

А. И. Комаров

**ПРИСТАВКА К ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
МАШИНЕ «УРАЛ-1»
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Изучение поведения систем автоматического управления, измерительных и следящих систем при наличии случайных воздействий приводило к необходимости создания приборов, дающих характеристики случайных процессов, лежащих в диапазоне частот от 0 до нескольких сотен *гц*.

Частотные характеристики различных указывающих и самопишущих приборов, например, автоматических компенсаторов, мостов и т. д., требуют исследования случайных процессов со спектром в пределах от 0 до нескольких *гц*. Кроме того, целый ряд физических явлений может быть представлен в виде случайного процесса, спектральная плотность которого лежит в указанных пределах. (Напряжение на шинах высокого напряжения узловых станций и подстанций, колебания поверхности воды в какой-либо точке океана, ряд метеорологических и биологических явлений и т. д.).

Существует целый ряд приборов [1], [2], [4], которые позволяют определять математические ожидания, дисперсии и корреляционные функции рассматриваемых процессов, однако все они представляют сложные устройства, включающие в себя суммирующие, перемножающие, интегрирующие блоки и блоки задержки.

Большое время задержки (порядка десятка секунд и даже минут) требует записи сигнала на каком-либо носителе: бумаге, магнитной ленте и т. п.

Применение специальных методов определения корреляционной функции [3], [5] также приводит к выполнению весьма сложных вычислительных устройств.

Применение трансформации спектра [6] дает возможность упростить схему коррелятора, однако и в данном случае прибор остается достаточно сложным.

В настоящее время все шире и шире начинают применяться в вопросах исследования различного рода цифровые машины, которые так же могут быть применены и для исследования случайных процессов. Однако, при указанном использовании цифровой машины требуется большая дополнительная обработка кривой реализации случайного процесса, перед вводом данных в машину или применение специального устройства, преобразования непрерывной величины в дискретную и связи этого устройства с машиной. Если исследуемый случайный процесс протекает очень медленно, то его запись приходится делать на бумаге, пленке и т. д. Создание преобразования непрерывной величины, зафиксированной на бумажной ленте, в цифровой код приводит к необходимости применения различного рода следящих систем. Т. о. приставка к цифровой машине, автоматизирующая вычисление случайного процесса, имеющего низкочастотный спектр, сама является весьма сложной и дорогостоящей.

В Куйбышевском политехническом институте на кафедре «Вычислительной техники» под руководством автора была разработана приставка к вычислительной машине «Урал—1», использующая в своей работе отдельные блоки цифровой машины.

Приставка позволяет вводить в машину в двоичной форме ординаты кривой, записанной на 35 мм перфорированной киноленте. Это дает возможность использовать при исследовании низкочастотных случайных процессов хорошо зарекомендовавшие себя отечественные осциллографы МПО-2 и Н-102.

Выберем необходимые параметры и оценим точность работы такой приставки.

Пусть исследованию подлежит случайный процесс со спектральной плотностью

$$s(\omega) = \begin{cases} s & \omega_1 < \omega < \omega_2; \\ 0 & \omega_2 < \omega; \omega < \omega_1. \end{cases}$$

Корреляционная функция такого процесса

$$R(\tau) = \frac{D_x}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \frac{\sin \omega_2 \tau - \sin \omega_1 \tau}{\tau},$$

где $D_x = s(\omega_2 - \omega_1)$ — дисперсия процесса.

Нормированную корреляционную функцию можно найти из выражения

$$k(\tau) = \frac{\sin \omega_2 \tau - \sin \omega_1 \tau}{(\omega_2 - \omega_1) \tau},$$

а ее модуль можно оценить следующим неравенством

$$|k(\tau)| \leq \frac{2}{(\omega_2 - \omega_1) \tau}. \quad (1)$$

Из последнего выражения можно найти τ_{\max} положив

$$k(\tau_{\max}) = \frac{1}{100}.$$

$$\tau_{\max} > \frac{2 \cdot 100}{2\pi(f_2 - f_1)} = \frac{32}{f_2 - f_1}. \quad (2)$$

$$m_x = 0.$$

Будем считать в дальнейшем, что все рассматриваемые случайные процессы подчиняются нормальному закону распределения и имеют математическое ожидание

$$m_x = 0.$$

Относительная погрешность, возникающая из-за конечности времени усреднения реализации случайного процесса, может быть найдена по формуле

$$\delta_2(T, \tau) = \frac{\sigma^2(T, \tau)}{R^2(0)} = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \theta) [k^2(\theta) + k(\theta + \tau)k(\theta - \tau)] d\theta.$$

Для нашего случая

$$\delta_2(T, \tau) = \frac{2}{T^2(\omega_2 - \omega_1)^2} \int_0^T (T - \theta) \left\{ \frac{(\sin \omega_2 \theta - \sin \omega_1 \theta)^2}{\theta^2} + \frac{[\sin \omega_2(\theta + \tau) - \sin \omega_1(\theta + \tau)][\sin \omega_2(\theta - \tau) - \sin \omega_1(\theta - \tau)]}{(\theta + \tau)(\theta - \tau)} \right\} d\theta. \quad (3)$$

при $\omega_1 = 0$ и $\tau = 0$.

$$\delta_2(T, 0) = \frac{4}{T^2 \omega_2^2} \int_0^T (T - \theta) \frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta^2} d\theta =$$

$$= \frac{4}{T \omega_2^2} \int_0^T \frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta^2} d\theta = \frac{4}{T^2 \omega_2^2} \int_0^T \frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta} d\theta$$

при $\theta > \tau_{\max}$.

$\frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta^2}$ близко к нулю, а интеграл

$$\int_0^T \frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta} d\theta < \omega_2 \frac{\pi}{2}.$$

Если T кратное $\frac{2\pi}{\omega_2}$, то можно написать

$$\int_0^T \frac{\sin^2 \omega_2 \theta}{\theta} d\theta \approx \frac{1}{2} \ln \frac{T \cdot 2\omega_2}{\pi}.$$

т. о. будем иметь

$$\delta^2(T, 0) \approx \frac{1}{Tf_2} \frac{2 \left(1 + \ln \frac{T2\omega_2}{\tau} \right)}{T^2\omega_2^2}$$

или

$$\delta^2(T, 0) = \frac{1}{Tf_2}, \text{ где } f_2 = \frac{\omega_2}{2}, \quad (4)$$

при $\tau = 0$ и $\omega_1 = 0$

$$\begin{aligned} \delta^2(T, 0) &= \frac{4}{T^2(\omega_2 - \omega_1)^2} \int_0^T (T - \theta) \frac{(\sin \omega_2 \theta - \sin \omega_1 \theta)^2}{\theta^2} d\theta \\ &= \frac{4}{T(\omega_2 - \omega_1)^2} \int_0^T \frac{(\sin \omega_2 \theta - \sin \omega_1 \theta)^2}{\theta^2} d\theta \\ &= \frac{4}{T^2(\omega_2 - \omega_1)^2} \int_0^T \frac{(\sin \omega_2 \theta - \sin \omega_1 \theta)^2}{\theta} d\theta; \end{aligned}$$

т. к. второй интеграл последнего равенства неотрицателен и время интегрирования стоит в знаменателе в квадрате, то оценить погрешность можно следующим выражением:

$$\delta^2(T, 0) \approx \frac{4}{T(\omega_2 - \omega_1)^2} \int_0^T \frac{(\sin \omega_2 \theta - \sin \omega_1 \theta)^2}{\theta} d\theta,$$

при T кратном $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ после некоторых преобразований можно найти, что

$$\delta^2(T, 0) = \frac{1}{T(f_2 - f_1)}. \quad (5)$$

Правильность полученных неравенств (4) и (5) была проверена путем точного вычисления выражения (3) на цифровой машине.

Кроме того, на цифровой машине были найдены зависимости погрешностей δ от сдвига τ при различных пределах интегрирования T . Одна из таких кривых при $\omega_2 = 2\pi 200$ и $T = 1$ сек дана на рис. 1.

В большинстве случаев, однако, случайный процесс не имеет равномерной спектральной плотности. Поэтому представляет интерес так же рассмотреть более общий случай. Пусть теперь случайный процесс имеет непрерывную спектральную плотность, изменяющуюся линейно $S(\omega)$ в диапазоне частот от ω_1 и ω_2 и в

крайней точке этого диапазона принимающую максимальное значение s_{\max} . Рассмотрим в этом случае выражение корреляционных функций в виде:

$$R(\tau) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} s(\omega) \cos \omega \tau d\omega.$$

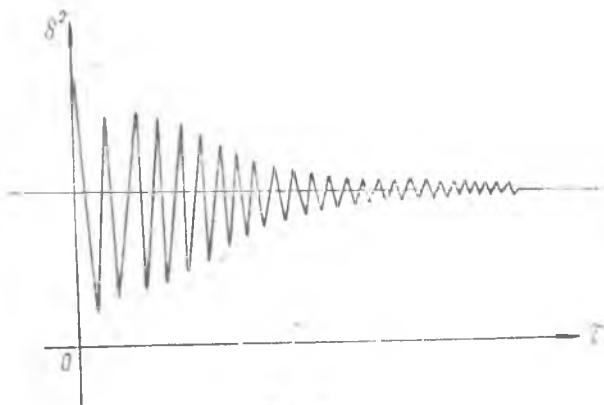


Рис. 1.

Запишем последнее выражение следующим образом:

$$R(\tau) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} [s_0 + L(\omega - \omega_1)] \cos \omega \tau d\omega.$$

Можно дать следующую оценку последнего интеграла.

$$|R(\tau)| \leq \frac{2S_{\max}}{\tau}.$$

Значение корреляционной функции при $\tau=0$ равно:

$$R(0) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} s(\omega) d\omega = D_x,$$

а модуль нормированной корреляционной функции оценится из выражения

$$k |(\tau)| = \frac{|R(\tau)|}{R(0)} \leq \frac{D_{\max} 2}{D_x \tau (\omega_2 - \omega_1)} = \frac{2p}{\tau (\omega_2 - \omega_1)}, \quad (6)$$

где $D_{\max} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} s_{\max} d\omega$ — дисперсия случайного процесса с равномерной спектральной плотностью s_{\max} в диапазоне частот от ω_1 до ω_2 .

$p = \frac{D_{\max}}{D_x}$ — коэффициент заполнения спектральной плотности $s(\omega)$.

Из выражения (6) можно найти

$$\tau = \frac{2p}{|k(\tau)|(\omega_2 - \omega_1)} = \frac{m}{|k(\tau)|}. \quad (7)$$

Учитывая свойства нормированной корреляционной функции

$$|k(\tau)| \leq 1,$$

можно неравенство (6) записать в следующем виде:

$$|k(\tau)| \leq 1 \text{ при } 0 \leq \tau \leq m, \quad (8)$$

$$|k(\tau)| \leq \frac{m}{\tau} \text{ при } \tau > m.$$

Относительная погрешность, вызванная конечностью времени учреднения, может быть оценена по формуле

$$\begin{aligned} \delta^2(T, \tau) &= \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \theta) k^2(\theta) d\theta + \\ &+ \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \theta) |k(\theta - \tau)| \cdot |k(\theta + \tau)| d\theta; \end{aligned} \quad (9)$$

при $\tau = 0$ используя неравенство (8) можно найти

$$\begin{aligned} \delta^2(T, 0) &= \frac{4}{T^2} \int_0^T (T - \theta) k^2(\theta) d\theta = \frac{4}{T^2} \int_0^m (T - \theta) d\theta + \\ &+ \frac{4m}{T^2} \int_m^T \frac{T - \theta}{\theta^2} d\theta = \frac{8m}{T} - \frac{4m^2}{T^2} \left(\frac{3}{2} + \ln \frac{T}{m} \right) \end{aligned}$$

или, пренебрегая вторым слагаемым, получим:

$$\delta^2(T, 0) \leq \frac{8m}{T} = \frac{8ip}{T(\omega_2 - \omega_1)}. \quad (10)$$

Уточним формулу (6) для нескольких частных случаев, имея в виду, что спектральная плотность случайного процесса определена внутри интервала частот от ω_1 до ω_2 . Вне этого интервала спектральная плотность равна нулю. Математические ожидания всех рассматриваемых процессов также равны нулю.

$$1. s(\omega) = s_{\max} \frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \text{ при } \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2.$$

Нормированная корреляционная функция $k(\tau)$ может быть найдена по формуле.

$$\begin{aligned} k(\tau) &= \frac{s_{\max}}{R(0)(\omega_2 - \omega_1)} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (\omega - \omega_1) \cos \omega \tau d\omega \\ &= \frac{2 \sin \omega_2 \tau}{(\omega_2 - \omega_1) \tau} \cdot \frac{2 (\cos \omega_2 \tau - \cos \omega_1 \tau)}{(\omega_2 - \omega_1)^2 \tau^2}. \end{aligned}$$

Пренебрегая вторым слагаемым, как величиной второго порядка малости, можно написать

$$|k(\tau)| \leq \frac{2}{(\omega_2 - \omega_1)\tau}. \quad (11)$$

2. $s(\omega) = s_{\max} \frac{\omega_2 - \omega}{\omega_2 - \omega_1}$ при $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$.

$$k(\tau) = \left[\frac{2 \sin \omega_1 \tau}{(\omega_2 - \omega_1)\tau} + \frac{2 (\cos \omega_2 \tau - \cos \omega_1 \tau)}{(\omega_2 - \omega_1)^2 \tau^2} \right]$$

или

$$|k(\tau)| \leq \frac{2}{(\omega_2 - \omega_1)\tau}. \quad (12)$$

3.

$$s(\omega) = \begin{cases} s_{\max} \frac{\omega - \omega_1}{\omega_0 - \omega_1} \\ s_{\max} \frac{\omega_2 - \omega}{\omega_2 - \omega_0} \end{cases}$$

Для данного случая можно найти следующую оценку

$$|k(\tau)| \leq \frac{2(\omega_2 - \omega_1)}{(\omega_2 - \omega_0)(\omega_0 - \omega_1)\tau}. \quad (13)$$

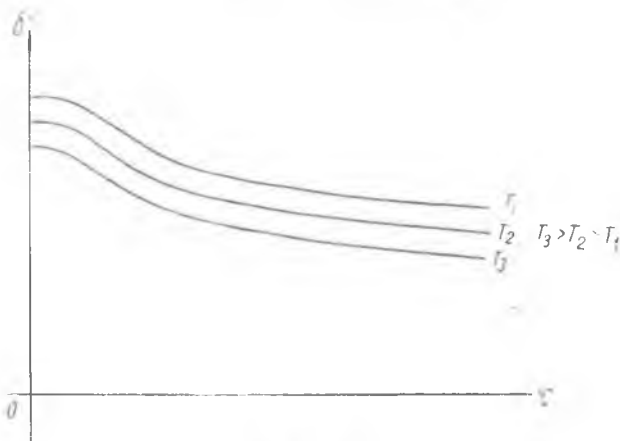


Рис. 2.

На рис. 2 показаны зависимости погрешности $\delta^2(T, \tau)$ от τ при различных значениях времени интегрирования T . Из кривых можно предположить, что для нормального случайного процесса погрешность, вычисленная по формуле (9), убывает с увеличением τ . Поэтому при оценке погрешности определения любой ординаты корреляционной функции нормального случайного процесса можно воспользоваться выражением (10). Максимальное значение сдвига τ_{\max} можно оценить из неравенства (6), (11), (12), (13).

Если продолжительность записи случайного процесса определена выражением (10), то длина пленки, на которой этот процесс записывается, определяется также параметрами приставки. Приставка состоит из блока считывания импульсов и функциональной схемы, преобразующей полученные импульсы и выдающей сигналы в сумматор и устройство управления машины. Принципиальная схема блока считывания импульсов показана на рис. 3. На

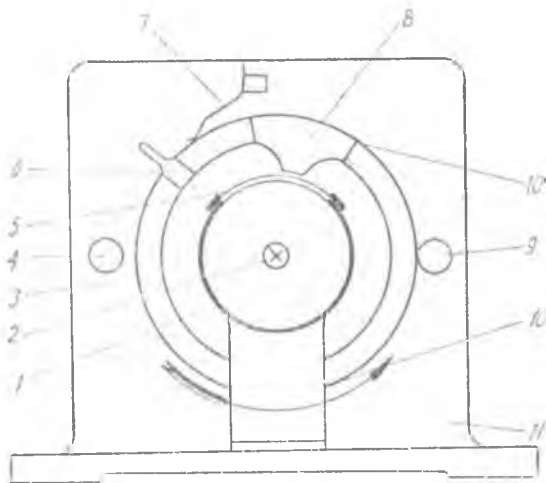


Рис. 3.

специальной плате 11 установлен цилиндр 1, в центре которого помещена точечная лампа накаливания 2. Против щели, сделанной вдоль окружности цилиндра 1, помещена в специальных направляющих 35 мм перфорированная пленка с записанным на ней случайным процессом. Пленка может продвигаться вдоль цилиндра 1 (перпендикулярно плоскости чертежа). Снаружи цилиндра 1 помещен цилиндр 3, который может вращаться на специальном подшипнике. Пленка с кривой проходит сквозь цилиндр 3, располагаясь внутри него. На вращающемся цилиндре 3 размещены фотодиод на специальной оправке 8, два токосъемных кольца, посредством которых с помощью щеток 7 снимается сигнал с фотодиода, кольцо с рисками, расположенное против магнитной головки 9 и флажок 6. Количество рисок сделано такое, чтобы при прохождении отверстия фотодиода над щелью, с магнитной головки снималось не менее 100 импульсов.

При вращении цилиндра 3 флажок 6 проходит через щель головки 4, которая представляет из себя расположенные противоположно лампу и фотодиод. Импульс с фотоголовки 4 служит для синхронизации работы приставки с машиной и запуска шагового двигателя, подвигающего пленку на 1,3 мм после снятия каждой ординаты.

Цилиндр 3 вращается от специального мотора через ременную передачу 10.

Наряду с описанной конструкцией в институте разработан и пущен в эксплуатацию второй вариант приставки, позволяющий снимать ординаты с кривой, написанной тушью на кальке, шириной 120 мм. В этом варианте наружный цилиндр 3 заменен враща-

ющейся Г-образной штангой. Взаимное расположение фотодиода, кальки и лампы в этом случае схематично показано на рис. 4. При движении фотодиода над освещенной поверхностью с него начинает сниматься сигнал помехи, вызванный неоднородностью носителя.

Величина помехи может достигать значительных размеров. Толщина записи графика на носителе и величина диафрагмы фотодиода выбираются таким образом, чтобы величина полезного сигнала была бы в два—три раза больше помехи. Для нашего случая при работе с пленкой толщина записи и диафрагма фотодиода берутся равными 0,6—0,8 мм.

Для кальки эти размеры равны 1—1,2 мм. Кроме того, дополнительные исследования показали, что путем изменения смещения на фотодиоде можно в значительной мере ослабить сигнал помехи. Величина смещения устанавливается экспериментально для каждого фотодиода и равна нескольким вольтам.

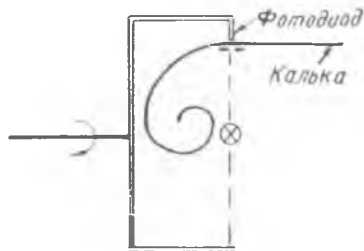


Рис. 4.

Функциональная схема приставки дана на рис. 5, а временная диаграмма ее работы показана на рис. 6. При нажатии кнопки «Пуск», по заднему фронту первого же импульса с усилителя $У_5$, $Тр_1$, ставится в единичное состояние. При этом снимается низкий уровень со сбросового входа $Тр_{10}$ и открываются СП5₃ и СП5₇. Однако СП5₃ закрыта низким уровнем с единичного выхода $Тр_{10}$. Поэтому импульсы с магнитной головки 9 через усилитель $У_6$ пройдут вначале через СП5₇ и через усилитель $У_8$ поступят на 28-й разряд сумматора арифметического устройства. После считывания первой ординаты по заднему фронту импульса с триггера $Тр_2$ триггер $Тр_{10}$ перебрасывается в единичное состояние, открывая тем самым СП5₃ и закрывая СП5₇.

Импульсы, пропорциональные следующей ординате, пройдут через СП5₃ и поступят в 19-й разряд сумматора арифметического устройства. После просчета второй ординаты через схему совпадения СП3₁₃ и инвертор $И_4$ поступает импульс в блок пуска машины и начинается выполняться следующая программа.

$$K \quad 25 \quad \frac{n}{2} - 1$$

$$K + 1 \quad 01 \quad 0000$$

$$K + 2 \quad - \quad 16 \quad b$$

$$K + 3 \quad 37 \quad 0000$$

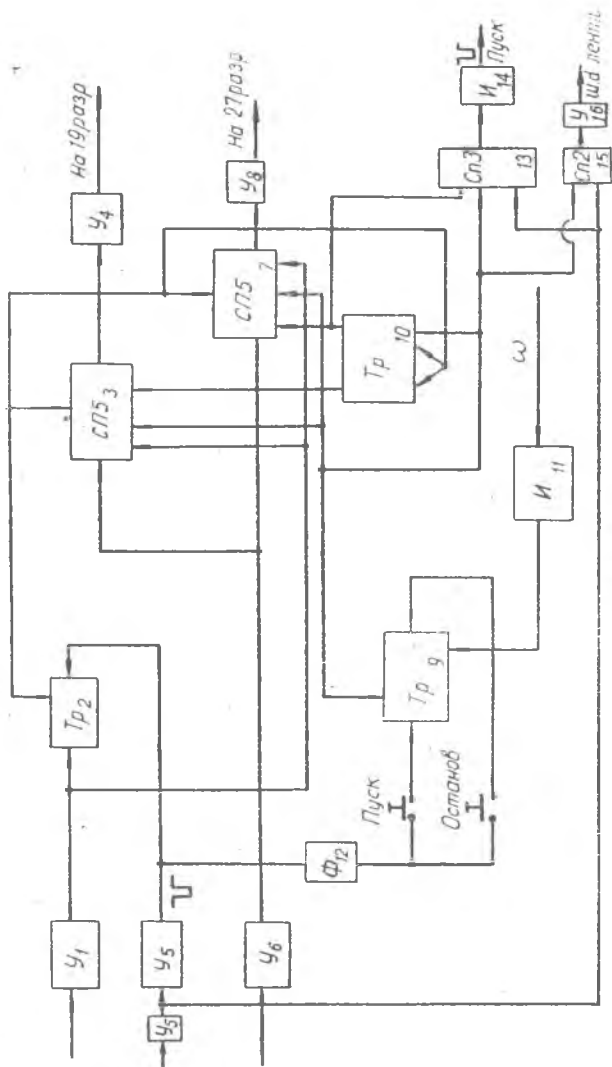


Рис. 5

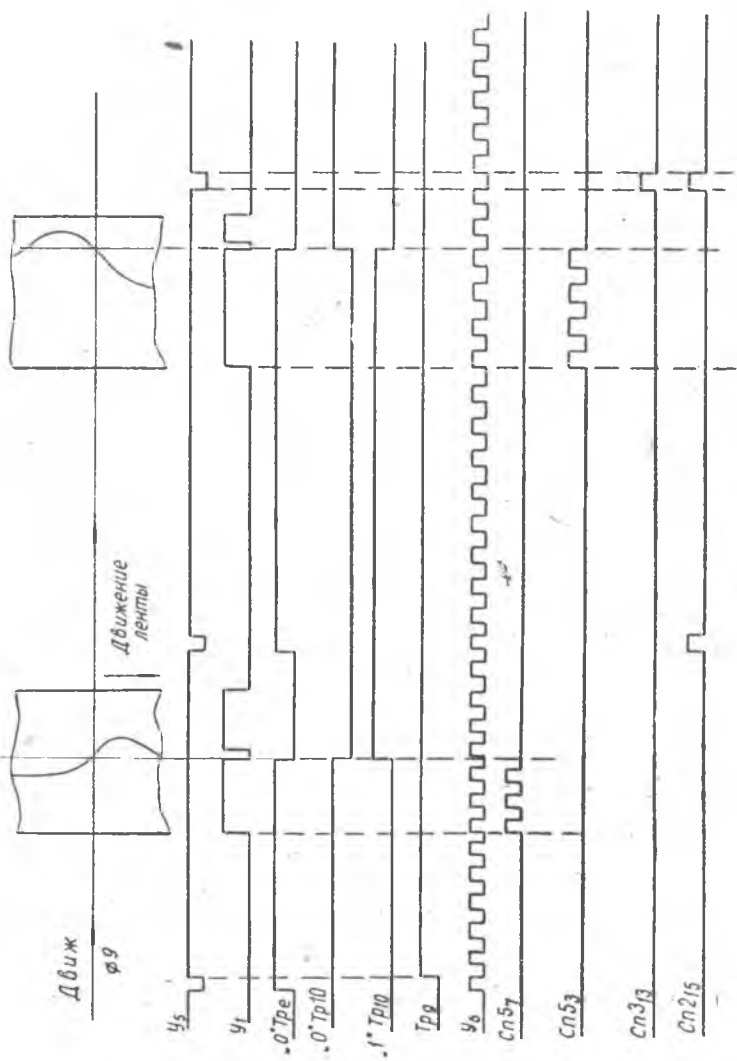


Рис. 6.

где n — число ординат кривой, которые надо ввести в машину
 b адрес последней ячейки.

В ячейке 0000 записан нуль. Команда 010000 введена в связи с переделкой машины. Как видно из программы, число n должно быть всегда четным.

Вначале, перед пуском приставки, с пульта передается управление в ячейку k . Первые две ординаты запишутся в неполную ячейку с номером $b - \left(\frac{n}{2} - 1\right)$. Машина остановится по $K + 3$ ячейке и сбросит сумматор.

Далее работа приставки идет аналогичным образом. После переписи всех n ординат в $\frac{n}{2}$ неполных ячеек машина останавливается по $K + 5$ ячейке с выборкой на сумматор отрицательного числа. Появившийся признак ω останавливает приставку.

Для того, чтобы указанная программа могла выполняться в промежутке времени, за который фотодиод, укрепленный на оправке 8, проходит расстояние под цилиндром 1, не занятое щелью, необходимо правильно подобрать скорость вращения цилиндра 3. У выполненной приставки наружный диаметр цилиндра 1 равен 35 мм, поэтому рабочая поверхность пленки, равная 24 мм займет промежуток, меньший $\frac{1}{3}$ длины окружности цилиндра 1. Скорость вращения цилиндра 3 взята равной 600 об/мин. При этом $\frac{1}{3}$ оборота цилиндр 3 сделает за время

$$t_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{60}{600} = \frac{1}{15} = 0,067 \text{ сек.}$$

Выполнение одного цикла принятой программы произойдет за время

$$t_2 = \frac{1}{100} \cdot 6 = 0,06 \text{ сек.}$$

так как $t_2 < t_1$, то приставка будет работать нормально.

Запись двух ординат кривой оказалась возможной в одной неполной ячейке исходя из следующих соображений. Всего в неполной ячейке машины «Урал-1» имеется 18 разрядов. Если один разряд выделить под знак ординаты, то для записи самой ординаты остается 8 двоичных разрядов. В этих разрядах можно записать 255 импульсов чего вполне достаточно для отсчета ординаты с точностью 0,5%. Такое использование ячеек барабана дает возможность увеличить оперативную память машины вдвое, что особенно важно при вычислении корреляционных функций.

Так как при помощи приставки непрерывная функция заменяется рядом дискретных значений, то корреляционная функция будет определяться по формуле.

$$k(j) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l x_{l+j}, \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

где n — число ординат исследуемой функции.

Программа, вычисляющая корреляционную функцию по этой формуле, содержит 210 неполных ячеек. Для записи ординат остается $2048 - 210 = 1838$ ячеек, или в нашем случае на магнитном барабане можно записать 3676 ординат.

Рассматривая каноническое разложение стационарного случайного процесса и его корреляционной функции можно отметить, что и в том и в другом случае координатными функциями этих разложений являются косинусы и синусы одной и той же частоты. Т. о., спектры стационарного случайного процесса и его корреляционной функции находятся в одних и тех же пределах и для их замены дискретными значениями можно взять один и тот же шаг между отдельными ординатами.

Используя теорему Котельникова для достаточно точного воспроизведения случайной функции можно взять шаг между соседними ординатами

$$\Delta = \frac{\pi}{\omega_2} \text{ сек.},$$

т. к. в нашей приставке шаг продвижения ленты равен 1,3 мм., то скорость движения ленты при записи случайного процесса шлейфовым осциллографом должна определяться неравенством

$$v_{\text{зап}} \geq 1,3 \frac{\omega_2}{\pi} \text{ мм/сек.}$$

Найдем необходимое время записи случайного процесса с корреляционной функцией, оцененной неравенством (11) или (12). Относительную погрешность δ примем равной 4%. Для нашего случая коэффициент

$$m = \frac{2}{\omega_2 - \omega_1}.$$

Время интегрирования найдется из выражения

$$T > \frac{8m}{\delta^2} = \frac{16}{(\omega_2 - \omega_1) \delta^2}$$

при $\omega_2 = 2\pi \cdot 200$ и $\omega_1 = 2\pi$

$$T = \frac{16 \cdot 625}{2\pi \cdot 199} = 8 \text{ сек.}$$

Скорость записи

$$v \geq 1,3 \frac{2\pi \cdot 200}{\pi} = 520 \text{ мм/сек.}$$

Длина пленки

$$L = 520 \text{ мм сек.} \cdot 8 \text{ сек.} = 4200 \text{ мм} = 4,2 \text{ м.}$$

Время записи должно быть увеличено на величину τ_{\max} по сравнению со временем интегрирования. Если считать, что связь между ординатами случайного процесса будет отсутствовать при

$$k(\tau_{\max}) \leq \frac{1}{100},$$

то τ_{\max} можно найти из выражения:

$$\tau_{\max} \geq \frac{2 \times 100}{2\pi \times 199} = 0,16 \text{ сек.}$$

Т. о., время записи будет равно

$$T_{\text{зап}} = T + \tau_{\text{зап}} = 8,16 \text{ сек.}$$

Число ординат, которое при этом необходимо ввести в машину будет равно

$$n = \frac{T_{\text{зап}}}{\Delta} = \frac{8,16 \text{ сек} \cdot 200}{\pi} = 3264.$$

Более детальные подсчеты показывают, что при использовании оперативной памяти машины можно подсчитывать автокорреляционные функции с точностью от 2-х до 7—8 процессов в зависимости от характера спектральной плотности процесса. При необходимости получить более высокую точность или при вычислении взаимокорреляционных функций следует прибегать к памяти на магнитной ленте.

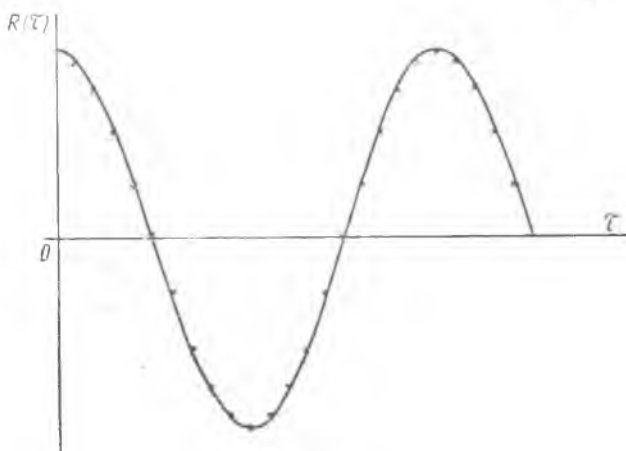


Рис. 7.

На рис. 7 показана корреляционная функция синусоиды, определенная при помощи приставки для $T=40$ периодам. Как видно из рисунка, полученная кривая мало отличается от расчетной.

Применение указанной приставки значительно облегчило производство вычислительных работ при определении корреляционных функций случайных процессов. Время, необходимое для вычисления корреляционной функции, складывается из времени ввода и времени вычисления ординат. При вводе кривой в машину пленка движется со скоростью 13 мм/сек. (10 ординат в секунду, что соответствует скорости вращения цилиндра 3 равной 600 об/мин). Т. о. максимальное время ввода кривой на магнитный барабан машины равно

$$t_{\text{max}} = \frac{3600}{10} = 360 \text{ сек} = 6 \text{ мин.}$$

На вычисление отдельной ординаты корреляционной функции при $n=3600$ затрачивается около трех минут.

При использовании магнитной ленты время вычисления соответственно увеличивается.

В заключение необходимо отметить, что данная приставка может быть использована для различных других исследований кривых, записанных на пленке, а также в качестве датчика случайных чисел при решении уравнений методом Монте-Карло.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Новиков. Магнитный коррелограф (математическая вычислительная машина для статистической обработки случайных процессов большой длительности). Изд. ин-та технико-экономической информации А. Н. СССР, 1956.
2. Б. М. Бабурин. Коррелограф-прибор для вычисления корреляционных функций низкочастотных процессов. Применение вычислительной техники для автоматизации производства. Машгиз, 1961.
3. А. А. Свешников. Прикладные методы теории случайных функций. Судпромгиз, 1961.
4. В. В. Солодовников. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Физматгиз, 1960.
5. D. G. Lampard. A new method of determining Stationary time series. Prod. Inst. Electr. Engrs 1955. С 102, № 1.
6. А. И. Комаров. Применение трансформации спектра при определении корреляционных функций случайных процессов, лежащих в области низких частот. Известия Высших учебных заведений. «Приборостроение» том V, № 3, 1962.
7. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. Госэнергоиздат, 1961.