

Л. П. ПАСЕКОВ

(Киев)

МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЗИСТИВНЫХ СХЕМ
ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОД — НАПРЯЖЕНИЕ

Прецизионные резистивные схемы преобразователей кода в напряжение (ПКН) выполняют одну из основных функций преобразования — весовое суммирование токов или напряжений. Естественно, что метрологические и надежность характеристики схем весового суммирования в значительной степени определяют точность и надежность работы цифровых приборов и устройств, в которые они входят в составе преобразователей напряжения в код и кода в напряжение. Поэтому основным в микроминиатюризации схем весового суммирования электрических сигналов является обеспечение высокой надежности и точности работы в тяжелых эксплуатационных условиях при одновременном снижении веса и габаритов.

Одним из перспективных направлений микроэлектроники является направление создания функциональных приборов, в которых реализация функций схемы достигается путем использования физических явлений в тонких пленках и твердом теле.

К таким функциональным приборам относятся микросхемы весового суммирования напряжений или токов, выполненные в виде тонкопленочных интегральных схем с распределенными параметрами.

Возможность весового суммирования напряжений схемой с распределенными параметрами можно проиллюстрировать следующим примером ее работы на холостом ходу. Пусть на резистивной пленке (рис. 1) размещено n входных контактных площадок из низкоомной пленки и одна выходная. Подав на i -й вход напряжение E и заземлив все остальные входы, получим выходное напряжение $U_i = p_i E$, где p_i — весовой коэффициент, с которым напряжение с i -го входа передается на выход. Так как схема линейна, то комбинации входных напряжений $a_i E$ ($a_i=0$, если i -й вход подключен к общей шине; $a_i=1$, если на i -й вход подано напряжение E) будет соответствовать выходное напряжение, равное весовой сумме входных

$$U_{\text{вых}} = E \sum_{i=0}^{n-1} a_i p_i. \quad (1)$$

Очевидно, что микросхема весового суммирования напряжений (МВС) обладает свойством автоматического нормирования весовых коэффициентов

$$\sum_{i=0}^{n-1} p_i = 1. \quad (2)$$

Целесообразно перейти к приведенным значениям выходного напряжения, численно равным коэффициенту передачи МВС:

задачу для уравнения Лапласа со свободной границей. Возможность решения задачи синтеза определяется в первую очередь возможностью решения задачи анализа такой схемы, аналитическое решение которой получить не представляется возможным.

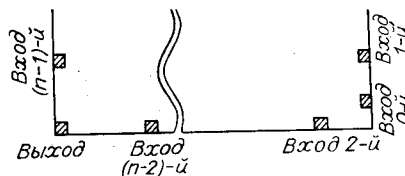


Рис. 1.

Наиболее широко распространено приближенное решение краевых задач уравнений математической физики методом сеток на ЦВМ [1]. Порядок погрешности аппроксимации уравнения Лапласа разностным определяется дифференциальными свойствами решения краевой задачи [2] и сильно зависит от вида области и заданных граничных условий. Неограниченность производных решения для областей с углами закругляет приближенное решение на равномерной квадратной сетке с шагом h и приводит к медленной сходимости со скоростью, не лучшей, чем $h^{2/3}$ в рассматриваемом случае [3].

К сожалению, ответ на вопрос об оценке погрешности метода для конкретной сеточной области еще не дан [4]. Поэтому оценка шага h сверху и на этой основе оценка объема памяти, числа операций и машинного времени решения задачи анализа МВС на ЦВМ снизу произведены с учетом известного опыта решения краевых задач для уравнений эллиптического типа [4] (табл. 1). При этом приняты: скорость выполнения операций в среднем для задачи 350 мкс; размеры МВС — 8×20 мм, контактных площадок — $0,2 \times 0,2$ мм; максимально допустимый шаг 0,1 мм, так как для получения «грубого» решения в наиболее узких местах должно быть не менее двух рядов клеток [5].

Чтобы получить точное решение, требуется несколько этапов измельчения шага h , поскольку сходимость сеточного решения медленная. А так как для построения процесса последовательных приближений решения задачи синтеза времена, указанные в табл. 1, должны быть увеличены примерно на три порядка, то решение задачи синтеза МВС на ЦВМ методом сеток представляется нецелесообразным.

Поэтому рациональным оказывается комплексный путь решения, сочетающий синтез МВС (наиболее трудоемкий этап расчета) путем физического моделирования с аналитическими методами расчета на ЦВМ. Так как погрешность синтеза МВС путем физического моделирования значительно больше допустимой, то второй этап расчета на ЦВМ должен завершить синтез МВС с высокой точностью.

Из соображений достижения большей точности решения, доступности и удобства в работе выбрано моделирование на электропроводной бумаге [6]. Многолетняя практика моделирования показала, что это наиболее пригодная среда для широкого применения [7]. При этом в каче-

стве модели тонкой резистивной пленки используется геометрически подобный пленке лист электропроводной бумаги, а в качестве моделей контактных площадок — размещаемые на бумаге металлические пластины, подобные пленочным контактным площадкам [6].

Так как величина каждого из весовых коэффициентов определяется положением всех контактных площадок, то задача моделирования МВС распадается на ряд последовательных шагов, в процессе выполнения которых измеряются весовые коэффициенты и корректируется положение каждой контактной площадки таким образом, чтобы значения весо-

Таблица 1

Показатели решения на ЦВМ	Величина шага h в мм		
	0,1	0,05	0,025
Объем памяти	$1,6 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	$2,54 \cdot 10^5$
Число операций	$2 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^8$	$1,28 \cdot 10^9$
Машинное время решения, ч	2	16	128

вых коэффициентов приближались к расчетным. Использование свойства (2) МВС позволяет получить требуемый весовой ряд коэффициентов, не перемещая контактной площадки старшего разряда. В каждом цикле приближения процесс коррекции целесообразнее всего начинать с $(n-2)$ -го разряда. При этом $(n-2)$ -й вход подключается к источнику E , а все остальные — к общей шине и корректируется положение контактной площадки $(n-2)$ -го входа. Затем $(n-3)$ -й вход подключается к источнику E , а все остальные — к общей шине и корректируется положение контактной площадки $(n-3)$ -го входа и т. д. до нулевого разряда. На этом заканчивается один цикл приближения. Все последующие циклы аналогичны первому. Процесс моделирования осваивается очень быстро.

Синтез МВС без перемещения контактной площадки $(n-1)$ -го входа позволяет найти ряд моделей с различным положением $(n-1)$ -го входа и установить качественную закономерность, связывающую величины входных токов с положением $(n-1)$ -го входа. Используя эту закономерность, можно синтезировать МВС, имеющую минимальные значения входных токов при оптимальном их распределении.

Контактные площадки удобнее всего размещать по периметру модели. Это упрощает процесс моделирования и приводит к уменьшению входных токов и ослаблению зависимости выходного напряжения по одному входу от положения контактной площадки другого входа. С целью уменьшения погрешности моделирования, определяемой неточностью выполнения и измерения размеров модели, масштаб моделирования следует брать как можно большим (например, 50:1), а модель резистивной пленки вырезать из электропроводной бумаги по точному металлическому шаблону. Моделирование становится проще и выполняется быстрее при размещении модели в специальном приспособлении, собранном по тому же шаблону, по которому вырезалась и модель. После завершения синтеза размеры полученной модели МВС измерялись контрольной линейкой типа КЛ с точностью до 0,1 мм.

Для измерения электрических характеристик моделей и образцов МВС был принят компенсационный относительный метод измерения выходного напряжения. Этот метод позволяет прямым измерением определять весовые коэффициенты схемы и полностью согласуется с математическим описанием работы МВС и ее последующим анализом.

Изготовив и испытав образцы микросхем, можно определить погрешности работы МВС. Затем по этим результатам расчетно-экспериментальным путем синтезируются МВС необходимой точности.

Если совместить начало координат с выходной контактной площадкой и считать входные контактные площадки свободными только в одном измерении (вдоль границы резистивной пленки), то $p_i = p_i(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ [6] и справедливо

$$\Delta p_i \approx \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\partial p_i}{\partial x_k} \Delta x_k, \quad (4)$$

где x_i — свободная координата контактной площадки i -го входа.

Частные производные могут быть определены приближенно путем постановки n соответствующих экспериментов

$$\frac{\partial p_i}{\partial x_k} \approx b_{ik} = \frac{p_i(x_0, x_1, \dots, x_k + \delta x_k, \dots, x_{n-1}) - p_i(x_0, x_1, \dots, x_k, \dots, x_{n-1})}{\delta x_k} M, \quad (5)$$

где M — масштаб моделирования; δx_k — изменение координаты k -й контактной площадки.

Задача определения коэффициентов b_{ik} системы уравнений (7) включается в задачу моделирования. Поэтому после снятия размеров модели для определения коэффициентов b_{ik} контактная площадка каждого из входов по очереди смещается относительно своего исходного положения на величину δx_k . Смещение можно устанавливать с помощью плоскопараллельных концевых мер длины ГОСТ 9038—59. После этого производится измерение всех весовых коэффициентов. Затем контактная площадка с помощью той же концевой меры возвращается в исходное положение. Подобный процесс повторяется по каждому из входов. После завершения всех этих экспериментов коэффициенты b_{ik} рассчитываются по формуле (5). Но погрешность весовых коэффициентов образцов МВС, синтезированных моделированием, равна разности экспериментальных и расчетных значений весовых коэффициентов

$$\Delta p_i = p_{is} - p_{ip}. \quad (6)$$

Следовательно, может быть составлена система n линейных алгебраических уравнений с n неизвестными

$$\sum_{k=0}^{n-1} b_{ik} \Delta x_k = \Delta p_i; \quad i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (7)$$

Для того чтобы существовало решение системы уравнений (7), т. е. эта система была совместной, согласно теореме Кронекера — Капелли [8], необходимо и достаточно, чтобы были одинаковы ранги матрицы коэффициентов системы (7) и ее расширенной матрицы.

Из свойства (2) и выражения (5) следует, что

$$\sum_{i=0}^{n-1} b_{ik} = 0, \quad (8)$$

а из свойства (2) и выражения (6) —

$$\sum_{i=0}^{n-1} \Delta p_i = 0. \quad (9)$$

Условия (8) и (9), являющиеся следствием только одного свойства МВС (2), позволяют доказать совместность системы уравнений (7) и установить, что ранг ее матрицы коэффициентов равен $n - 1$. Следовательно, система уравнений (7) имеет бесконечное множество решений. Для полного представления этого множества решений должно быть найдено общее решение, которое будет суммой любого решения неоднородной системы уравнений (7) и k решений соответствующей однородной системы, где k — любое действительное число.

Разработанный расчетно-экспериментальный метод синтеза МВС аналогичен приближенному решению систем нелинейных уравнений модифицированным методом Ньютона [9]. Существование решения системы уравнений (7) позволяет распространить вывод о сходимости процесса Ньютона на сходимость процесса расчетно-экспериментального синтеза МВС, если нулевое приближение (найденное путем моделирования) определено достаточно точно.

Из качественного анализа процесса последовательных приближений следует, что количество приближений будет минимальным, если b_{ik} будут определены для приращений, примерно равных требуемым изменениям координат входов. На этой основе разработана экономически выгодная процедура синтеза МВС, требующая минимального количества промежуточных образцов, которая заключается в последовательном решении систем уравнений (7) со значениями b_{ik} , определяемыми каждый раз на модели для смещений δx_k , равных корням предыдущего решения.

Исследование сходимости процесса расчетно-экспериментального синтеза МВС с учетом бесконечного множества решений системы уравнений (7) было проведено на примере МВС для ПКН на пять [6] и девять двоичных разрядов. В табл. 2 приведены погрешности весовых коэффициентов в процентах для схемы нулевого приближения $\Delta p_i^{(0)}$, которая изготовлена по топологии, определенной моделированием, а также для схем первого $\Delta p_i'$ и второго $\Delta p_i''$ приближений, которые изготовлены по топологии, скорректированной расчетно-экспериментальным путем для двух различных решений системы уравнений (7).

Таблица 2

Δp_i	Номер разряда								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta p_i^{(0)}$	-0,061	-0,098	-0,151	-0,381	-0,018	0,731	0,058	-1,331	2,711
Первое решение $\Delta p_i'$	-0,033	-0,041	0,054	-0,1	-0,085	0,005	-0,096	-0,175	0,471
$\Delta p_i''$	-0,023	-0,017	0,009	0,019	0,019	0,023	0,038	-0,059	0,003
Второе решение $\Delta p_i'$	-0,033	-0,035	-0,004	-0,116	-0,079	-0,2	-0,478	0,059	0,886
$\Delta p_i''$	-0,019	-0,018	0,002	-0,029	-0,048	0,049	0,091	-0,075	-0,051

Знание общего решения системы уравнений (7) позволяет выбрать наиболее приемлемые величины поправок в фактические значения координат контактных площадок корректируемой МВС. Условие (9), вид общего решения и знание ранга матрицы коэффициентов системы уравнений (7) позволяют вести синтез МВС моделированием более полно — дают возможность находить и сравнивать различные варианты топологии МВС по какому-либо критерию (например, входным токам). Свой-

ства (8) и (9) позволяют проверить правильность матрицы коэффициентов и столбца свободных членов, определяемых экспериментально.

Описание МВС в приращениях (7) позволяет произвести вероятностный расчет точности работы схемы. Связь характеристик ошибки выходного напряжения Δu с характеристиками ошибок в координатах контактных площадок входов устанавливается с помощью коэффициентов b_{ik} системы уравнений (7) [10].

С целью производства МВС более высокой точности, чем та, которая обеспечивается технологическим процессом, можно подстраивать МВС путем включения в цепь разрядных входов небольших добавочных сопротивлений. Работа МВС в этом случае описывается системой уравнений

$$\sum_{k=0}^{n-1} C_{ik} r_k = \Delta p_i; i = 0, 1, \dots, n-1, \text{ где } C_{ik} = \frac{\partial p_i}{R_k}$$

приращения i -го весового коэффициента, обусловленного включением последовательно в цепь питания k -го входа добавочного сопротивления величиной R_k , к величине этого сопротивления; r_k — искомые величины добавочных сопротивлений, необходимые для устранения погрешности в весовых коэффициентах МВС. Свойства коэффициентов этой системы уравнений аналогичны свойствам коэффициентов системы уравнений (7). Аналогичны также свойства матриц и решения. Все это позволяет по методике и аналогам формул [10] провести вероятностный расчет точности работы МВС в реальной схеме ее включения с учетом вероятностных характеристик ключевых схем. При этом среднее значение сопротивления «замкнутого» ключа может быть учтено при подстройке МВС и погрешность выходного напряжения будет обусловлена дисперсией этого сопротивления.

Подстройку каждого образца МВС легко осуществить вручную путем последовательных приближений по методике, аналогичной методике синтеза МВС моделированием. Точность работы подстроенных образцов пятиразрядной МВС была доведена таким образом до 0,003% во всем диапазоне входных чисел. Чтобы такая подстройка была возможна, в топологию МВС сразу должны быть заложены последовательно с каждым входом добавочные сопротивления нескольких номиналов (например, $r_0, 2r_0, 4r_0, 8r_0$), зашунтированные низкоомными пленочными перемычками. Выжигая перемычки, шунтирующие эти сопротивления, можно ввести в цепь входа любое сопротивление одного из 16 номиналов от 0 до $15r_0$.

Помимо описанной подстройки, была исследована возможность доводки весовых коэффициентов до расчетных значений путем выжигания небольших участков резистивной пленки током большой плотности с помощью вольфрамовой иглы. Точность работы образцов МВС была доведена таким путем примерно до 0,01%.

Простейшая схема включения МВС в ПКН (рис. 2) [6] не исчерпывает всех возможностей МВС в построении преобразователей. Использование обращенной схемы включения МВС (выход схемы подключен к одному полюсу источника образцового напряжения, а все входы — к другому), в которой входные токи образуют ту же самую весовую последовательность, что и весовые коэффициенты, позволяет разнообразить схемы включения МВС, увеличить ее функциональные возможности и расширить область ее применения.

На рис. 3 представлена схема ПКН с операционным усилителем (ОУ) и обращенным включением МВС. Входы МВС через ключевые схемы K_0, K_1, \dots, K_{n-1} , управляемые кодом входного числа N , подключаются или ко входу операционного усилителя, или к общей шине. Опе-

рационный усилитель охвачен цепью обратной связи с сопротивлением $R_{o.c}$. Если коэффициент усиления операционного усилителя велик и его входными токами можно пренебречь, то выходное напряжение преобразователя описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = -E \frac{R_{o.c}}{R_i} \frac{N}{2^n - 1}.$$

Достоинством такой схемы, кроме малого выходного сопротивления, является гораздо меньшая величина и постоянство рабочих токов ключевых схем, что позволяет учесть их неидеальность и повысить точность работы ПКН.

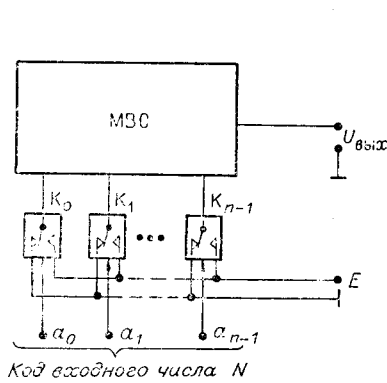


Рис. 2.

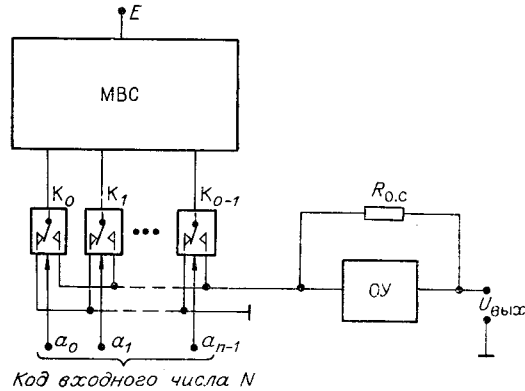


Рис. 3.

В обращенной схеме включения MBC может работать (как своеобразный эквивалент) как цифровое управляемое сопротивление. Это позволяет включить MBC в цепь обратной связи операционного усилителя (рис. 4) и получить выходное напряжение, пропорциональное отношению двух чисел

$$U_{\text{вых}} = -E \frac{R_{i1}}{R_{i2}} \frac{2^m - 1}{2^n - 1} \frac{N_1}{N_2}, \quad (10)$$

где N_1 — n -разрядное двоичное число; N_2 — m -разрядное двоичное число; R_{i1}, R_{i2} — величины внутреннего сопротивления MBC_1 и MBC_2 .

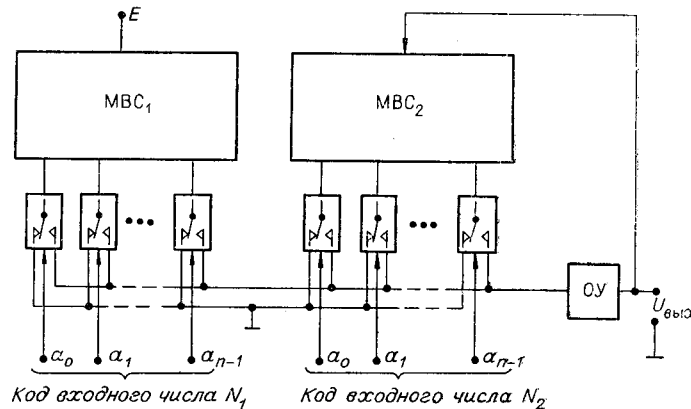


Рис. 4.

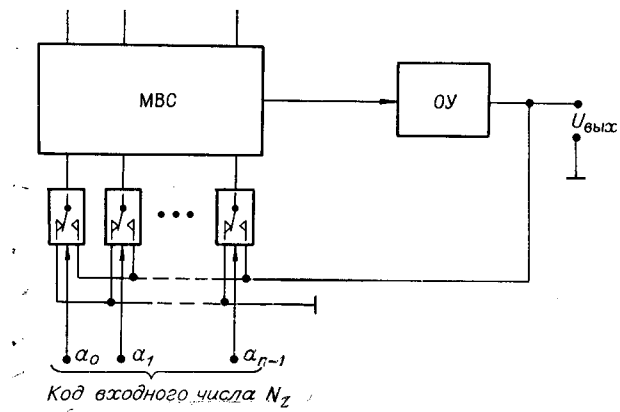


Рис. 5.

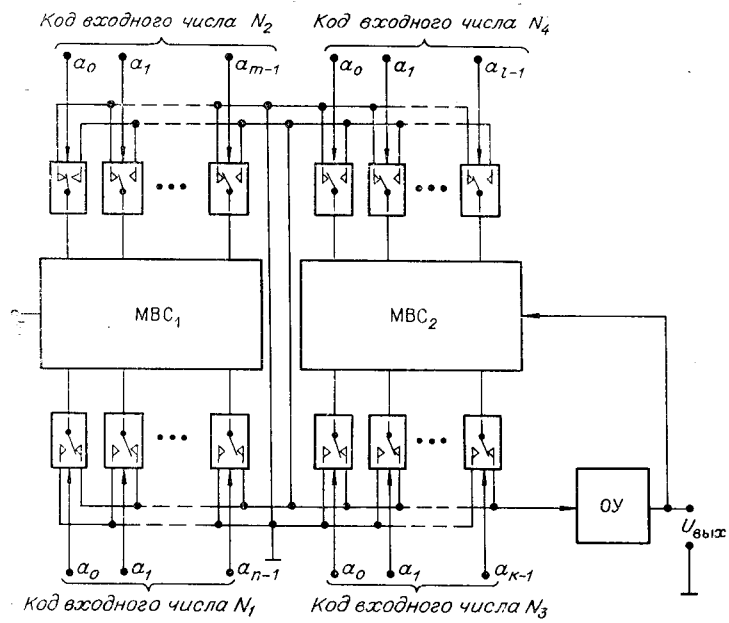


Рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Березин и Н. П. Жидков. Методы вычислений, т. 2. М., Физматгиз, 1962.
2. Е. А. Волков. О дифференциальных свойствах решений краевых задач для уравнений Лапласа на многоугольниках.—Труды математического института им. В. А. Стеклова, 77, 1965.
3. Е. А. Волков. Развитие метода сеток для уравнения Лапласа на конечных и бесконечных областях с кусочно-гладкой границей. Автореферат дисс.—Математические заметки, 1967, т. 2, № 4.
4. В. Вазов, Дж. Форсайт. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М., Изд-во иностр. лит., 1965.
5. Д. Ю. Панов. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
6. Л. П. Пасеков. Вопросы проектирования прецизионных микросхем весового суммирования напряжений с распределенными параметрами на основе их физического моделирования.—Электронная техника, серия VI, Микроэлектроника, 1969, 4 (19).
7. П. Ф. Фильчаков, В. И. Панчишин. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. Киев, изд-во АН УССР, 1961.
8. А. Г. Курош. Курс высшей алгебры. М., «Наука», 1968.
9. Б. П. Демидович и И. А. Марон. Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1970.
10. Л. П. Пасеков. Вероятностный анализ точности весового суммирования напряжений на схемах с распределенными параметрами.—Электронная техника, серия VI, Микроэлектроника, 1969, 4 (19).

*Поступила в редакцию
1 октября 1970 г.,
окончательный вариант —
8 января 1971 г.*