

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ИС:

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ

(теоретическое обоснование)

Трудно переоценить значение перепрограммируемых логических интегральных схем (ПЛИС) при синтезе логических систем. Комплексное развитие элементной базы и систем автоматизированного проектирования позволяет реализовывать сложные логические системы в невиданно короткие сроки и с минимальными материальными затратами. Поэтому вполне объяснимо стремление добиться подобных результатов в области проектирования и производства аналоговых систем. Однако множество принятых в этом направлении попыток пока не принесли ожидаемых результатов, а программируемые аналоговые ИС (ПАИС) и матричные аналоговые БИС (МАБИС) так и не стали универсальными.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ

АНАЛОГОВЫХ БИС

Стремительный прогресс в области проектирования логических систем на ПЛИС был предопределен тем, что все логические системы основываются на четко проработанном математическом аппарате алгебры Буля. Эта теория позволяет доказать, что построение произвольной логической функции возможно путем упорядоченной композиции лишь одного элементарного оператора – логического И-НЕ (или ИЛИ-НЕ). То есть любую строго логическую систему можно проектировать из элементов всего одного типа, например И-НЕ.

Совсем иная ситуация в области проектирования (синтеза) и анализа (декомпозиции) принципиальных схем аналоговых систем. В аналоговой электронике до сих пор нет единого общепризнанного математического аппарата, который позволил бы решать задачи анализа и синтеза с единых методологических позиций. Причины этого явления следует искать в истории развития аналоговой электроники.

На ранних этапах схемотехника аналоговых устройств развивалась в соответствии с концепциями функционально-узловой метода, основной идеей которого было деление сложных принципиальных схем на узлы. Узел состоит из группы элементов и выполняет вполне определенную функцию. При объединении узлы образуют блоки, платы, шкафы, механизмы – т.е. какие-то единые конструкции, которые называют устройствами. Объединение устройств образует систему. Функционально-узловой метод предполагал, что элементарными составляющими систем должны быть узлы, основная задача которых – выполнение вполне определенной функции.

Г.Мишин

Именно поэтому за критерий классификации узлов была принята функциональность, то есть факт выполнения узлом какой-то функции. Однако по мере развития электроники выделенных и обособленных функций (следовательно – и узлов) оказалось чрезвычайно много. Исчезла всякая возможность их минимизации и унификации, что необходимо для синтеза сложных систем. Именно поэтому тормозилось и продолжает тормозиться развитие матричных аналоговых БИС (МАБИС) и перепрограммируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС).

Состояние дел в области программируемых аналоговых схем можно проследить, анализируя разработки ведущих российских и иностранных компаний. Так, специалисты ОАО "НИИТТ" и завод "Ангстрем" сосредоточили усилия на разработке и производстве аналого-цифровых БМК (базовых матричных кристаллов) типа "Руль" Н5515ХТ1, Н5515ХТ101, предназначенных для систем сбора данных, контроля и управления, для медицинской техники и контрольно-измерительной аппаратуры [1].

Конструкция этих БМК включает аналоговую и цифровую матрицу. Цифровая матрица содержит 115 цифровых базовых ячеек (230 вентилях 2И-НЕ), которые расположены пятью рядами по 23 ячейки в ряд. Аналоговая матрица объединяет 18 аналоговых базовых ячеек, размещенных двумя рядами по 9 ячеек. Между рядами аналоговых ячеек располагаются два ряда конденсаторов (номиналом 17,8 пФ) и два ряда диффузионных резисторов (по 24,8 кОм). Между аналоговой и цифровой частью расположен ряд 3,2-кОм резисторов.

В БМК предусмотрено два типа аналоговых ячеек (А и Б). Ячейки типа А состоят из 12 *npr*- и четырех *pnp*-транзисторов с изолированным коллектором и 38 многоотводных диффузионных резисторов. В ячейках типа Б четыре *npr*-транзистора заменены двумя *p*-МОП-транзисторами. Периферийные ячейки типа А и Б содержат по четыре мощных *npr*-транзистора (в ячейках типа Б – с изолированным коллектором) и по два биполярных транзистора.

Цифровые базовые ячейки представлены тремя типами – из четырех *n*-МОП-транзисторов, из четырех *p*-МОП-транзисторов и из комплементарной пары биполярных транзисторов. Кроме того, на периферии кристалла расположены мощные цифровые ячейки, которые содержат по четыре мощных *n*-МОП- и *p*-МОП-транзистора, а также по два *npr*-транзистора, включенных по схеме Дарлингтона.

Для БМК разработаны библиотеки стандартных аналоговых и цифровых элементов, которые существенно облегчают и ускоряют процесс проектирования устройств на базе БМК. Эти и подобные им БМК содержат несоединенные между собой наборы элементов (ЭРЭ), из которых может быть получен ряд функциональных узлов, оговоренных в библиотеке. Основной недо-

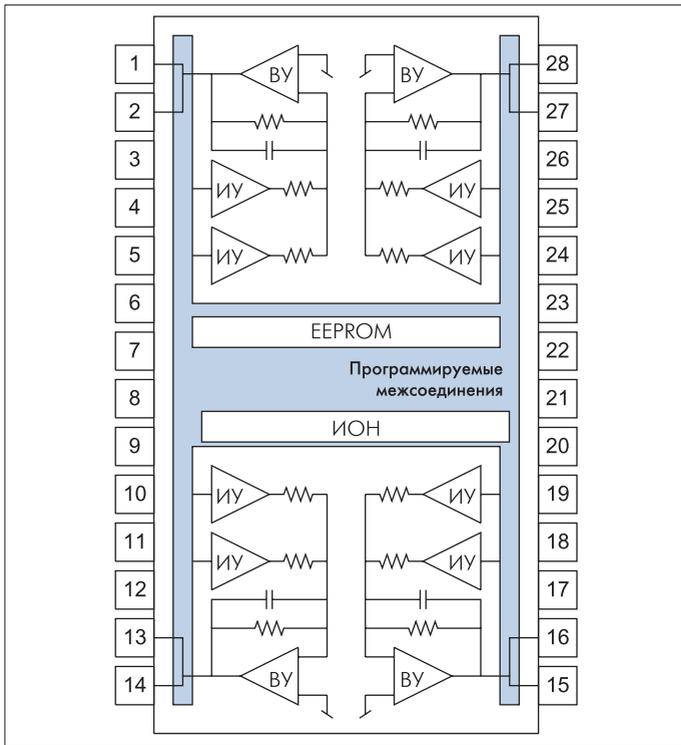


Рис.1. Структура ispPAC-10

статок таких микросхем – весьма узкая область применения, ограниченная конкретными значениями номиналов и других характеристик ЭРЭ в данном наборе. Возможности функциональных узлов, разработанных и рекомендованных для данного набора, приводятся в сопровождающей микросхему библиотеке.

С 2000 года фирма Lattice Semiconductor выпускает программируемые аналоговые интегральные схемы (ПАИС) семейства ispPAC (In-System Programmable Analog Circuit) с программированием в системе, т.е. без извлечения из печатной платы [2, 3]. К середине 2000 года производились три представителя этого семейства: ispPAC-10 (рис.1), ispPAC-20 (рис.2) и ispPAC-80. Они интегрируют до 60 активных и пассивных элементов, которые конфигурируются, моделируются и программируются с помощью пакета PAC-Designer.

ПАИС семейства ispPAC содержат:

- схемы последовательного интерфейса, регистры и элементы электрически репрограммируемой энергонезависимой памяти (EEPROM), обеспечивающие конфигурирование матрицы;
- программируемые аналоговые ячейки (PACcells) и состоящие из них программируемые аналоговые блоки (PACblocks);
- программируемые элементы для межсоединений (ARP – Analog Routing Pool).

Заложенная в эту серию архитектура основывается на базовых ячейках, содержащих: инструментальный усилитель (ИУ); выходной усилитель (ВУ), реализованный по схеме сумматора/интегратора; источник опорного напряжения 2,5 В (ИОН); 8-разрядный ЦАП с выходом по напряжению и двоясый компаратор (КП). Аналоговые входы и выходы ячеек (кроме ИОН) для повышения динамического диапазона обрабатываемых сигналов выполнены по дифференциальной схеме. Два ИУ и один ВУ образуют макроячейку, называемую PAC-блоком, в котором выходы ИУ соединены с суммирующими входами ВУ. Микросхема ispPAC-10 включает четыре PAC-блока, а ispPAC-20 – два. В состав ispPAC-20 также входят ячейки ЦАП и компараторов. В ячейке программируются коэффициент усиления ИУ в диапазоне от -10 до +10 с шагом 1, а в цепи обратной связи ВУ – величина емкости конденсатора (128 возможных значений)

и включение/выключение сопротивления.

Ряд изготовителей ИС применяют для программирования аналоговых функций технологию "переключаемых конденсаторов", предполагающую изменение емкости частотно-задающих цепей посредством электронного ключа, переключающегося по условию.

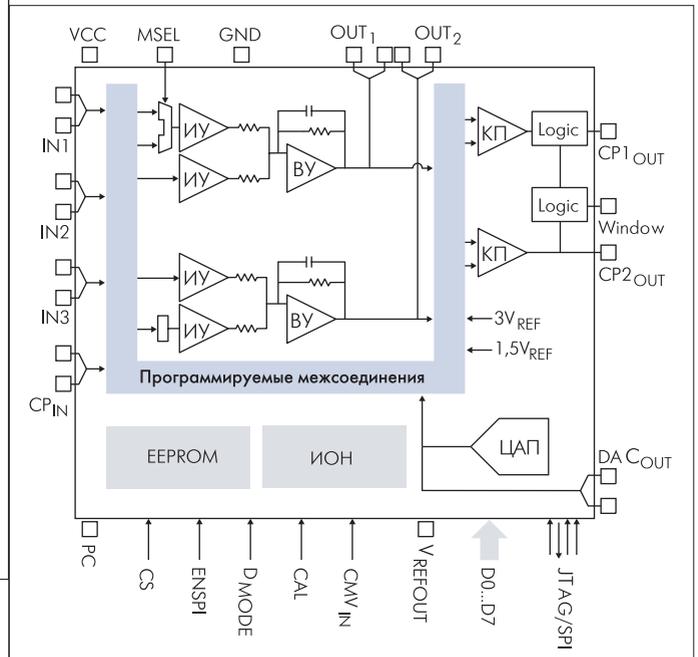


Рис.2. Структура ispPAC-20

Подход компании Lattice основан на использовании схем с постоянными во времени характеристиками, которые могут быть изменены в процессе переконфигурирования системы без выключения питания. Это улучшение существенно, так как избавляет от дополнительных обработок сигнала, необходимых в первом методе.

Средства внутренней разводки (Analog Routing Pool) позволяют соединять друг с другом входные контакты микросхемы, входы и выходы макроячеек, выход ЦАП и входы компараторов. Объединяя несколько макроячеек, можно строить схемы перестраиваемых активных фильтров в диапазоне частот от 10 до 100 кГц, основанных на использовании звена интегратора.

Следует заметить, что ispPAC фирмы Lattice в наибольшей степени приближены к ПАИС. Единственный их недостаток – отсутствует система универсальных базовых элементов, которая позволяла бы проектировать не только перестраиваемые активные фильтры, а достаточно широкое множество аналоговых систем. Именно это обстоятельство мешает ispPAC фирмы Lattice Semiconductor стать аналогом ПЛИС таких фирм, как Altera и Xilinx.

В целом, анализируя ситуацию в области разработок и практических реализаций аналоговых микросхем, можно сделать ряд обобщений:

- основная масса промышленно реализованных аналоговых микросхем по степени интеграции не может быть отнесена к БИСам;
- аналоговые БИС и БМК предназначаются для проектирования устройств определенного класса, т.е. они не универсальны;
- при проектировании больших аналоговых систем главенствующим остается функционально-узловой метод (специализированные комплекты ИС, например для телевизионных приемников).

ЕДИНЫЙ БАЗИС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛИС И МАБИС

Однако задача разработки единого схемотехнического базиса проектирования аналоговых систем все же имеет решение, что мы попробуем теоретически обосновать и показать возможные направления практической реализации изложенных идей.

Прежде всего, следует выбрать математическую модель большой аналоговой электронной системы, которая позволила бы выделить малочисленную группу базисных элементов. В области анализа и синтеза электронных схем альтернатив математическому аппарату систем линейных дифференциальных уравнений практически нет, что было признано еще в шестидесятых годах прошлого столетия [4, 5]. Отметим, однако, что идея практического массового использования данной методологии и сегодня еще не овладела умами всех специалистов.

Система дифференциальных уравнений состоит из элементов, их связей и характеризуется определенной структурой. Элементарный базис дифференциальных уравнений был исследован в первой половине прошлого века в рамках научной дисциплины “автоматика”. В данной области проявилось такое достоинство дифференциальных уравнений, как унификация: их форма не зависит от описываемой модели процесса. Однако в стандартной форме записи дифференциального уравнения нет никакой наглядной информации о характере взаимосвязей в исследуемой системе. Поэтому методы наглядного отображения структуры систем дифференциальных уравнений в виде различного рода схем разрабатывались на всем протяжении развития теории автоматического управления.

К концу 60-х годов двадцатого века вполне сложилась современная точка зрения на структурную организацию моделей динамических систем [6]. Формирование математической модели системы начинается с ее разбиения на звенья и последующего их описания – либо аналитически в виде уравнений, связывающих входные и выходные величины звена; либо графически в виде мнемосхем с характеристиками. По уравнениям или характеристикам отдельных звеньев составляются уравнения или характеристики системы в целом.

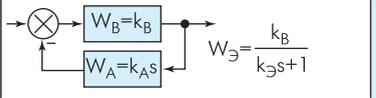
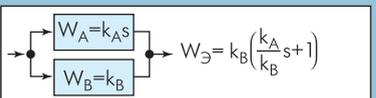
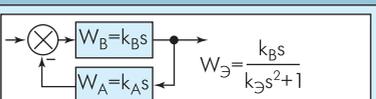
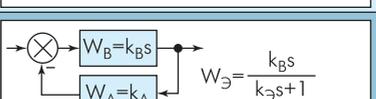
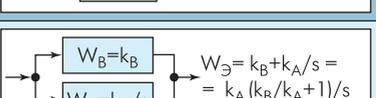
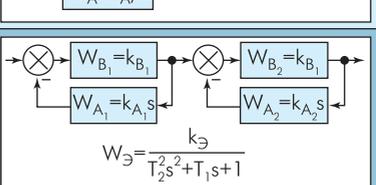
Заметим, что если для функциональной схемы система разбивается на звенья исходя из выполняемых ими функций, то для математического описания систему фрагментируют исходя из удобства получения опи-

сания. Поэтому звенья должны быть как можно более простые (мелкие). С другой стороны, при разбиении системы на звенья математическое описание каждого звена должно быть составлено без учета связей его с другими звеньями. Это возможно, если звенья обладают направленностью действия – т.е. передают воздействие только в одном направлении, с входа на выход. Тогда изменение состояния какого-либо звена не влияет на состояние предшествующего звена.

Если условие направленности действия звеньев выполнено, математическое описание всей системы можно получить в виде системы независимых уравнений отдельных звеньев, дополненных уравнениями связи между ними. Наиболее часто встречающимися (типowymi) считаются такие звенья, как апериодическое, колебательное, интегрирующее, дифференцирующее, звено постоянного запаздывания [6].

Проблема элементарных звеньев в моделях вида системы дифференциальных уравнений исследовалась рядом авторов [7–9]. Анализ показывает [10], что их позиции в основном сводятся к констатации факта существования типовых звеньев и исследования их роли в процессе образования более сложных структур. Отбор в группу типовых звеньев производится произвольно, без каких-либо критериев. В перечни типовых без объяснения и обоснования включаются разные звенья, а для обозначения типовых звеньев в равной мере используются также термины “простейшие” и “элементарные” (см. таблицу). Между тем, исследование многочисленных “типowych” звеньев динамических систем методами структурных матриц [10–12] показывает, что лишь три звена – пропорциональное, интегрирующее и дифференцирующее – в своих структурных матрицах не содержат матричных циклов. Поэтому только их можно называть элементарными. Все остальные звенья строятся путем

Звенья динамических систем, выделенные в качестве типовых

Наименование звена	Уравнение звена $y(t) = f(u(t))$	Передаточная функция $W(s) = y(s)/u(s)$	Элементарные составляющие
Пропорциональное	$y(t) = ku(t)$	$W_n(s) = k$	Нет
Интегрирующее	$dy(t)/dt = ku(t); py = ku$	$W_u(s) = k/s$	Нет
Дифференцирующее	$y(t) = k \cdot du(t)/dt; y = kpu$	$W_d(s) = ks$	Нет
Апериодическое 1-го порядка	$(Tp+1)y = ku$	$W(s) = k/(Ts+1)$	
Форсирующее 1-го порядка	$y = k(Tp+1)u$	$W(s) = k(Ts+1)$	
Интегрирующее инерционное	$p(Tp+1)y = ku$	$W(s) = k/[s(Ts+1)]$	
Дифференцирующее инерционное	$(Tp+1)y = kpu$	$W(s) = ks/(Ts+1)$	
Изодромное	$py = k(Tp+1)u$	$W(s) = k(Ts+1)/s$	
Колебательное, консервативное, апериодическое 2-го порядка	$(T^2p^2 + 2\xi Tp + 1)y = ku$	$W(s) = k/(T^2p^2 + 2\xi Tp + 1)$	



комбинации элементарных звеньев.

Так, если пропорциональное звено с передаточной функцией $W_B(s) = k_B$ и дифференцирующее звено с передаточной функцией $W_A(s) = k_A s$ соединить по схеме отрицательной обратной связи (рис.3), то эквивалентная передаточная функция

$$W_{\Sigma} = \frac{W_B}{1 \pm W_B W_A} = W_{\Sigma} = \frac{k_B}{1 + k_B k_A s} = \frac{k_B}{k_{\Sigma} s + 1}$$

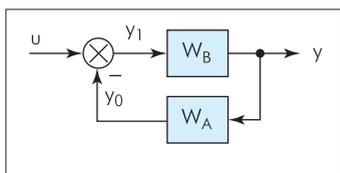


Рис.3. Эквивалентная схема аperiodического звена

обратной связью и, следовательно, оно не может считаться элементарным.

Точно так же можно построить и остальные звенья, включенные в таблицу. Особо следует остановиться на передаточной функции колебательного звена $(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)y = ku$. Так, если соединить последовательно два аperiodических звена с передаточными функциями

$$W_n(s) = \frac{k_1}{T_3 s + 1} \text{ и } W_n(s) = \frac{k_0}{T_4 s + 1}$$

отличающимися лишь постоянными времени, то эквивалентная передаточная функция примет вид

$$W_{\Sigma} = \frac{k_1}{T_3 s + 1} \cdot \frac{k_0}{T_4 s + 1} = \frac{k_{\Sigma}}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$$

Таким образом, результат с точностью до значений постоянных времени совпадает с передаточной функцией исследуемого звена. Следовательно, колебательное, консервативное и аperiodическое звенья 2-го порядка можно получить путем последовательного соединения звеньев первого порядка. Значит, они не могут считаться элементарными, хотя называть их типовыми в принципе допустимо.

Анализ результатов, приведенных в последнем столбце таблицы, позволяет сделать вывод о том, что такие звенья, как аperiodическое, изодромное, форсирующее, дифференцирующее инерционное и интегрирующее инерционное, могут быть получены соединением элементарных звеньев. Чтобы доказать, что передаточные функции и остальных типовых звеньев могут быть получены путем соединения элементарных звеньев, следовало бы проанализировать соединения по три, четыре и так далее звеньев по типовым схемам соединения. Такой же результат можно получить, если рассмотреть соединения элементарных звеньев с типовыми звеньями первого порядка. Часть такого исследования уже проделана, его результаты приведены в работе [10].

Таким образом, доказано, что посредством соединения элементарных звеньев достаточно просто получить все передаточные

функции так называемых типовых динамических звеньев. **Следовательно, произвольные динамические системы могут быть синтезированы с помощью операторов размножения и соединения всего трех элементарных звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего.** Этот вывод имеет фундаментальное значение, так как он определяет элементный базис, необходимый для построения линейных динамических систем любого порядка, в том числе – радиоэлектронных схем. И если динамические системы предполагается строить из ограниченной номенклатуры динамических звеньев, как в случае МАБИС и ПАИС, то сделанный вывод важен особенно.

Появляется возможность синтеза произвольных аналоговых устройств всего из пяти функциональных узлов – мультиплектора,

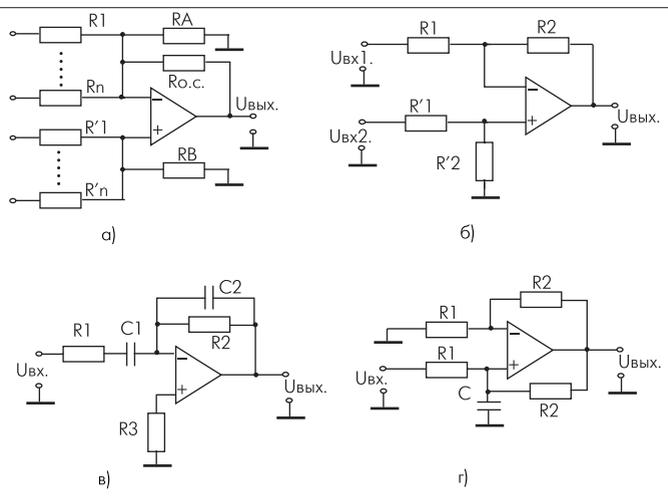


Рис.4. Простые схемные решения элементарных узлов: а) много-входовой сумматор, б) дифференциальный усилитель (пропорциональное звено), в) дифференциатор (дифференцирующее звено), г) интегратор (интегрирующее звено)

сумматора, умножителя, интегратора и дифференциатора (рис.4)! Заметим, что приведенные на рис.4 схемы не следует воспринимать как реально отработанные схемотехнические решения, а только лишь как обоснование возможности замены элементарных звеньев на функциональной схеме базовыми радиоэлектронными элементами. Заменяя элементарные звенья функциональных схем их аппаратными аналогами, можно проектировать аналоговые устройства с заданными характеристиками.

ПРИМЕР СИНТЕЗА АНАЛОГОВОГО УСТРОЙСТВА

Рассмотрим весьма простой пример синтеза принципиальной схемы аналогового устройства по модели, заданной системой дифференциальных уравнений в форме преобразований Лапласа вида:

$$x_0 = g, \quad x_1 = x_0 - 2x_2/s, \quad x_2 = 10x_1/s, \quad x_3 = x_2 - 10x_4/s, \quad x_4 = 500x_3/s.$$

Построим структурную матрицу этой системы дифференциальных уравнений и выделим стрелками матричные циклы:

По уравнениям и структурной матрице восстановим блок-схему устройства (рис.5). В соответствии со структурной матрицей

x_1	x_2	x_3	x_4	x_0
1 ↓	← $-(2/s)$			1
$10/s$ →	↑ 1			
	1	1 ↓	← $-(10/s)$	
		$500/s$ →	↑ 1	

система обладает двумя отрицательными обратными связями: узел 2 → узел 1 и узел 4 → узел 3, соответственно. Поскольку структурная схема на рис.5 изначально построена на элементарных звеньях, ее можно рассматривать как функциональную схему электронного устройства.

Из результатов моделирования (рис.6) синтезированной схемы видно, что при заданных параметрах она представляет собой два

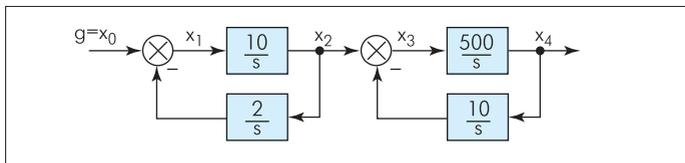


Рис.5. Структурная схема синтезируемого устройства (позатпно)

последовательно соединенных генератора. То есть весьма простое устройство, состоящее всего из четырех интегрирующих звеньев, выполняет сравнительно сложную функцию модуляции низкочастотного колебания высокочастотным.

Отметим, что при проектировании и производстве МАБИС и ПАИС совершенно не обязательно использовать аппаратные аналоги

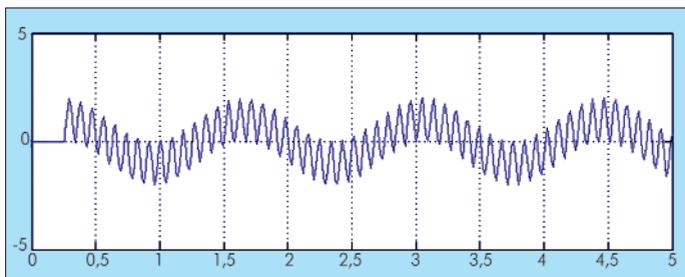


Рис.6. Осциллограмма синтезированного устройства

элементарных звеньев, выполненные на операционных усилителях, как на рис.4, хотя в этом базисе они лучше всего проработаны [13–16]. Наиболее перспективна реализация аппаратных аналогов элементарных звеньев на оптоэлектронных компонентах, хотя возможны и любые другие варианты.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МАБИС И ПАИС – ЭТО ВОЗМОЖНО

Таким образом, можно выделить пять элементарных (простейших) компонентов любой РЭА, соответствующих основным операторам систем дифференциальных уравнений: умножения, дифференцирования, интегрирования, сложения и размножения (мультиплексирования). Методика проектирования аналоговых электронных устройств предполагает [10]:

- использование в качестве исходных данных для проектирования математической модели в виде системы из n дифференциальных уравнений первого порядка (или дифференциального уравнения n -го порядка;
- построение структурной матрицы проектируемого устройства и нахождение матричных циклов;
- восстановление структурной схемы проектируемого устройства;
- преобразование структурной схемы в функциональную путем замены типовых звеньев совокупностью элементарных звеньев;

- преобразование функциональной схемы проектируемого устройства в схему электрическую принципиальную путем замены элементарных звеньев эквивалентными им аппаратными базисными элементами (возможно, применение современных САПР позволит избежать этот этап, синтезируя топологию непосредственно из функционального описания);
- разработка топологии проектируемого устройства.

Предлагаемый подход обладает рядом решающих преимуществ. Так, функциональная схема проектируемого устройства синтезируется из исходной системы дифференциальных уравнений путем стандартных матричных преобразований, которые могут быть упорядочены и преобразованы в алгоритм для автоматических вычислений. Схема электрическая принципиальная синтезируется из функциональной схемы простой заменой элементарных динамических звеньев эквивалентными им базисными элементами. Также существенно может упроститься моделирование устройства средствами САПР.

Таким образом, поскольку множество элементарных звеньев не многочисленно, появляется реальная возможность проектирования универсальных МАБИС и ПАИС. Что, в свою очередь, значительно упрощает проектирование аналоговых и цифроаналоговых устройств и открывает заманчивые перспективы дальнейшего развития электроники в целом.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Аленин С., Иванов В., Полевиков В., Трудновская Е. Реализация специализированных аналого-цифровых устройств на базе БИК МОП БМК типа H5515XT1. – ChipNews, 2000, №2.
2. Курбатов. А. Программируемые аналоговые интегральные схемы. Жизнь продолжается. – Компоненты и технологии, 2000, №2.
3. Петросянц К., Суворов А., Хрусталеv И. Программируемые аналоговые матрицы фирмы Lattice Semiconductor. – ChipNews, 2001, №1.
4. Ку Е.С., Сорер Р.А. Применение метода переменных, характеризующих состояние к анализу цепей. – ТИИЭР, 1965, №7.
5. Ильин В.Н. Машинное проектирование электронных схем. – М.: Энергия, 1972.
6. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1975.
7. Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1973.
8. Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов Б.Н. Основы теории автоматического регулирования и управления. – М.: Высшая школа, 1977.
9. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Часть 1. Теория линейных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1977.
10. Мишин Г.Т. Естественно-научные основания аналоговой микроэлектроники. – М.: МИЭМ, 2003.
11. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. – М.: Машиностроение, 1974.
12. Шатихин Л.Г. Структурные матрицы и их применение для исследования систем. – М.: Машиностроение, 1991.
13. Аналоговые интегральные схемы. /Под ред. Дж.Коннели. – М.: Мир, 1977.
14. Дж. Ленк. Электронные схемы. Практическое руководство. – М.: Мир, 1985.
15. Нестеренко Б.К. Интегральные операционные усилители. – М.: Энергоиздат, 1982.
16. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники Т.1. – М.: Мир, 1983.