



Государственный комитет
СССР
по делам изобретений
и открытий

О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 750466

(61) Дополнительное к авт. свид-ву —
(22) Заявлено 04.05.78 (21) 2611630/18-24
с присоединением заявки № —
(23) Приоритет —
Опубликовано 23.07.80. Бюллетень № 27
Дата опубликования описания 23.07.80

(51) М. Кл.
G 06 F 1/02
G 07 C 15/00
(53) УДК 681.325
(088.8)

(72) Авторы
изобретения

А. А. Петровский и А. Е. Леусенко

(71) Заявитель

Минский радиотехнический институт

(54) ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Изобретение относится к области вычислительной техники и может быть использовано в качестве блока модульной ЭВМ, специализированного блока универсальной ЭВМ, задающей аппаратуры для воспроизведения случайных процессов с заданной спектральной плотностью мощности при построении автоматизированных систем исследования надежности с помощью вибростендов.

Известен ряд генераторов для формирования случайных процессов заданной спектральной плотностью мощности, в которых требуемая спектральная плотность мощности случайного процесса аппроксимируется непересекающимися спектральными плотностями полосовых случайных процессов с постоянной абсолютной полосой пропускания $\Delta\omega$ (или переменной относительной полосой $\sigma\omega = \frac{\omega}{\Delta\omega}$), причем величина спектральной плотности мощности в полосе пропускания разная K_1, K_2, \dots, K_n . При этом обязательным условием данного способа является независимость полосовых случайных процессов.

Данный метод и определил структуры построения генераторов случайных процессов.

Известен генератор случайных процессов, содержащий n -источников "белого" шума, n -полосовых формирующих фильтров с регулируемым усилением в полосе. Выходной случайный процесс получается в результате суммирования на сумматоре всех выходных сигналов формирующих полосовых фильтров. Понятно, что вид воспроизводимой спектральной плотности мощности на выходе определяется значениями коэффициентов усиления фильтров и количеством полосовых формирующих фильтров. Изменяя коэффициенты усиления и количество полосовых формирующих фильтров, можно с требуемой точностью получать случайные процессы с заданной спектральной плотностью мощности [1].

Данным устройствам присущи существенные недостатки, к которым следует отнести наличие дрейфа у аналоговых фильтров, зависимость результатов работы от нестабильности реактивных элементов (L, C) схемы и особенно генератора "белого" шума, низкую тех-

нологичность изготовления, трудоемкость настройки, а также сложность и высокую стоимость фильтров, особенно при высоких требованиях к качеству и крутизне амплитудно-частотной характеристики, громоздкость аппаратуры. Кроме того, особую сложность вызывает реализация фильтров сверхнизких частот.

Известен также генератор, в котором аналоговые фильтры заменены цифровыми фильтрами, построенными на базе стандартных элементов вычислительной техники [2].

Однако в этом случае для построения генератора случайных процессов необходимы значительные аппаратные затраты, которые выражаются количеством фильтров, примененных в этом устройстве. Иногда для уменьшения количества формирующих фильтров используют фильтры одной октавности (т.е. с постоянной относительной полосой пропускания $\delta\omega$) [2]. Очевидно, таким способом можно аппроксимировать узко ограниченный класс спектральной плотности мощности. Введение цифровых фильтров в генератор требует применения аналоговых фильтров нижних частот, которые подключаются к выходу или к входу цифровых фильтров (предполагается наличие аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей в цифровом фильтре) для подавления повторов амплитудно-частотной характеристики, следующих с частотой дискретизации. Количество аналоговых фильтров нижних частот и генераторов "белого" шума в данном случае равно числу цифровых фильтров.

Недостатком такого генератора является зависимость результатов его работы от нестабильности реактивных элементов схемы (особенно генератора "белого" шума).

Для повышения точности задания требуемой спектральной плотности мощности необходимо увеличивать количество полос, т.е. количество фильтров, при этом можно добиться высокой точности задания требуемого спектра. Однако, очевидно, что точность задания требуемого спектра зависит от аппаратных затрат на реализацию данного устройства, которые сильно ограничивают ее.

Наиболее близким к предлагаемому по технической сущности является цифровой генератор случайных процессов, содержащий пульт управления, который представляет собой последовательно соединенные регистр константы и дешифратор, цифровой фильтр, мультиплексор, коммутатор, генератор тактовой частоты, генератор "белого" шума, цифроаналоговый преобразователь, аналоговые фильтры нижних частот, сумматор [3].

Анализ данного устройства показывает, что при достаточно большом наборе цифровых фильтров различной октавности S (1-октавные,

1/3-октавные, 1/6-октавные) можно аппроксимировать больший класс спектров и несколько уменьшить аппаратные затраты, в данном случае $S \ll \ell$ где ℓ — количество фильтров в двух предыдущих случаях, но число фильтров нижних частот равно их количеству во втором аналоге [2]. Данный генератор не лишен недостатка: нестабильность реактивных элементов схемы. Если учесть современные требования виброметрии, когда необходимо доводить центральные частоты до 0,5 Гц, то, кроме того, формирование данным устройством инфранизко-частотных полосовых случайных процессов вызывает особую сложность из-за трудностей изготовления фильтров нижних частот. Следовательно, точность задания требуемого спектра в области нижних частот данным устройством низкая. Для увеличения точности задания спектра необходимо увеличивать S (количество разнооктавных фильтров, обычно берут два, три типа фильтров: 1 — октавный, 1/3 — октавный, реже 1/6 — октавный), что сопряжено со значительными аппаратными затратами, так как увеличивается число однотипных блоков — цифровых полосовых фильтров, представляющих собой специализированные вычислительные устройства.

Таким образом, недостатком известного генератора случайных процессов является низкая точность задания требуемой спектральной плотности мощности, значительные аппаратные затраты, зависимость результатов работы от нестабильности реактивных элементов схемы.

Цель изобретения — увеличение точности задания требуемой спектральной плотности мощности и сокращение аппаратных затрат, а также уменьшение зависимости результатов работы от нестабильности реактивных элементов схемы и увеличение быстродействия для некоторых видов спектральных плотностей мощности, т.е. поднятие верхнего частотного диапазона генератора.

Для достижения поставленной цели в известный цифровой генератор случайных процессов, состоящий из пульта управления, цифроаналогового преобразователя, фильтра нижних частот, последовательно включенных генератора тактовой частоты, мультиплексора и генератора "белого" шума, причем первый выход пульта управления соединен с первым входом мультиплексора, введены блок регистров динамической памяти, коммутатор, дешифратор, два блока оперативной памяти, два множительных блока, два накапливающих сумматора, блок синхронизации, шесть блоков элементов И, два блока элементов ИЛИ, причем первый выход блока синхронизации соединен с первыми входами первого и второго блоков элементов И, при этом выход первого блока элементов И соеди-

нен со входом цифроаналогового преобразователя, выход которого соединен со входом фильтра нижних частот, выход которого является выходом устройства, а выход третьего блока элементов И соединен со входом цепочки последовательно соединенных первого блока оперативной памяти, первого множительного блока, первого накапливающего сумматора, первого блока элементов И, выход четвертого блока элементов И соединен со входом цепочки последовательно соединенных второго блока оперативной памяти, второго множительного блока, второго накапливающего сумматора и пятого блока элементов И, выход которого соединен с первыми входами первого и второго блоков элементов ИЛИ, выход первого блока элементов ИЛИ соединен со входом первого множительного блока, а выход блока регистров динамической памяти соединен с первым входом шестого блока элементов И, выход которого подключен ко вторым входам второго множительного блока и первого и второго блоков элементов ИЛИ, причем второй вход пятого блока элементов И соединен со вторым выходом блока синхронизации, третий выход которого соединен со вторым входом шестого блока элементов И, вторые входы третьего и четвертого блоков элементов И соединены с четвертым выходом блока синхронизации, пятый и шестой выходы которого соединены с адресными входами соответственно первого и второго блоков оперативной памяти, выход генератора "белого" шума соединен со вторым входом второго блока элементов И, выход которого соединен с вычитающим входом второго накапливающего сумматора, при этом выход мультиплексора соединен с первым входом блока синхронизации и сдвигающим входом блока регистров динамической памяти, информационные входы которого соединены с выходами коммутатора, управляющий вход которого соединен с выходом дешифратора, а информационный вход — с выходом второго блока элементов ИЛИ, второй и третий выходы пульта управления соединены с первыми входами соответственно четвертого и третьего блоков элементов И, четвертый выход — со вторым входом блока синхронизации, а пятый выход пульта управления соединен с третьим входом блока синхронизации и входом дешифратора.

Известно, что в рамках корреляционной теории для широкого класса случайных процессов (линейных стационарных и нестационарных) их структурные модели полностью определяются формирующими фильтрами. Поэтому, как видно из рассмотрения аналогов, задача построения генератора случайных процессов сводится

к той или иной структурной реализации формирующего фильтра.

Для увеличения задания точности требуемой спектральной плотности мощности в основу структуры данного цифрового генератора случайных процессов положен следующий метод.

Зная, что спектральная плотность на выходе линейной системы получается из спектральной плотности на входе умножением на квадрат амплитудной характеристики системы $S_y(\omega) = S_x(\omega) |H_j(\omega)|^2$ не ограничивая общности, положим, что входной процесс с единичной спектральной плотностью ("белый" шум), тогда

$$S_y(\omega) = |H(-j\omega)| |H(j\omega)| \quad (1)$$

Решая (1) относительно $H_j(\omega)$ (задача факторизации) и применяя метод билинейного Z — преобразования, находим передаточную функцию $H(Z)$ цифрового формирующего фильтра соответствующего порядка. Решение задачи (1) осложняется тем, что $S_y(\omega)$ задана обычно графически или таблично. Поэтому необходимо найти аппроксимирующую функцию

$$S(\omega, \vec{c}) = \frac{P_n(\omega, \vec{c})}{Q_m(\omega, \vec{c})} \quad (2)$$

$\vec{c} = \{c_1, \dots, c_k\}$ — вещественные числа — параметры функции.
 $m \geq n$
 $k = \min$

Причем $\max P(\omega) |S_y(\omega) - S(\omega, \vec{c})| \leq \sigma$ (3)

где σ — абсолютная ошибка;

$P(\omega)$ — весовая функция, позволяющая учитывать неодинаковый вес ошибок аппроксимации на различных частотах.

Для того, чтобы относительная ошибка аппроксимации не выходила за наперед заданные пределы ε , весовая функция выбирается по правилу

$$P(\omega) = \frac{\sigma}{S_y(\omega) \cdot \varepsilon} \quad (4)$$

Требование минимального K согласуется с требованием нахождения передаточной функции с наименьшим необходимым количеством параметров, т.е. минимального порядка. Функция $S(\omega, \vec{c})$ находится с помощью математического программирования.

На фиг. 1 представлена структура цифрового генератора случайных процессов; на фиг. 2 — временная диаграмма работы блока управления.

Цифровой генератор случайных процессов содержит пульт 1 управления, цифроаналоговый преобразователь 2, фильтр 3 нижних частот, генератор 4 тактовых частот, мультиплексор 5, генератор 6 "белого" шума, блок 7 регистров динамической памяти, коммутатор 8, дешифратор 9, первый блок 10 оперативной памяти, второй

блок 11 оперативной памяти, первый 12 и второй 13 множительные блоки, первый 14 и второй 15 накапливающие сумматоры, блок 16 синхронизации, шесть блоков 17–22 элементов И (первый блок 22, второй блок 20, третий блок 19, четвертый блок 18, пятый блок 21, шестой блок 17), два блока 23 и 24 элементов ИЛИ.

Коммутатор 8 представляет собой группу $(m-1)$ одного блока элементов И, каждый из которых одним входом подключен к соответствующему выходу дешифратора 9, а вторым входом — к выходу динамической памяти. Количество элементов И в блоке равно разрядности n регистров динамической памяти.

Пульт 1 управления предназначен для ввода параметров цифрового генератора случайных процессов. Он содержит переключатель "занесение параметров — работа" и набор кнопочных переключателей или микротумблеров для задания параметров, а также кнопку "Запись", которая разрешает запись параметров в соответствующий блок оперативной памяти. В случае использования цифрового генератора случайных процессов в автоматизированной системе виброиспытаний или в качестве модуля ЭЦВМ пульт управления заменяется блоком сопряжения с управляющей ЭВМ или с ЭЦВМ.

В целом устройство является аппаратным аналогом цифрового формирующего фильтра, в основу которого положена каноническая форма рекурсивного фильтра с параметрами α и β

где β_i — коэффициенты знаменателя передаточной функции $H(Z)$

α_i — коэффициенты числителя передаточной функции $H(Z)$

$$H(Z) = \frac{\sum_{i=1}^p \alpha_i Z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^m \beta_i Z^{-i}}, \quad m \geq p, \quad (5)$$

а алгоритм функционирования следующий

$$\left. \begin{aligned} q_n &= x_n - \sum_{i=1}^k \beta_i q_{n-i}, \\ y_n &= \sum_{i=0}^p \alpha_i q_{n-i}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Выполнение условий (2) при расчете параметров делает цифровой генератор случайных процессов адаптируемым к требуемой спектральной плотности мощности. С этой целью в устройство введены дешифратор 9 и коммутатор 8. Адаптация осуществляется по количеству коэффициентов β_i , согласно (5) и (6), здесь $K=1, m$

Функционирование устройства происходит следующим образом.

На пульте 1 управления в один из регистров задается код числа K , где K — порядок знаменателя передаточной функции (5), пятый выход которого соединен с третьим входом блока 16 и дешифратором 9. Данный код в блоке управления используется как код адреса старшего коэффициента β_m , при этом он дешифрируется дешифратором 9, возбуждается соответствующий выход дешифратора 9, который управляет коммутатором 8. Таким образом коммутируется вход с $(m-K)$ -ным выходом. Далее на пульте 1 управления набираются коды параметров β_i и α_i подается команда "Запись" (четвертый выход пульта 1 управления) в блок 16, там формируются адреса параметров β_i и α_i которые соответственно по связям а-а и б-б передаются в адресные части второго блока 11 оперативной памяти и первого блока 10 оперативной памяти; как только сформировались адреса, блок управления вырабатывает сигнал "Запись" в оперативную память (связь в-в) и из пульта управления записываются параметры β_i и α_i (соответственно второй и третий выходы пульта управления) через соответствующие четвертый и третий блоки элементов И во второй и первый блоки оперативной памяти. Так продолжается K раз, т.е. по числу коэффициентов β , максимальное количество которых равно m , а K изменяется от 1 до m , таким образом можно перестраиваться от цифрового формирующего фильтра первого порядка до m -ого. Так для нужд виброметрии достаточно 16–20 порядка (5). Итак, параметры для формирования случайного процесса с требуемой спектральной плотностью мощности занесены в блоки оперативной памяти, и генератор готов к работе.

Из пульта 1 управления (выход первый) поступает сигнал на управляющий вход мультиплексора 5, с помощью которого выбирается требуемая частота дискретизации генератора 4 тактовых частот, которая поступает на вход генератора 6 "белого" шума в блок 16 и на сдвигающий вход динамической памяти. Данный сигнал пульта управления переводит цифровой генератор случайных процессов в автоматический режим, который функционирует согласно алгоритму (6).

Для удобства объяснения функционирования генератора, рассмотрим работу с n -ого шага. К этому моменту времени в блоке 7 регистров динамической памяти хранятся K промежуточных результатов q . Значение входного процесса ("белый" шум/ x_n) считывается по сигналу с блока 16 (выход первый, см. временную диаграмму работы блока 16 на фиг. 2) через второй блок 20 элементов И во второй накап-

ливающий сумматор 15, а из первого накапливающего сумматора 14 считывается очередное значение сформированного случайного процесса Y_{n-1} в цифроаналоговый преобразователь 2 и далее через фильтр 3 нижних частот на выход устройства. Из блоков 10–11 оперативной памяти считываются во множительные блоки 12 и 13 коэффициенты α_k и β_k соответственно, одновременно по сигналу генератора 4 тактовых частот из динамической памяти 7 считывается промежуточный результат Q_1 через шестой блок 17 элементов И во множительный блок 13 и через первый блок 23 элементов ИЛИ во множительный блок 12, где соответственно образуются произведения $\beta_k Q_1$ и $\alpha_k Q_1$. Произведение $\beta_k Q_1$ затем алгебраически вычитается из содержимого сумматора 15, а результат $\alpha_k Q_1$ передается в накапливающий сумматор 14. Промежуточный результат записывается через второй блок 24 элементов ИЛИ и коммутатор в $(m-k)$ -й регистр (перед этим был осуществлен сдвиг в динамической памяти). По очередному сигналу генератора тактовых частот считывается Q_2 промежуточный результат и одновременно α_{k-1} и β_{k-1} в результате во множительном блоке 13 образуется произведение $\beta_{k-1} Q_2$, а в множительном блоке 12 $\alpha_{k-1} Q_2$ далее из содержимого накапливающего сумматора 15 алгебраически вычитается $\beta_{k-1} Q_2$, а $\alpha_{k-1} Q_2$ алгебраически складывается с содержимым накапливающего сумматора 14, а Q_2 записывается в $(m-k)$ -й регистр. Так продолжается k раз. В результате во втором накапливающем сумматоре 15 образуется следующая сумма

$$X_n - \beta_k Q_1^m - \beta_{k-1} Q_2^{m-1} - \dots - \beta_1 Q_k^{m-k}$$

Здесь и далее верхние индексы при Q_i означают номера регистров динамической памяти, а в первом накапливающем сумматоре 14

$$\alpha_k Q_1^m + \alpha_{k-1} Q_2^{m-1} + \dots + \alpha_1 Q_k^{m-k}$$

Если коэффициентов меньше, чем β , то следующая сумма

$$0 \cdot Q_1^{m-1} + 0 \cdot Q_2^{m-2} + \dots + \alpha_i Q_i^{m-i} + \dots + \alpha_1 Q_k^{m-k}$$

Промежуточные результаты в динамической памяти располагаются в следующем порядке

$$Q_1^m \quad Q_2^{m-1} \quad \dots \quad Q_k^{m-k}$$

Далее блок 16 снимает сигнал (выход 3).

Поступает очередной сигнал тактовой частоты, который производит сдвиг динамической памяти, но перепись Q_1^m в $(m-k)$ -ый регистр не осуществляется, так как нет разрешающего сигнала на шестом блоке 17 элементов И, в результате получаем

$$Q_2^m \quad Q_3^{m-1} \quad \dots \quad 0^{m-k}$$

По сигналу (второй выход блока синхронизации) считывается содержимое накапливающего сумматора 15 (там к этому времени уже сформировалось очередное промежуточное значение Q_{k+1} , которое записывается в $(m-k)$ -й регистр и умножается на α_0 , см. алгоритм 6), далее по сигналу (первый выход блока 16) считывается очередное значение выходного процесса Y_n и в накапливающий сумматор 15 записывается новое входное значение X_{n+1} . Цикл работы повторяется сначала.

Необходимо отметить, что введение блоков 7, 8 и 9 увеличивает аппаратные затраты, но незначительно по сравнению с прототипом. Экономия аппаратных затрат и проявление возможности увеличения точности задания спектральной плотности мощности получается за счет замены m полосовых фильтров одним цифровым формирующим со сложной передаточной функцией.

Затраты по аппаратуре полосового и предполагаемого фильтра примерно одинаковы, так для обеспечения неперекрывания полос необходимо брать фильтры полосовые высокого порядка: 16–20 (5). Количество генераторов "белого" шума и фильтров нижних частот сокращается до одного, следовательно, уменьшается зависимость результатов работы от нестабильности реактивных элементов схемы, а адаптация генератора к требуемой спектральной плотности мощности делает возможным увеличить быстродействие предлагаемого генератора. Например, требуемая спектральная плотность мощности описывается m -ым порядком передаточной функции формирующего фильтра, т.е. количество коэффициентов равно $2m$ (порядок, положим, числителя и знаменателя равны), а количество коэффициентов в полосовом фильтре S причем $2m < S$, тогда имеем выигрыш в быстродействии для данного класса спектральной плотности мощности.

Увеличение точности задания требуемого спектра осуществляется за счет увеличения порядка аппроксимирующей функции. При порядке 20 можно описывать более широкий класс функций, чем с помощью многоканального генератора.

Таким образом конкретная реализация данного устройства позволяет получить высокие технико-экономические показатели, а включение его в состав автоматизированной системы испытаний позволяет поднять испытания на качественно новую основу.

Формула изобретения

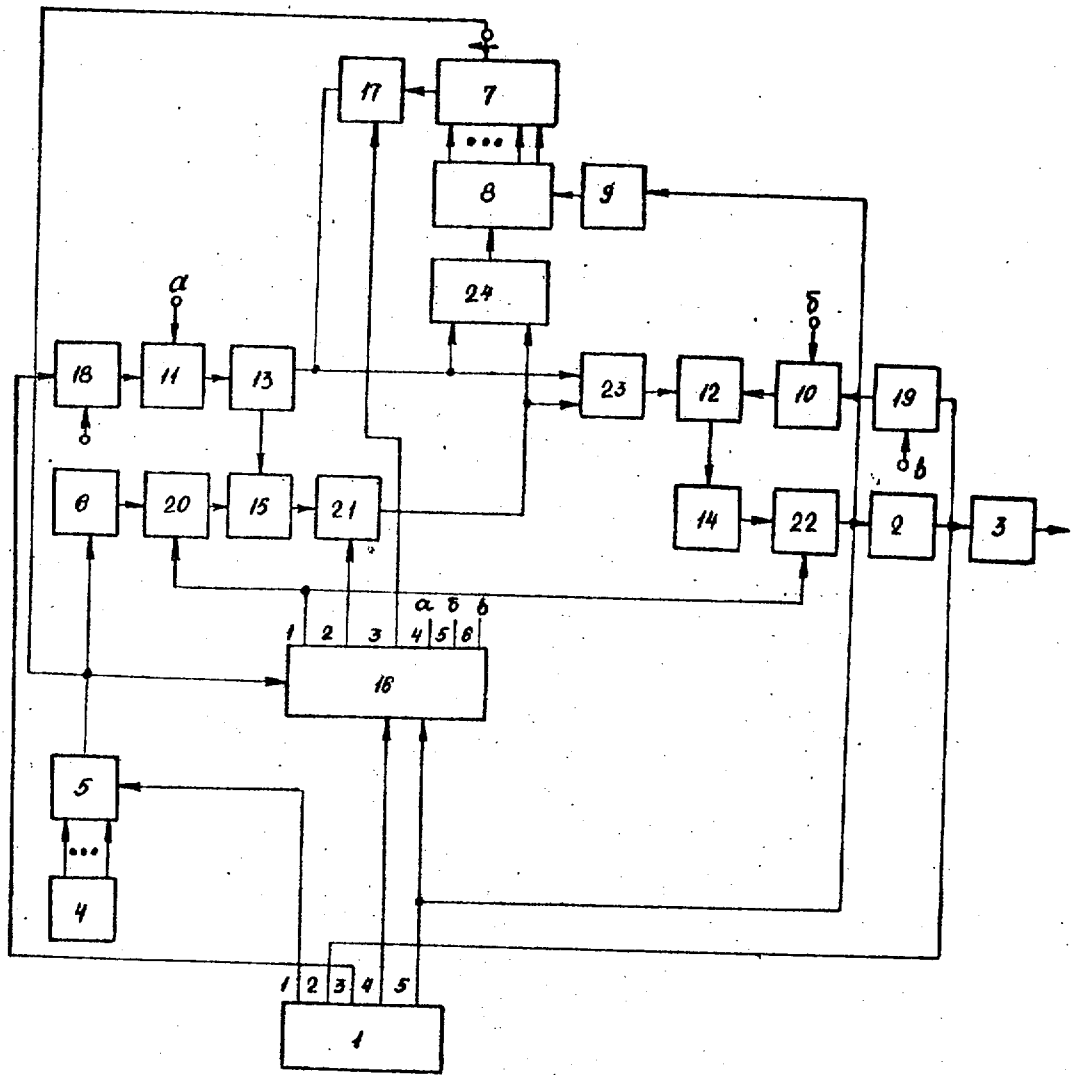
Цифровой генератор случайных процессов, содержащий пульт управления, цифроаналоговый

преобразователь, фильтр нижних частот, последовательно включенные генератор тактовых частот, мультиплексор и генератор "белого" шума, причем первый выход пульта управления соединен с управляющим входом мультиплекса, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что, с целью повышения точности задания требуемой спектральной плотности мощности, генератор содержит блок регистров динамической памяти, коммутатор, дешифратор, два блока оперативной памяти, два множительных блока, два накапливающих сумматора, блок синхронизации, шесть блоков элементов И, два блока элементов ИЛИ, причем первый выход блока синхронизации соединен с первыми входами первого и второго блоков элементов И, выход первого блока элементов И соединен со входом цифроаналогового преобразователя выход которого соединен со входом фильтра нижних частот, выход которого является выходом генератора, выход третьего блока элементов И соединен со входом цепочки последовательно соединенных первого блока оперативной памяти, первого множительного блока, первого накапливающего сумматора, первого блока элементов И, выход четвертого блока элементов И соединен со входом цепочки последовательно соединенных второго блока оперативной памяти, второго множительного блока, второго накапливающего сумматора и пятого блока элементов И, выход которого соединен с первыми входами первого и второго блоков элементов ИЛИ, выход первого блока элементов ИЛИ соединен со входом первого множительного блока, а выход блока регистров динамической памяти соединен с первым входом шестого блока элементов И, выход которого подключен ко вторым входам второго множительного блока первого и второго блоков элементов ИЛИ, второй вход пятого бло-

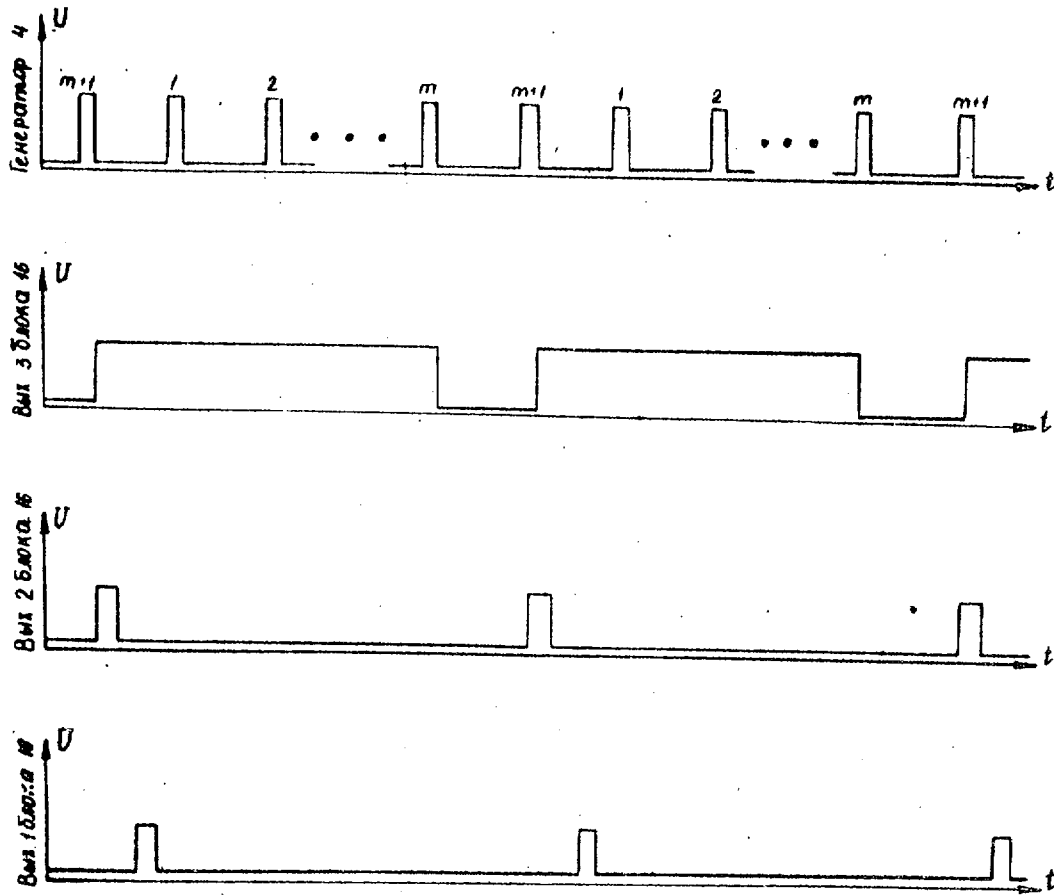
ка элементов И соединен со вторым выходом блока синхронизации, третий выход которого соединен со вторым входом шестого блока элементов И, вторые входы третьего и четвертого блоков элементов И соединены с четвертым выходом блока синхронизации, пятый и шестой выходы которого соединены с адресными входами соответственно первого и второго блоков оперативной памяти, выход генератора "белого" шума соединен со вторым входом второго блока элементов И, выход которого соединен с вычитающим входом второго накапливающего сумматора, при этом выход мультиплексора соединен с первым входом блока синхронизации и сдвигающим входом блока регистров динамической памяти, информационные входы которого соединены с выходами коммутатора, управляющий вход которого соединен с выходом дешифратора, а информационный вход — с выходом второго блока элементов ИЛИ, второй и третий выходы пульта управления соединены с первыми входами соответственно четвертого и третьего блоков элементов И, четвертый выход — со вторым входом блока синхронизации, а пятый выход пульта управления соединен с третьим входом блока синхронизации и входом дешифратора.

Источники информации,

- принятые во внимание при экспертизе
1. Коваль В. Г. Задающая аппаратура для воспроизведения случайных вибраций при исследовании надежности. — "Вестник машиностроения", 1970, № 6.
 2. Верешкин А. Е., Катковник В. Я. Линейные цифровые фильтры и методы их реализации. М., "Советское радио", 1973.
 3. Авторское свидетельство СССР по заявке № 2445994/18-24, кл. G 07 C 15/00 (прототип).



Диаг. 1



Фиг. 2

Редактор В. Зарванская Составитель А. Карасов Корректор М. Шароши
 Техред И. Асталаш

Заказ 4465/18 Тираж 751 Подписное
 ЦНИИПИ Государственного комитета СССР
 по делам изобретений и открытий
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4