

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3419/82

9/8-82+

13-82-281

С.Г.Басиладзе, Као Дак Хьен

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ФУНКЦИЙ

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

1982

Функциональные генераторы часто применяются для задания "профилей" /температуры, скорости, тока, напряжения и т.д./ в управляющих системах, а также для управления регулируемыми параметрами в испытательных и измерительных системах. В частности, такие генераторы находят широкое применение в экспериментах в области ядерной физики. При ускорении заряженных частиц в синхрофазотроне к точности и стабильности поддержания связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем предъявляются жесткие требования. Это особенно важно для режимов медленного и быстрого выводов пучка из ускорителя. Для систем питания магнитов и линз сверхпроводящего инжектора нуклотрона /1/ необходимы устройства, которые обеспечивали бы требуемую форму токов и напряжений источников питания в цикле ускорения. Причем они должны быть снабжены узлами программно-го управления для статической и динамической коррекции.

Нелинейные функции воспроизводятся аналоговыми /2+5/ или цифровыми методами /6+11/. Во втором случае часто используются запоминающие устройства /ЗУ/ в сочетании с цифро-аналоговыми преобразователями /ЦАП/. В настоящее время существуют цифровые программируемые генераторы синусоидальных, прямоугольных и треугольных сигналов и генераторы сигналов произвольной формы, работающие в диапазоне частот от тысячных долей герц до мегагерц /12/.

Цифровая реализация функции с помощью кусочно-линейной аппроксимации с постоянным шагом разбиения аргумента /рис.1а/ сравнительно проста, но требует значительного объема памяти $2^n \cdot \ell$, где n - разрядность аргумента, ℓ - разрядность значений функции. Этот способ требует одного ЗУ разрядностью ℓ и инкрементируемого адресного счетчика разрядностью n . Шаг приращения аргумента определяется из условия, чтобы максимальная погрешность не превышала заданной величины.

В настоящей работе описывается способ реализации функций с использованием кусочно-линейной аппроксимации с переменным шагом разбиения аргумента /рис.1в/. В этом случае используются два ЗУ для хранения значений аргумента и функции в цифровой форме /см. рис.2/. Это дает весьма гибкую структуру, легко перестраиваемую при изменении реализуемой функции, и обеспечивает, как будет показано ниже, значительный выигрыш в объеме памяти, особенно когда требуется высокая точность представления функции. Определение точек излома аппроксимации производится

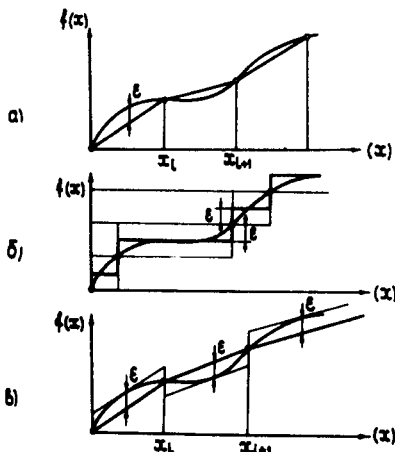
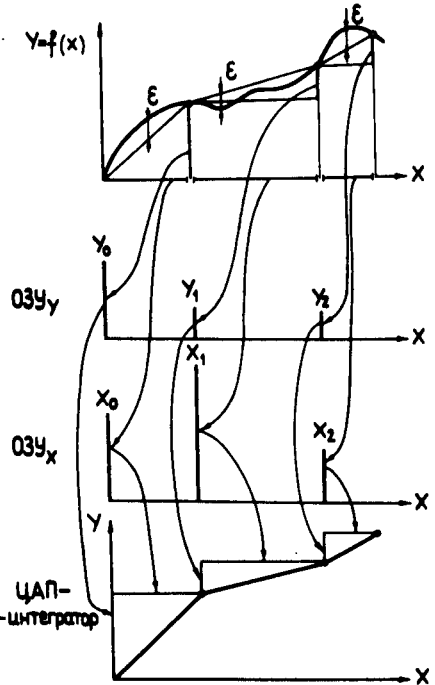


Рис.1. Способы аппроксимации реализуемой функции: а/ кусочно-линейная аппроксимация с постоянным шагом разбиения аргумента; б/ кусочно-прямоугольная с переменным шагом; в/ кусочно-линейная с переменным шагом.

Рис.2. Способ кусочно-линейной аппроксимации с переменным шагом на базе двух ОЗУ в сочетании с ЦАП.



на каждом участке по заданной погрешности реализации функции. В обоих случаях функция воспроизводится путем интегрирования тока на выходе ЦАП. Погрешность аппроксимации функции определяется разрядностью ЦАП и точностью интегратора. В настоящее время существуют микросхемы 12- и 16-разрядного ЦАП /13,14/. При помощи схемы интегратора на основе широкополосного операционного усилителя, стабилизированного МДМ-каналом, можно достигнуть довольно высокой точности.

Необходимые функции можно реализовать и с помощью кусочно-прямоугольной аппроксимации, также с постоянным или с переменным шагом /рис.1б/. Однако этот способ дает большую погрешность аппроксимации или требует большего числа разбиений, то есть большего ЗУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧЕК ИЗЛОМА

Пусть область определения функции $f(x)$ содержит $x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ точек излома, на которых она аппроксимируется отрезками прямых с заданной погрешностью. Допустим, дана точка с абсциссой x_i . Необходимо найти следующую точку x_{i+1} . На рис. 3 функция представлена кривой 1. Прямая 2 есть аппроксимация функции $f(x)$ в интервале (x_i, x_{i+1}) при заданной погрешности ϵ . Уравнение прямой 2 имеет вид

$$y(x) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{(x_{i+1} - x_i)} (x - x_i) + f(x_i). \quad /1/$$

Разность между ординатами кривой 1 и прямой 2 $\Delta(x) = f(x) - y(x)$.

Величина $\frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{(x_{i+1} - x_i)}$ есть не что иное, как производная функции $f(x)$ в точке x_ϵ , где $\Delta(x)$ максимальна и равна заданной погрешности, то есть

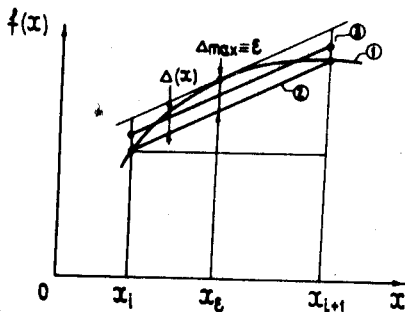
$$\frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} = f'(x_\epsilon). \quad /2/$$

Поэтому x_ϵ определяется выражением

$$f(x_\epsilon) - f'(x_\epsilon) (x_\epsilon - x_i) - f(x_i) = \epsilon. \quad /3/$$

Найдя x_ϵ из уравнения /3/, можно определить x_{i+1} из /2/. Решение уравнений /2/ и /3/ выполняется методом Ньютона /15/.

Рис. 3. Определение точек излома аппроксимируемой функции.



В таблице приведены результаты расчетов для функций $\sin x, 1 - e^{-x}, x/\sqrt{x^2 + a^2}$ при погрешностях аппроксимации в диапазоне $10^{-2} + 10^{-6}$, выполненные на ЭВМ.

Введены следующие обозначения: l - разрядность ЦАП /то есть разрядность ЗУ, для хранения значений функции/, которая обес-

ϵ	ℓ	$f(x)$	X	d	N	n	K	k	M	m	ξ	Z
10^{-2}	7	sin x	1,6	0,20	8	3	2	1	7	3	1,0	0,9
10^{-3}	10		1,6	0,08	20	5	3	2	18	5	0,9	0,8
$2 \cdot 10^{-4}$	13		1,6	0,04	40	6	3	2	37	6	0,9	0,9
10^{-4}	14		1,596	0,028	57	6	3	2	52	6	1,0	0,9
10^{-5}	17		1,576	0,008	197	8	6	3	174	8	1,0	0,9
10^{-6}	20		1,570	0,002	785	10	12	4	627	10	1,0	0,8
10^{-2}	7	$1 - e^{-x}$	4,80	0,30	16	4	5	3	9	4	1,2	0,7
10^{-3}	10		6,93	0,09	77	7	20	5	27	5	1,9	2,6
$2 \cdot 10^{-4}$	13		8,52	0,04	213	8	34	6	62	6	2,3	2,7
10^{-4}	14		9,212	0,028	329	9	56	6	89	7	2,6	2,8
10^{-5}	17		11,520	0,008	1440	11	226	8	285	9	3,4	2,7
10^{-6}	20		13,816	0,002	6908	13	635	10	910	10	5,1	5,3
10^{-2}	7	$\alpha = 360$	135,0	5,0	27	5	13	4	9	4	1,9	1,3
10^{-3}	10		426,6	1,8	237	8	84	7	27	5	5,2	4,7
$2 \cdot 10^{-4}$	13		949,6	0,8	1187	11	533	10	62	6	10,8	18,1
10^{-4}	14		1342,0	0,5	2684	12	1100	11	89	7	16,9	17,9
10^{-5}	17		4245,0	0,1	42450	15	15711	14	293	9	79,4	70,2
10^{-2}	7		$\alpha = 720$	192,0	8,0	24	5	11	4	9	4	1,7
10^{-3}	10	600,0		2,0	300	9	106	7	29	5	6,1	9,4
$2 \cdot 10^{-4}$	13	1342,0		1,0	1342	11	604	10	64	6	11,8	18,1
10^{-4}	14	1898,4		0,8	2373	12	977	10	87	7	15,9	18,7
10^{-5}	17	6002,0		0,2	30010	15	11110	14	293	9	56,2	35,1

печивает заданную погрешность ϵ . Видно, что *

$$\ell = \lceil \log_2 \epsilon^{-1} \rceil ;$$

X - максимальное значение аргумента, при котором отклонение функции от постоянной величины /асимптоты/ становится меньше ϵ ,

* $\lceil D \rceil$ - наименьшее целое число, большее или равное D .

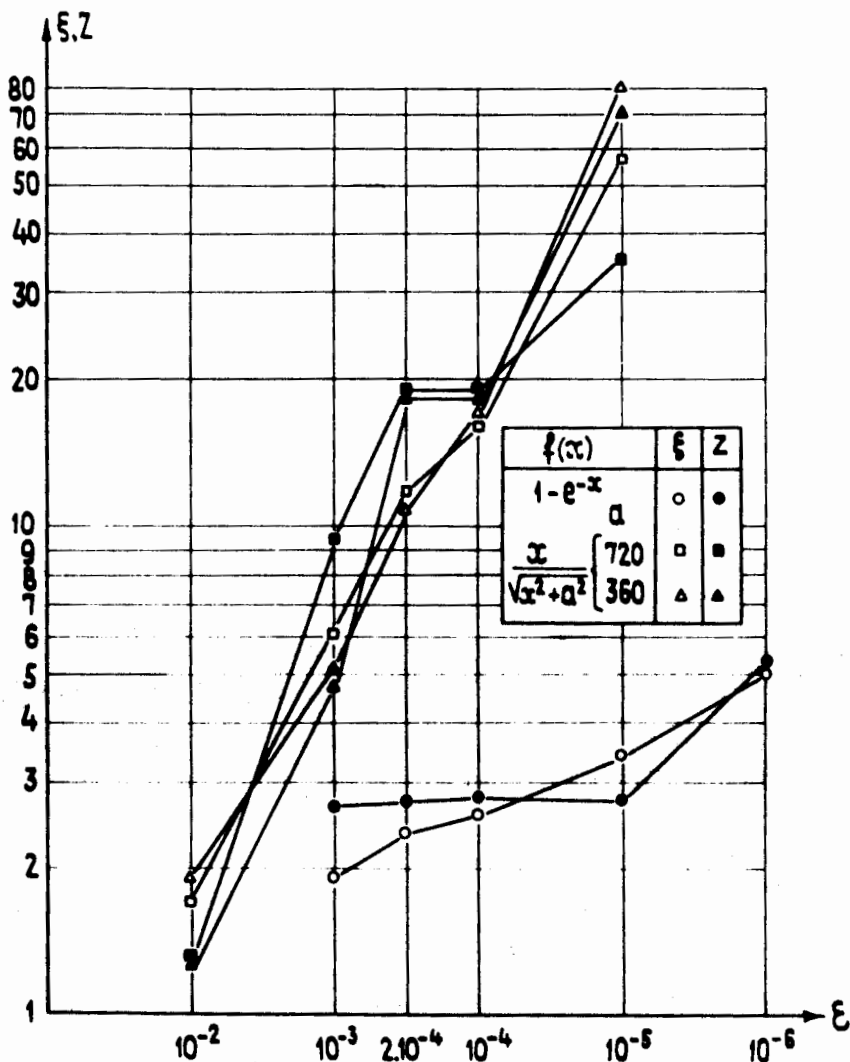


Рис. 4. Значения коэффициента сокращения объема ЗУ при различных погрешностях.

аппроксимации. В противном случае, например для функций с постоянной кривизной *, этот способ не дает большого выигрыша в числе ячеек памяти из-за удвоения устройств памяти.

* Точнее, для функций, аппроксимация которых с постоянным шагом дает примерно одинаковую погрешность на каждом участке разбиения.

ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ФУНКЦИЙ

На рис.5 приведена блок-схема генератора функций. Значения аргумента и функции в точках излома по линиям магистрали $W1+W12$ и $W13+W24$ соответственно заносятся в $03У_x$ и $03У_y$ /оба $03У$ - емкостью $2^8 \times 12$ разрядов/.

Блок работает следующим образом /см. рис.6/ . В начальном состоянии адресные счетчики X , Y и реверсивный счетчик сбрасываются в "0". Триггер записи-чтения /Тр.3/4/ устанавливается в режим записи, а триггер запуска тактового генератора - в режим запрета. Цикл генерации функции запускается импульсом "Пуск". Тр.3/4 переходит в режим чтения, и величина аргумента в первой точке излома, сохраняемая в нулевой ячейке $03У_x$, поступает в реверсивный счетчик. При этом срабатывает ключ/КП 307/, разряжающий интегрирующий конденсатор. После этого информация о функции, сохраняемая в нулевой ячейке $03У_y$, поступает на вход ЦАП. Триггер запуска пропускает серию импульсов тактового генератора на декрементный вход /-1/ реверсивного счетчика. Интегрирование продолжается до тех пор, пока не появится "импульс досчета" на выходе " ≤ 0 " реверсивного счетчика. Этот процесс представляет собой одну элементарную операцию занесения значений аргумента и функции. Затем эти операции выполняются для всех 256 ячеек памяти. Каждый раз такая элементарная операция инициируется задним фронтом предыдущего импульса досчета. Следует отметить, что занесение значений аргумента и функции выполняется в течение времени, которое не больше периода тактовых импульсов.

Максимальная частота повторения выходного сигнала ограничена скоростью выборки $03У$ и числом точек излома /то есть заданной погрешностью для каждой функции/. Она составляет примерно $1/(350 \text{ нс} \times 80) \approx 35 \text{ кГц}$ при погрешности $10^{-4} / M \approx 80$, см. таблицу/.

В генераторе используется микросхема 12-разрядного ЦАП с временем установления 400 нс /по току/. Дифференциальная нелинейность выходного тока $\sim +0,1 + 0,05\%$. Максимальный выходной ток $\sim 2 \text{ мА}$.

Источник опорного напряжения /ИОН/ для ЦАП выполнен на основе микросхемы $\mu A723$. Он представляет собой прецизионный источник напряжения 10 В с низким уровнем дрейфа. Опорное напряжение также может задаваться внешним источником через вход "Внеш.ИОН" на передней панели.

Уровень входных сигналов ЦАП совместим с сигналами TTL интегральных схем. На выходе ЦАП возможно получение однополярных и двухполярных напряжений. Последнее производится смещением входного напряжения выходного операционного усилителя /ОУ/ преобразователя, не включаемого в ЦАП. В этом случае самый старший разряд ЦАП используется в качестве знакового.

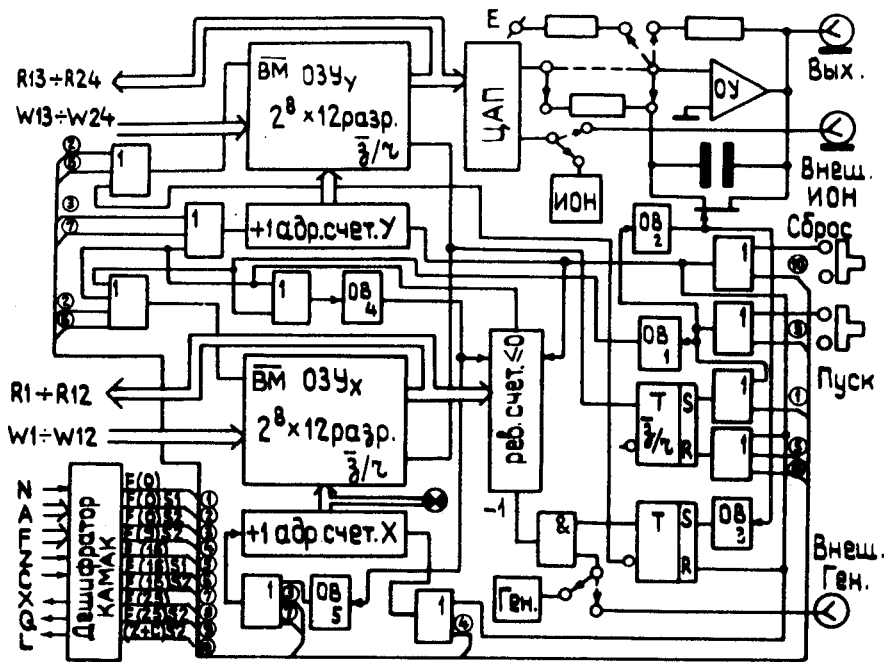


Рис. 5. Структурная схема генератора функций.

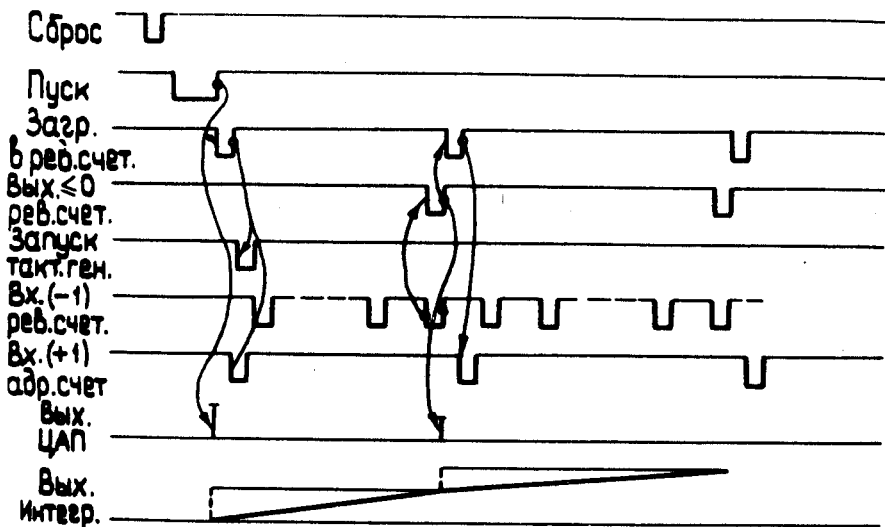
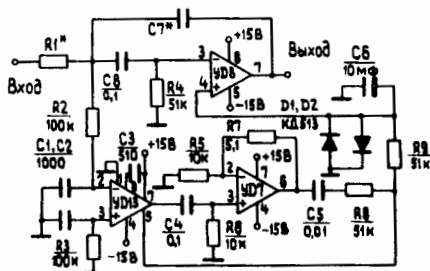


Рис. 6. Временная диаграмма работы генератора функций.

Рис.7. Интегратор на основе усилителя со стабилизирующим каналом МДМ.



Для достижения высокого быстродействия и малого дрейфа "нуля" интегратор выполнен по двухканальной схеме усилителя: с широкополосным каналом и стабилизирующим каналом модуляции-демодуляции /МДМ/ см. рис.7//16/. Широкополосный канал образован дифференциальным усилителем К140УД8 с полевыми транзисторами на входе, а усилитель МДМ - микросхемой К140УД13/17/. Частота мультивибратора задается внешним конденсатором /С3/. Модулированный сигнал усиливается усилителем переменного тока К140УД7. В результате синхронной демодуляции /вход 5 микросхемы К140УД13/ восстанавливаются постоянная составляющая сигнала и полярность входного сигнала. Первоначальный спектр частот входного сигнала восстанавливается с помощью фильтра нижних частот R9-C6. Напряжение смещения усилителя МДМ/рис.7/ $U_{см.} \approx 20$ мкВ, типичное значение температурного дрейфа $\Delta U_{см.}/\Delta T$ составляет 0,1 мкВ/°С, а временного дрейфа $-\Delta U_{см.}/\Delta t$ -1 мкВ/8ч.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ФУНКЦИЙ

Выход

Генерирование любой функции с погрешностью

- $\approx 10^{-4}$ - однополярная функция
- $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ - двуполярная функция

Максимальная частота повторения функции ≈ 35 кГц

Максимальная амплитуда выходного напряжения 10 В

Вход

"Внеш.ИОН" подключается к необходимому внешнему источнику опорного напряжения

"Внеш.Ген" - уровни ТТЛ

/Применение интегральной схемы типа SN75107 обеспечивает гибкость в выборе источника синхроимпульсов/

Функции КАМАК

NA(0) F(0)	- чтение данных по линиям R1+R12 - с ОЗУ _x , R13+R24 - с ОЗУ _y
NA(0) F(0) S2	- добавление "1" к счетчикам адреса
NA(0) F(16)	- запись данных по линиям W1+W12 - в ОЗУ _x , W13+W24 - в ОЗУ _y
NA(0) F(16) S2	- добавление "1" к счетчикам адреса
f NA(0) F(9) + Z + Cl S2	- сброс адресных счетчиков, реверсивного счетчика и режимных триггеров /режим "Запись", "Запрет"/
NA(0) F(25)	- запуск генерирования функции

Токи, потребляемые блоком от источников питания:

+6 В	- 2 А
+24 В	- 60 мА
-24 В	- 80 мА

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность П.К.Маньякову за полезные консультации и Л.Г.Булаевой за подготовку в печать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.
2. Михайлов А.И., Пучков Г.П., Царенков А.П. ОИЯИ, 9-10712, Дубна, 1977.
3. Безногих Ю.Д., Воеводин М.А., Сайфулин Ш.З. ОИЯИ, 9-11128, Дубна, 1977.
4. Куликовский Л.Ф. и др. Автоматические измерительные приборы с устройствами для выполнения математических операций. "Энергия", М., 1970.
5. Лихтциндер М.Я. Электронные моделирующие устройства в информационно-измерительных системах. "Энергия", М., 1971.
6. Балашов Е.П. и др. УСИМ, 1975, №3, с.99-102.
7. Ильин В.А., Попов Ю.А., Дружинина И.И. УСИМ, 1979, №1, с.58-60.
8. Palm W.A., Williamson G.A. Electronics, 1978, vol.51, No.1, pp.159,161.
9. Podoiske J.Rev. Sci. Instr., 1979, 50(8), p.1010-1012.
10. Bertrand D., Bader C.R., Cand P. J.Phys.E: Sci.Instr., 1980, vol.13, p.711-713.
11. Guazzoni P., Michelto P., Moroni A. D.A.G. Inst. Naz. Fis. Nucl. (Report), 1980, BE, No.9, p.8.
12. Catalog Hewlett-Packard. Electronic Instruments and Systems, 1981, p.359-363.

13. Абрайтис В.Б., Климашаускас К.Ю., Марцинкявичюс А.-И.К. Электронная промышленность, 1981, №2, с.49.
14. Балакай В.Г., Крюк И.П., Лукьянов Л.М. Интегральные схемы АЦП и ЦАП. "Энергия", М., 1978.
15. Бахвалов Н.С. Численные методы /анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения/. "Наука", М., 1975.
16. Усилители с полевыми транзисторами /под ред. И.П.Степаненко/. "Советское радио", М., 1980.
17. Ляхович В.В. и др. Электрон.промышленность, 1979, вып.5 /77/, с.26-30.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 апреля 1982 года.