математический аппарат логического синтеза уже разработан: это теория линейных пространств. Логический синтез в этом случае – это представление вектора в данном базисе. Выбор базиса определяется:

- ◆ математически – требованием линейной независимости векторов базиса; математическая реализация этих положений приводит к синтезу логических функций произвольной значности в форме векторов линейного пространства; математическое описание значения многозначного сигнала в этом случае представляется как совокупность единиц, физическое представление которых общеизвестно;
- ◆ технологически – простотой реализации и логической мощностью (минимальным количеством базисных векторов в представлении реализуемой логической функции) при синтезе заданных логических функций.

5. 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, т.е. даже без аппаратных затрат! При соответствующем выборе величины кванта тока их количество может быть вполне достаточным для выбранной значности логики.

Схемотехнической базой создания многозначных логических элементов являются хорошо известные аналоговые линейные схемы. Суммирование токов обеспечивает минимум аппаратных затрат на реализацию.

Схемотехническая реализация токовой формы представления сигнала состоит в представлении термов реализуемой логической функции токовыми зеркалами втекающих и вытекающих токов и их последующем алгебраическом суммировании. Монтажная реализация последней операции обеспечивает уменьшение аппаратных затрат и улучшение технических и эксплуатационных характеристик элементной базы.

Основные положения предложенного подхода опубликованы в [2–5]. В настоящей работе обсуждаются некоторые аспекты применения этого подхода к синтезу многозначных схем с учетом изложенных выше особенностей.

Практические возможности создания многозначной элементной базы на основе рассматриваемого подхода зависят от различных факторов, в том числе от выбора базиса (линейно независимого набора векторов), который будет использоваться для логического синтеза и последующей реализации элементной базы. Интуитивно понятно, что базис должен быть, с одной стороны, легко и просто реализуем в выбранной технологии, а с другой – обеспечивать минимальные аппаратные затраты на реализацию логической схемы в целом. Противоречивость этих требований и явилась побудительным мотивом к их обсуждению в настоящей работе.

Эти требования определяются следующими технологическими ограничениями:

- ◆ увеличение количества термов реализуемой логической функции при неизменной величине допустимого диапазона значений тока приводит к необходимости уменьшения кванта тока, что усугубляет проблему различения значения суммы токов, снижает уровень внутренней помехозащищенности, и в конечном итоге ухудшает эксплуатационные характеристики логических элементов;
- ◆ уменьшение величины кванта тока может вывести режим работы токовых зеркал за допустимые пределы, что также снижает эксплуатационные характеристики логических элементов.

Возможным способом разрешения этих противоречий является выбор и использование таких базисов линейного пространства, результат выполнения базисных операций в которых не превышал бы значности логики. Например, операцию сравнения

$$(x_1 + x_2) > 2$$

для реализации в трехзначной логике (сумма аргументов при этом может достигать 4) использовать по этим соображениям вряд ли целесообразно, более подходящей является ее реализация в форме

$$1 \div [3 \div (x_1 + x_2)],$$

при этом максимальная значность сигнала равна 3.

Как следует из приведенного примера, для реализации указанного способа разрешения противоречия ведущей операцией при формировании базисных векторов должно быть вычитание в одной из возможных форм.

Следующей важной проблемой реализации многозначной элементной базы является зависимость схемотехнической реализации базисных векторов от значности. Очевидно, что независимая от значности реализация логических операций в их арифметическом представлении уменьшает необходимую для реализации многозначных ИС номенклатуру схемотехнических решений.

Как показывает анализ, для арифметических реализаций аналогов логических схем логический синтез и схемотехническая разработка подобных схем вполне возможны. Например, для реализации операций $\min(x_1, x_2)$ и $\max(x_1, x_2)$ известны [6] следующие их представления:

$$\begin{aligned} \min(x_1, x_2) &= \frac{|x_1 + x_2| - |x_1 - x_2|}{2}, \\ \max(x_1, x_2) &= \frac{|x_1 + x_2| + |x_1 - x_2|}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

вполне пригодные для линейной реализации (в них, правда, имеет место превышение значности логики) и не зависящие от значности.

Однако реализация модульных операций без использования значности логики в общем случае вряд ли возможна. Решение задачи представления модульной операции без использования значности известно только для двузначной логики:

– в булевой алгебре

$$x_1 \oplus x_2 = x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2;$$

– в линейной алгебре

$$x_1 \oplus x_2 = x_1 + x_2 - 2x_1 x_2 = (x_1 - x_1 x) + (x_2 - x_1 x).$$

Математические представления модульных операций в форме, не зависящей от значности, с ростом значности усложняются и становятся мало пригодными для схемотехнической реализации.

Рассмотренные проблемы явились побудительным мотивом к поиску базисов с описанными выше свойствами. Среди прочих был выбран базис на основе операции логической разности. Базисные и обратные им матрицы для этого базиса значности 2–4 приведены ниже:

$-k = 2, n = 2,$

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_1 \div x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$-k = 3, n = 2,$

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

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Математические описания основных операций, необходимых для получения линейных представлений логических функций, приведены в таблице.

Операция	Представление в базисе
$x > i$	$1 \div [(i+1) \div x]$
$x_1 > x_2$	$1 \div (1 \div (x_1 \div x_2))$
$\min(x_1, x_2)$	$x_1 \div (x_1 \div x_2), x_2 \div (x_2 \div x_1)$
$\max(x_1, x_2)$	$x_1 + (x_2 \div x_1), x_2 + (x_1 \div x_2)$
$\max(x_1, x_2, x_3)$	$x_1 + (x_2 \div x_1) + [x_3 \div (x_1 + (x_2 \div x_1))]$
$x \oplus i$	$x + i - k [1 \div ((k-i) \div x)]$
$\min(x_1, x_2) \oplus i$	$[x_1 \div (x_1 \div x_2)] + i - k \{1 \div [(k-i) \div (x_1 \div (x_1 \div x_2))]\}$
$x_1 \oplus x_2$	$x_2 + x_1 - k [1 \div (k \div (x_2 + x_1))]$

Из таблицы следует, что полученные представления логических операций в данном базисе удовлетворяют поставленным требованиям и могут быть рекомендованы для практического синтеза многозначных ИС.

В качестве примера, подтверждающего влияние выбора базиса на параметры схемотехнической реализации линейных цифровых структур, ниже приведены две принципиальные схемы реализации логической функции $\min(x_1, x_2)$. На рис. 1 показана схема, реализованная в базисе на основе линейного аналога операции $\min(x_1, x_2)$ (выражение (1)), на рис. 2 – схема, реализованная на основе рассмотренного выше базиса на основе «логической» разности. Различие в объеме аппаратных затрат очевидно и весьма существенно.

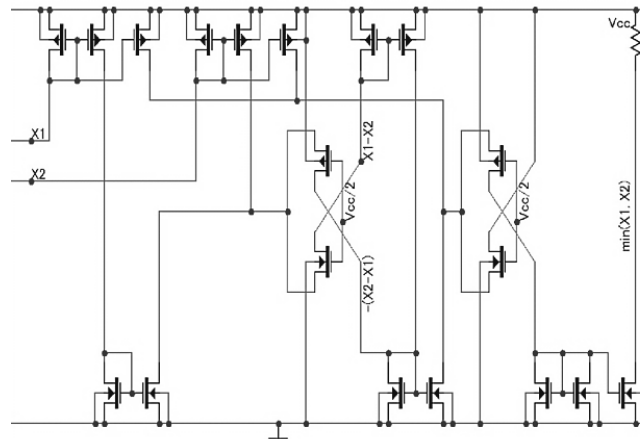


Рис. 1. Принципиальная схема логического элемента $\min(x_1, x_2)$

На рис. 3 показаны результаты моделирования схемы, приведенной на рис. 2 при использовании двух- и трехзначных входных сигналов. Результаты моделирования подтверждают независимость схемотехнической реализации от используемой значности сигналов.

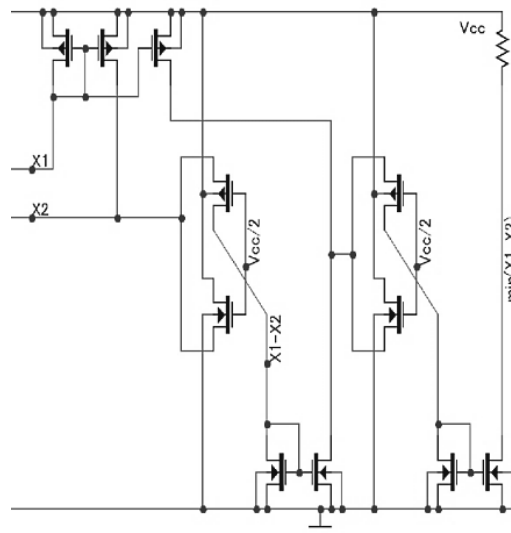


Рис. 2. Принципиальная схема логического элемента $\min(x_1, x_2)$

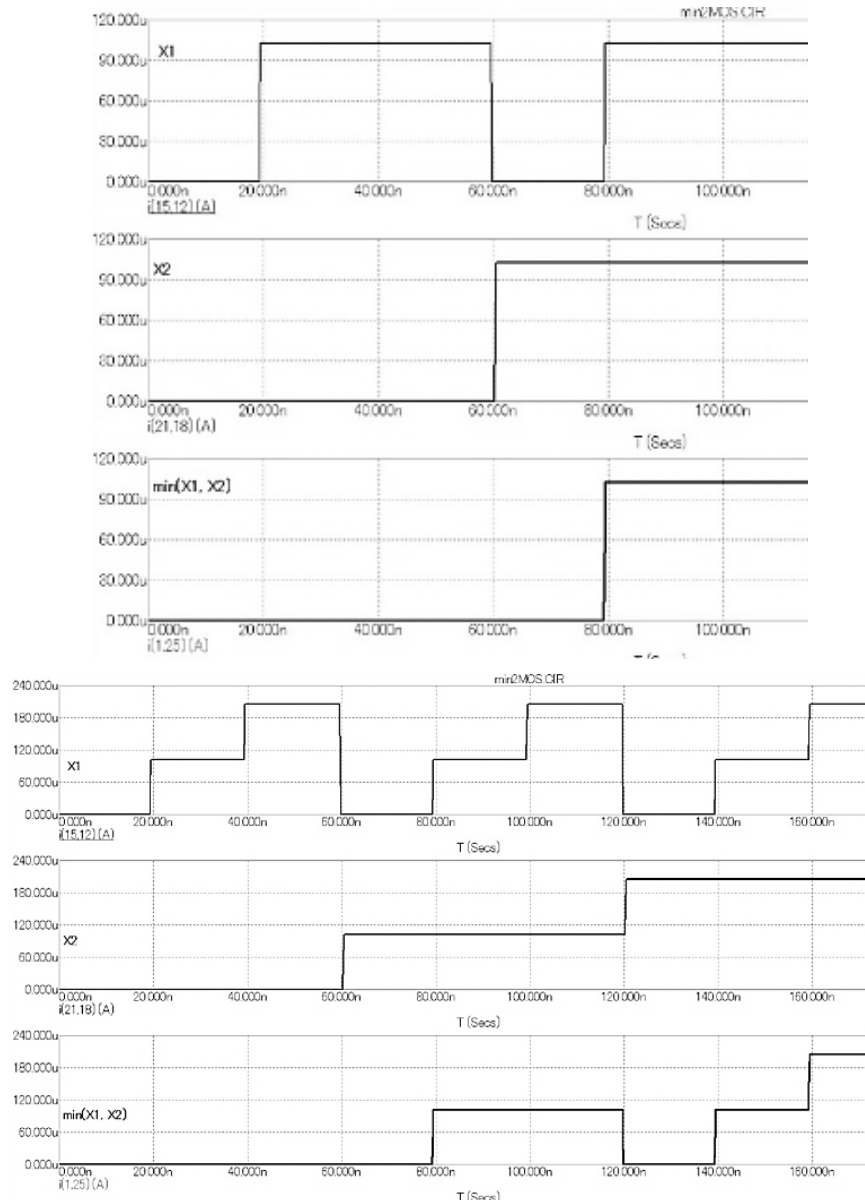


Рис. 3. Временные диаграммы работы логического элемента $\min(x_1, x_2)$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев А.С., Шука А.А. Возможности преодоления барьера межсоединений в микроэлектронике // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 10. – С. 3-19.
2. Чернов Н.И., Югай В.Я. Неклассический синтез цифровых структур средствами аналоговой схемотехники // Материалы IX Международного научно-практического семинара «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». (Шахты, 1–3 ноября 2012 г.). – Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2012.
3. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. Линейный логический синтез двузначных цифровых структур в линейных пространствах // Конгресс «IS&IT'13». «Интеллектуальные системы'13», «Интеллектуальные САПР-2013»: Труды конференций. – М.: Физматлит, 2013. – Т. 1. – С. 278-283

4. Прокопенко Н.Н., Чернов Н.И., Югай В.Я. Базовая концепция линейного синтеза многозначных цифровых структур в линейных пространствах // Конгресс «IS&IT'13». «Интеллектуальные системы'13», «Интеллектуальные САПР-2013»: Труды конференций. – М.: Физматлит, 2013. – Т. 1. – С. 284-289.
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), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Kharkov National University of Radioelectronics. – P. 146-149.
6. Гинзбург С.А. Логический метод синтеза функциональных преобразователей // Труды 1-го конгресса ИФАК. Технические средства автоматизации. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм

Прокопенко Николай Николаевич – Шахтинский филиал ДГТУ; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Шахты, ул. Шевченко, 152; тел.: 89185182266, зам. директора по научной работе.

Чернов Николай Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: chernovni@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89198883412; кафедра систем автоматического управления; профессор.

Югай Владислав Яковлевич – e-mail: yugtag@gmail.com; тел.: 89054302206; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Shaktinsky subsidiary DSTU; e-mail: prokopenko@sssu.ru; 152, Shevchenko street, Shakty, Russia; phone: +79185182266; deputy director for science.

Chernov Nikolay Ivanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: chernovni@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79198883412; the department of automatic control systems; professor.

Yugay Vladislav Yakovlevich – e-mail: yugtag@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79054302206; the department of automatic control systems; associate professor.

УДК 621.372.54

В.В. Христич

КОМПЛЕКСНЫЙ КВАДРАТУРНЫЙ ФИЛЬТР

Дано математическое описание комплексного квадратурного фильтра (ККФ), у которого за счет межканальных связей реализуется сдвиг между центральной частотой и частотой модуляции. Показано, что величина и знак частотного сдвига определяется значениями коэффициентов связи между одноименными звеньями фильтров нижних частот (ФНЧ) разных каналов. Наличие регулируемого частотного сдвига расширяет возможности квадратурного фильтра и способствует повышению точности обработки сигналов. Предложена схемотехническая реализация канальных фильтров нижних частот в виде квазилестничной структуры, звеньями которой являются многовыходовые интеграторы с дифференциальным выходом, что позволяет иметь идентичные схемы каналов при разных знаках коэффициентов межканальных связей. Даны соотношения, на основании которых по заданным требованиям к амплитудно-частотной характеристике ККФ можно выполнить расчет канальных ФНЧ. Приведены результаты экспериментального исследования ККФ, которые проводились с использованием прикладной программы Micro-Cap. Исследования подтвердили адекватность представленного математического описания ККФ.

Квадратурный фильтр; канальный фильтр; частота модуляции; частотный сдвиг; функция передачи; амплитудно-частотная характеристика.