

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 79

АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРА СИНХРОННОГО ТИПА

Ю.А.Абрамов

Горький - 1975 г.

А н н о т а ц и я

Произведено сравнение различных схем анализаторов спектра и дано обоснование принципов построения анализаторов синхронного типа, использующих когерентность анализируемого и вспомогательного сигналов.

Приводятся технические данные четырех анализаторов спектра звукового и инфразвукового диапазона частот.

Проведение спектрального анализа процессов самой различной природы для получения измерительной информации о частотном составе, соотношении амплитуд и фаз частотных составляющих является в настоящее время наиболее распространенным способом обработки информации в физике, технике и медицине. Особое значение приобретают методы спектрального анализа в задачах выделения скрытых периодичностей, обусловленных спецификой работы исследуемой системы.

С математической точки зрения спектральный анализ функции $f(t)$, описывающей исследуемый процесс, сводится к решению интегрального уравнения

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

где $S(\omega)$ — спектральная плотность функции $f(t)$ подлежащая определению.

Решение этого уравнения представляется в виде

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

Аналогичная математическая обработка требуется и при спектральном представлении случайных процессов: статистический спектр $G(\omega)$ связан с функцией корреляции $B(\tau)$ преобразованием Фурье:

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau. \quad (3)$$

Существует два основных направления осуществления спектральной информации: преобразований:

— разработка математических программ спектрального разложения,

— создание аналоговых спектральных анализаторов, т.е. физических систем, осуществляющих с тем или иным приближением нахождение функций $S(\omega)$ и $S(\tau)$ или их модулей.

В данной работе будут рассмотрены только аналоговые спектральные анализаторы. Не выполняя, в силу конечного времени обработки информации, точно операции (1) и (2) эти системы позволяют получить информацию о текущем спектре процесса, под которым понимается

$$S_t(\omega) = \int_0^t f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (4)$$

Что касается путей построения спектральных анализаторов то с и, как известно [1], могут быть построены по двум принципиально различным схемам: схемам с использованием фильтров-резонаторов и схемам, использующим когерентность спектральных составляющих исследуемого сигнала и опорного напряжения. Анализаторы первого типа будем для сокращения называть фильтрами, анализаторы второго типа — анализаторами спектра синхронного типа.

В основе всех схем анализаторов — фильтров лежит стремление смоделировать операцию (1), пропустив исследуемый сигнал через частотно-избирательную систему. Напряжение $f(t)$ на выходе линейной системы с частотной характеристикой $K(\omega)$, при воздействии в течение времени t исследуемого процесса $f(t)$, описывается формулой

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_t(\omega) K(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Используя системы, у которых $K(\omega)$ имеет острый максимум на частоте ω_0 , получим, что напряжение на выходе фильтра будет близко к гармоническому колебанию с частотой ω_0 , огибающая которого есть модуль текущего спектра $|S_t(\omega)|$.

При

$$K(\omega) = \delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)$$

фильтровой анализатор имел бы бесконечную разрешающую способность, конечная ширина функции $K(\omega)$ определяет конечную разрешающую способность фильтра. Наиболее остро технические трудности фильтрового анализа сказываются при построении низкочастотных и инфразвуковых анализаторов.

Анализаторы спектра синхронного типа позволяют обойти ряд этих трудностей. Возможность построения анализирующих схем без резонаторов показана в [1] и обсуждалась в ряде других работ [2, 3, 4]. Основой такого анализа является прямое моделирование операции (4), в которой вместо комплексной функции $e^{-j\omega t}$ приходится использовать две действительные функции $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$. Умножение исследуемой функции $f(t)$ на эти функции и последующее интегрирование полученных произведений позволяют получить косинусную и синусную составляющие текущего спектра

$$A_t(\omega) = \operatorname{Re} S_t(\omega) = \int_0^t f(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (6)$$

$$B_t(\omega) = \operatorname{Im} S_t(\omega) = \int_0^t f(\tau) \sin \omega \tau d\tau. \quad (7)$$

Вся дальнейшая обработка сводится к получению сигнала, пропорционального модулю текущего спектра $\Phi(\omega)$:

$$\Phi(\omega) = \sqrt{A_t^2(\omega) + B_t^2(\omega)}. \quad (8)$$

Помимо прямого выполнения этих операций [2], имеется возможность построения одноканального анализатора, используя в качестве опорного сигнала функцию $\sin(\omega t + \varphi)$ с поиском m ксимумов выходного сигнала k . φ . Показано [1], что величина максимума при этом равна $\Phi_t(\omega)$. Такой метод применен в приборе СД-1, где поиск по фазе производится вручную. В [5] предложен аналогичный ме-

тод, при котором исследуемый сигнал перед подачей на умножитель поступает на линию задержки на каждой частоте анализа производится поиск максимума по величине задержки. Помимо чисто технических трудностей такого поиска, этот способ (также как и при поиске по фазе) требует вполне определенного времени. Наиболее предпочтительным в одноканальном варианте является идея применения модуляционного метода при гетеродинном переключении фазы опорного сигнала на 90° [4], хотя схема анализатора при этом усложняется.

Мы пошли по пути создания двухканальной системы [8], в которой вместо операций (8) применена более простая обработка - второе гетеродинирование и сложение сигналов.

Структурная схема анализатора приведена на фиг. 1, где обозначено: У - умножители, И - интеграторы, Σ - сумматор. Частота настройки анализатора определяется значением частоты ω генератора опорных частот. Напряжения с выходов интеграторов, представляющие собой косинусную (8) и синусную (7) составляющие текущего спектра, поступают на два умножителя, на вторые входы которых поступают сдвинутые по фазе на 90° напряжения вспомогательной частоты Ω . На входе сумматора таким образом имеем сигналы:

$$U_1(t) = A_t(\omega) \cos \Omega t, \quad (9)$$

$$U_2(t) = B_t(\omega) \sin \Omega t.$$

Напряжение на выходе сумматора может быть представлено в виде:

$$U(t) = U_1(t) + U_2(t) = \Phi_t(\omega) \cos(\Omega t - \varphi), \quad (10)$$

$$\text{где } \Phi_t(\omega) = \sqrt{A_t^2(\omega) + B_t^2(\omega)}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{B_t(\omega)}{A_t(\omega)}. \quad (11)$$

Амплитуда сигнала на выходе сумматора равна модулю текущего спектра анализируемой функции на частоте ω .

причем информация о фазовом спектре также сохраняется. Используя две такие системы с общими генераторами опорной и вспомогательной частот, можно одновременно с проведением спектрального анализа двух процессов измерить на частоте анализа разность фаз между их спектральными составляющими, на что указано также в [7].

Сравнивая схемы построения анализаторов спектра синхронного типа и гетеродинных анализаторов — фильтров можно заметить, что в анализаторе синхронного типа тоже происходит гетеродинирование исследуемого сигнала на нулевую частоту. Общность процесса гетеродинирования не снимает существенной разницы этих схем, обусловленной специфической фильтрацией на постоянном токе. Этим и объясняется целый ряд существенных преимуществ схемы синхронного анализатора, особенно ощутимых в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот. Основные из них:

1. Отсутствие побочных зеркальных каналов.

2. Сравнительная простота получения высокой разрешающей способности, зависящей только от постоянной времени интегрирования, и простота изменения разрешающей способности.

3. Возможность получения фазового спектра.

4. Особо отметим простоту получения спектра гармоник при исследовании систем, в которых полезный опорного сигнала не представляет трудностей или он сам по себе имеется в распоряжении экспериментатора. Такая ситуация имеет место, например, при вибрационных и акустических испытаниях, когда опорным сигналом может служить сигнал, возбуждающий систему, или при изучении виброакустических характеристик агрегатов, характерные частоты которых целочисленны частотам вращения валов (зубчатые передачи, лопастные системы). В таких задачах знание спектра гармоник виброакустических полей часто оказывается достаточным.

Требования к основным узлам анализаторов спектра синхронного типа,

Умножители. Основное требование к умножителю —

обеспечение большого динамического диапазона. Наиболее простыми устройствами, осуществляющими умножение сигнала, являются синхронные детекторы релейного типа [8]. Однако детекторы релейного типа в схемах анализаторов обладают существенным недостатком — откликом на составляющие спектра, совпадающие по частоте с гармониками опорного сигнала. Единственным выходом при использовании в анализаторе таких детекторов являются ограничение спектра входного сигнала перед подачей его на детектор.

Указанным недостатком не обладают схемы, осуществляющие "чистое" умножение сигналов — гармонические синхронные детекторы. Один из путей построения таких схем — использование четверть квадратурного метода получения произведения двух сигналов путем вычитания из квадрата их суммы квадрата их разности. Существенным элементом такого детектора является устройство, осуществляющее возведение в квадрат. Вариант синхронного детектора с вакуумными термопреобразователями был специально разработан для анализатора спектра синхронного типа [9]. Помимо основного преимущества, связанного со строго квадратичной зависимостью термоэДС от тока подогрева, такая схема ввиду большой тепловой инерционности преобразователей позволяет объединить в одном элементе и умножение сигналов, и интегрирование результата умножения. При применении преобразователей типа ТВБ-4 получено значение полосы пропускания синхронного детектора 0,8 Гц. Частотный диапазон синхронного детектора практически определяется частотным диапазоном входных усилителей.

Интегратор. Интегратор является узлом, определяющим разрешающую способность анализатора спектра синхронного типа [1]. Бесконечную разрешающую способность обеспечивает идеальный интегратор, амплитудно-частотная характеристика которого — дельта-функция на нулевой частоте. Однако, такая характеристика не может быть реализована в реальных физических системах, и частотная характеристика реального интегратора обладает конечной шириной полосы пропускания. В качестве интегратора может быть применен фильтр постоянного тока с достаточно узким диапазоном рабочих частот. Расчет амплитудно-частотной

характеристики $K(\omega)$ анализатора спектра синхронного типа, в котором в качестве интегратора применен фильтр нижних частот с характеристикой $K(\omega)$, проведем при условии, что фильтр обеспечивает эффективное затухание на частотах, превышающих его полосу Δ . Диапазон рабочих частот анализатора будем считать лежащим выше Δ , так что образующие в результате перемножения входного и опорного сигналов составляющие с частотами $\omega + \omega_0$ (ω_0 — частота опорного сигнала) на выходе фильтра нижних частот практически отсутствуют. В таком случае, как нетрудно показать,

$$K(\omega) = K_{\phi} |\omega - \omega_0|. \quad (13)$$

Таким образом, анализатор спектра синхронного типа обладает характеристиками фильтра с частотной характеристикой, являющейся перенесенной и зеркально-отраженной на ω_0 , характеристикой фильтра нижних частот.

Естественно, выигрыш по мощности в отношении сигнал/шум (S/N), даваемый анализатором, равен отношению полосы входного шума Π к 2Δ

$$\frac{(S/N)_{\text{вых}}}{(S/N)_{\text{вх}}} = \frac{\Pi}{2\Delta}. \quad (14)$$

Спектральная плотность мощности входного шума считается постоянной. Полоса из $\Delta f_{\text{э}} = 2\Delta$ может быть названа эквивалентной по шумам полосой анализатора. Физически $\Delta f_{\text{э}}$ представляет собой полосу фильтра с прямоугольной полосой пропускания, дающего тот же выигрыш в отношении сигнал/шум, что и анализатор.

Второй умножитель. Поскольку спектр сигнала на выходе фильтра частот занимает узкую полосу вблизи нулевой частоты, в качестве второго умножителя целесообразно использовать простейший — релейного типа. После прерывания необходимо включить усилитель на частоту работы преобразователя. Частота преобразователя выбирается достаточно высокой, так что обеспечить выделение ее основной гармоники не составляет трудности. Преобразователи основного и квадратурного каналов должны работать со сдвигом по времени на четверть периода, чтобы обеспечить умножение

соответственно на $\cos \Omega t$ и $\sin \Omega t$. Возможен и другой путь: преобразователи работают синхронно, а в усилителе одного из каналов, на частоте Ω создается дополнительный сдвиг по фазе на 90° .

Технические параметры разработанных анализаторов спектра

Синхронный измеритель гармоник.

Синхронный измеритель гармоник был разработан в 1968 г. в связи с изучением спектра зубовой погрешности шестерен коробок передач и задних мостов автомобилей [10]. Диапазон рабочих частот 5 - 3000 Гц, диапазон входных сигналов 0,3 - 1000 мВ. Результаты анализа считываются по стрелочному индикатору и могут быть записаны на самописце Н-110. Динамический диапазон анализатора не менее 50 дБ. Эквивалентная по шуму анализатора

$$\Delta f_{\text{ш}} = 1,5 \text{ Гц.}$$

На фиг. 2 приведены записи напряжения на выходе прибора при выделении синхронного гармонического сигнала из аддитивной смеси его с шумом с полосой 1600 Гц. Шум поступает на вход постоянно, а сигнал периодически отключается. Первой записи соответствует отношение сигнал/шум на входе 0 дБ, на следующих записях сигнал уменьшается ступенями на 10 дБ. Из этих записей найдено указанное выше значение $\Delta f_{\text{ш}}$. Разрешение анализатором двух гармонических сигналов равной интенсивности также может служить показателем разрешающей способности прибора. На фиг. 3. приведены соответствующие записи, на которых указаны значения разности частот разрешаемых линий.

Прибор экспонировался на ВДНХ и отмечен бронзовой медалью выставки. В настоящее время он внедрен на участке контроля задних мостов на Горьковском автозаводе.

Анализатор вибрационной активности редукторов. Прибор был разработан для цехового контроля редукторов на Ижевском редукторном заводе [11]. В приборе применены гармонические синхронные детекторы на термопреобразователях [9], что позволило получить большую разрешающую

способностью в широком диапазоне частот: 6 Гц—22 кГц. Кроме измерения интенсивности гармоник изучаемого сигнала предусмотрена возможность синхронного спектрального анализа низкочастотного сигнала, модулирующего по амплитуде выделяемую гармонику. Диапазон анализируемых частот модуляции 2—30 Гц. Динамический диапазон анализатора по выходу 50 дБ. На фиг. 4 приведены записи по выделению анализатором сигнала из аддитивной смеси его с шумом (частота опорного сигнала перестраивалась вблизи частоты выделяемой линии). Отношения сигнал/шум на входе для обеих записей равно 0 дБ, значения полосы шума указано на записях. Эквивалентная полоса прибора 0,4 Гц. На фиг. 5 приведены записи аналогичные фиг. 3; видно, что сигналы, отличающиеся по частоте на 1 Гц, разрешены уверенно.

Макеты анализаторов спектральной плотности мощности.

В двух последних разработках анализаторов была опробована схема, обеспечивающая получение квадрата модуля текущего спектра. Структурная схема анализатора приведена на фиг. 6, где обозначены X-умножители, ФПТ-фильтры постоянного тока, KB - устройства возведения в квадрат, Г - квадратурный гетеродин, + - сумматор. Учитывая конечное значение полос фильтров постоянного тока, выходное напряжение пропорционально мощности входного сигнала в полосе 2Δ на частоте, совпадающей с частотой гетеродина.

Макет анализатора звукового диапазона [12].

Основная фильтрация по постоянному току производится усилителями с двузвенными активными RC - фильтрами и глубокой отрицательной обратной связью. Напряжения с выходов квадратурных каналов поступают на два вакуумных термопреобразователя, выходные нити которых сфазированы так, чтобы обеспечить сложение сигналов. Необходимое усиление выходного сигнала перед подачей на самописец обеспечивается усилителем постоянного тока, выполненным по схеме МДМ.

Диапазон рабочих частот макета 20–8000 Гц, динамический диапазон не менее 40 дБ. На фиг. 7 приведены записи выходного сигнала макета:

а) при разрешении им двух гармонических сигналов частоты 200 и 202 Гц,

б) при выделении гармонического сигнала из аддитивной смеси его с шумом при соотношении сигнал/шум на входе – 17 дБ. Эквивалентная по шумам полоса анализатора около 2 Гц.

Макет анализатора инфразвукового диапазона [13].

Блок-схема макета практически та же, что и предыдущего анализатора, рабочий диапазон частот 0,2–20 Гц. В макете предусмотрено два значения разрешающей способности 0,08 Гц и 0,2 Гц. На фиг. 8а приведен отклик при разрешении ошей способности 0,08 Гц на гармонический сигнал частоты 0,15 Гц (отметки по частоте идут через 0,01 Гц от 0,05 до 0,5 Гц). Фиг. 8б показывает результат разрешения макетом двух равных по амплитуде сигналов, отличающихся по частоте на 0,3 Гц.

Вопросам применения разработанных приборов для целей объективной оценки качества зубчатых передач посвящен следующий репринт.

Автор выражает искреннюю благодарность А.А.Грачеву и В.А.Звездеву за постоянное внимание к работе, а также Г.П.Болотову, М.С.Козлову и К.Е.Роговцеву за творческое участие в разработках всех анализаторов.

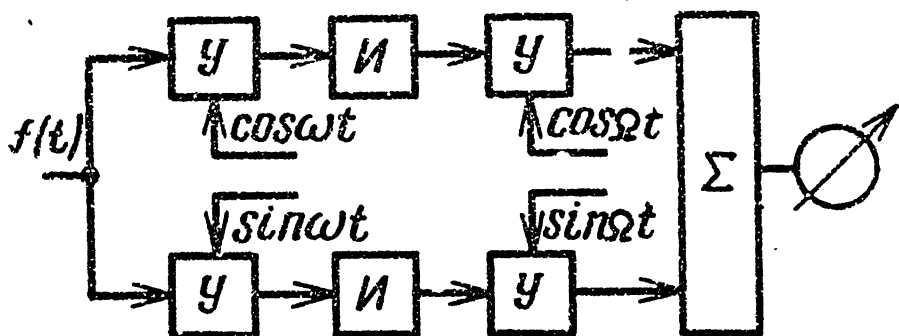
ЛИТЕРАТУРА

1. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Физматгиз М. 1962.
2. Никифоров Н.Т., Харченко Р.Р. Автометрия, 6, 12 (1968).
3. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Зверев В.А. Изм. техника, 4, 44 (1968).
4. Скрипник Ю.А. Методы преобразования и выделения измерительной информации из гармонических сигналов. "Наукова думка", Киев, 1971.
5. Фотченко Ф.Т. Радиотехника, 23, 12 (1968).
6. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Зверев В.А. Радиотехника, 25, 12, 87 (1970).
7. Морозов К.Д., Яблонский В.В. Сборник "Виброактивность механизмов с зубчатыми передачами", стр.239, "Наука", М., 1971;
8. Дехтяренко П.И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. "Техника", Киев, 1965.
9. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Козлов М.С. Сазанов Е.И. ПТЭ, 3, 172 (1970).
10. Абрамов Ю.А., Грачев А.А., Козлов М.С. Аппаратура для измерения отдельных гармонических составляющих в спектре вибраций зубчатых агрегатов. Труды 1У Всесоюз. конф. по виброметрии. (Датчики и виброизмерительная аппаратура), Киев, 1969. стр. 13.
11. Отчет НИРФИ "Создание рабочего макета для целей объективного цехового контроля редукторов. Горький 1972.
12. Отчет НИГФИ. "Изучение виброакустических характеристик заднего моста автомобиля "Москвич". Горький 1974.

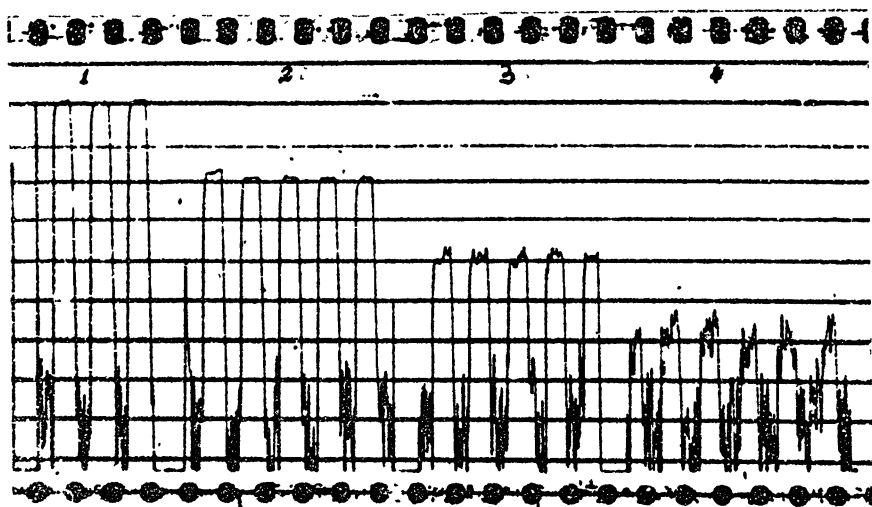
13. Абрамов Ю.А., Бессмертников В.С., Болот в Г.П., Козлов М.С., Одинцов М.В., Черагин Н.П. ПТЭ. Анализатор спектра инфразвукового диапазона. № 3. стр. 143. 1975.г.
14. Абрамов Ю.А. Применение анализаторов спектра синхронного типа в задачах технической диагностики. Препринт НИРФИ. № 78. 1975 г.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

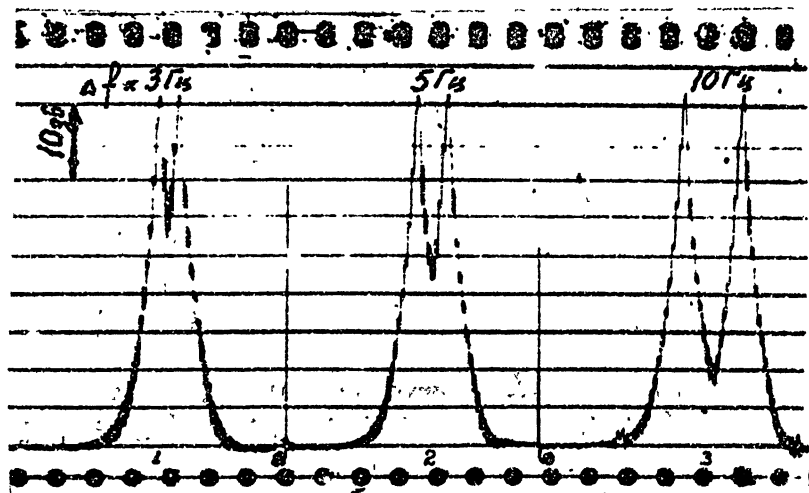
- Фиг. 1. Структурная схема анализатора.
- Фиг. 2. Выделение анализатором синхронного гармонического сигнала из аддитивной смеси его с шумом.
- Фиг. 3. Разрешение анализатором двух гармонических сигналов равной амплитуды.
- Фиг. 4. Выделение анализатором виброактивности редукторов гармонического сигнала из аддитивной смеси его с шумом.
- Фиг. 5. Разрешение анализатором виброактивности редукторов сигналов равной амплитуды.
- Фиг. 6. Структурная схема анализатора спектральной плотности мощности.
- Фиг. 7. а) разрешение макетом двух сигналов, отличающихся по частоте на 2 Гц.
б) выделение сигнала из шума.
- Фиг. 8 а) частотная характеристика макета анализатора инфранизких частот,
б) разрешение макетом сигналов, отличающихся по частоте на 0,3 Гц.



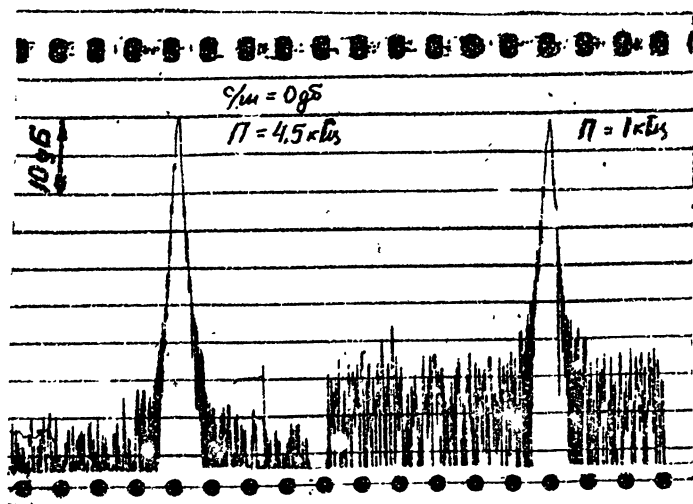
Фиг. 1.



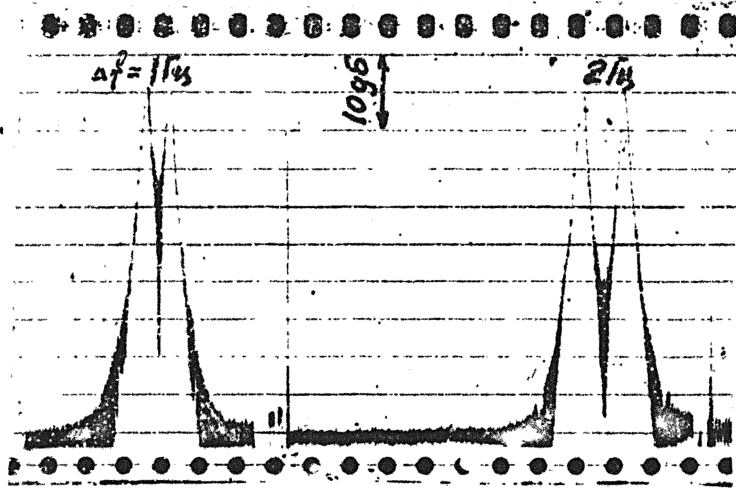
Фиг. 2.



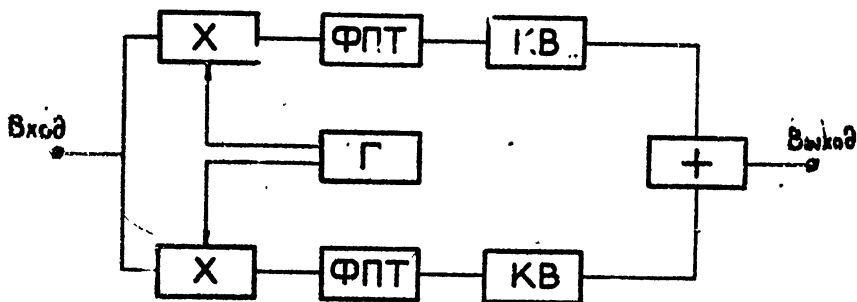
Фиг. 3.



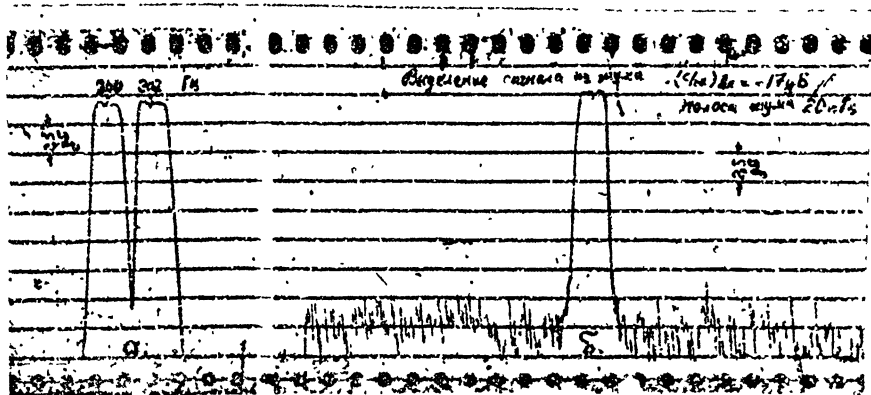
Фиг. 4.



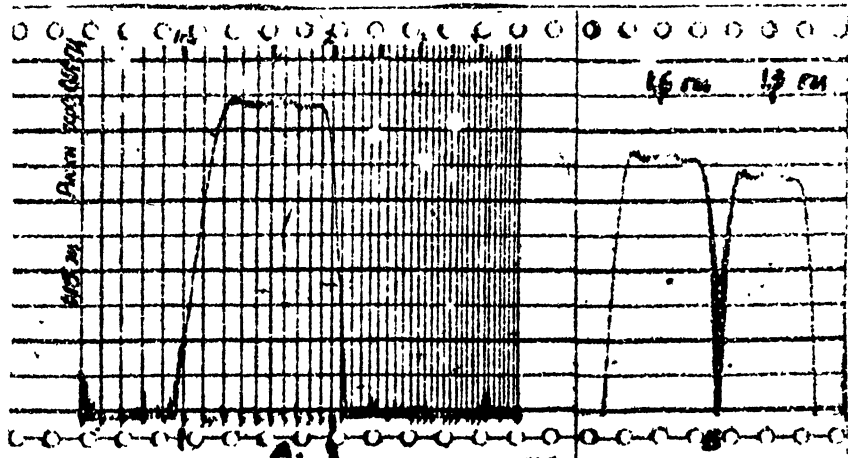
Фиг. 5.



Фиг. 6.



Фиг. 7.



Фиг. 8.