

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А.-Б. Ахмадов и В. П. Кашлев. Электронный фазометр. Авт. свидетельство № 301639.— ИПОТЗ, 1971, № 14.
2. А. А.-Б. Ахмадов и В. П. Кашлев. Электронный компенсационный фазометр. Авт. свидетельство № 309313.— ИПОТЗ, 1971, № 22.
3. М. В. Верзунов, И. В. Лобанов, А. М. Семенов. Однополосная модуляция. М., «Связь», 1962.
4. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. Специальные функции. М., «Наука», 1964.
5. А. А.-Б. Ахмадов, Н. П. Зимин, Ю. А. Иловайский, В. П. Кашлев. Особенности построения компенсационных фазометрических устройств на диапазон 20 Гц — 100 кГц.— Тезисы докладов на XX Республиканской конференции, посвященной Дню радио. Киев, 1970.

*Поступило в редакцию 25 декабря 1970 г.,
окончательный вариант — 21 января 1972 г.*

УДК 681 : 327.5.21

И. М. САХАРОВ
(Новосибирск)

О СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ШУМА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Автоматические устройства кодирования и ввода в ЭВМ изображений, в которых сканирующий узел выполнен на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) высокого разрешения, получили в настоящее время широкое распространение. Точность таких систем ввода определяется суммарной погрешностью, которая обусловлена шумами датчика света, шумами приемника света (ФЭУ), шумами носителя информации (кино- и фотоматериала), а также погрешностями квантования и интерполяции. Знание составляющих погрешности позволяет определить потенциальные возможности и оптимизировать параметры системы ввода. Исследованию отдельных составляющих суммарной погрешности: шумов ФЭУ, погрешности квантования и интерполяции — посвящено много работ. Известные же из литературы сведения о шумах люминофора ЭЛТ ограничены и противоречивы. Так, в [1] шум ЭЛТ на выходе ФЭУ принимается равномерным. В [2] указано, что шум ЭЛТ с мелкозернистым люминофором имеет максимум в области пространственных частот $m=0,6\div 6$ лин/мм.

В статье изложены результаты измерений спектральных характеристик шума ЭЛТ и определены их зависимости от диаметра сканирующего луча и скорости сканирования.

Принцип измерения спектра шума ЭЛТ основан на преобразовании пространственного шума ЭЛТ в шумоподобный электрический сигнал и измерении последнего путем узкополосной частотной фильтрации. Для определения двумерного пространственного спектра по одномерному временному (электрическому) спектру необходимо проводить сканирование пространственным фильтром типа «щель», ширина которого меньше полупериода самой высокочастотной составляющей пространственного спектра [3]. Известно, что размер зерен ЭЛТ высокого разрешения [2, 4] меньше 3 мкм. Таким образом, для измерения пространственного спектра необходима щель шириной менее 3 мкм. Создать на экране штрих шириной 3 мкм технически трудно. Кроме того, с уменьшением ширины щели коэффициент передачи фильтра уменьшается и шум ЭЛТ на выходе ФЭУ становится соизмеримым с шумом ФЭУ, что затрудняет измерения шума.

В данной работе сканирование осуществлялось круговой разверткой ($f_1=14,7$ Гц; $f_2=67$ Гц) лучом, имеющим закон распределения плотности тока луча близким к нормальному. Структурная схема экспериментальной установки измерения спектральных характеристик шума ЭЛТ показана на рис. 1. Фокусировка, коррекция астигматизма и измерения радиуса луча ЭЛТ осуществлялись при отклонении луча ЭЛТ на расстояние, равное радиусу круга сканирования. Радиус луча ЭЛТ измерялся объективным способом [5] с помощью оптической решетки с шагом 96 мкм путем сканирования по строке длиной 2 мм.

Для исключения влияния на результаты измерения неравномерности чувствительности ФЭУ по поверхности фотокатода применен конденсор. Спектр шума измерялся анализатором спектра типа С4-14 (при измерении характеристик шума ЭЛТ полупрозрачное зеркало 3 из оптического канала выводилось). На рис. 2, 3 приведены

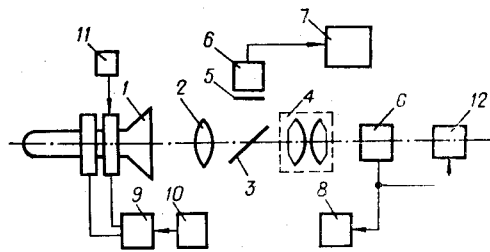


Рис. 1. Структурная схема установки измерения:

1 — электронно-лучевая трубка; 2 — объектив; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — конденсор; 5 — оптическая решетка; 6 — фотоэлектронный умножитель ФЭУ-13; 7 — осциллограф; 8 — анализатор; 9 — усилитель круговой развертки; 10 — задающий генератор; 11 — генератор пилообразного напряжения; 12 — вольтметр.

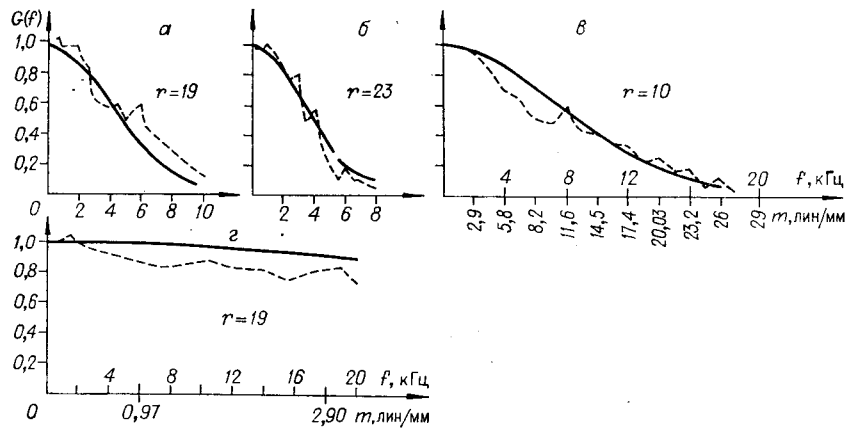


Рис. 2. Зависимость спектра шума ЭЛТ от радиуса луча r (мкм) и скорости сканирования v :

а, б, в — $v=0,69$ м/с; г — $v=6,2$ м/с; — — — экспериментальная кривая; — — — теоретическая кривая.

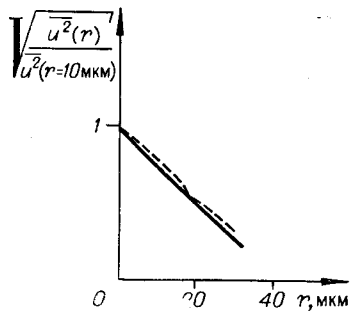


Рис. 3. Зависимость средне-квадратичного значения шума ЭЛТ от радиуса луча.

экспериментально измеренные (штриховые линии) нормированные характеристики шума ЭЛТ в зависимости от радиуса луча ЭЛТ и скорости сканирования.

Экспериментально полученные результаты можно объяснить методами теории спектрального анализа.

Известно, что коэффициент светоотдачи люминофора A_1 не постоянен по полю экрана ЭЛТ. Представим A_1 , как принято [2, 8—10], в виде суммы двух слагаемых

$$A_1(x, y) = A_0 + A(x, y), \quad (1)$$

где A_0 — среднее значение коэффициента светоотдачи люминофора; $A(x, y)$ — случайная стационарная функция, характеризующая изменение светоотдачи люминофора по полю экрана ЭЛТ.

Сканирование экрана ЭЛТ производится пучком электронов, имеющим распределение плотности тока катода, близкое к нормальному [6]:

$$\rho_k(x, y) = \rho_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}.$$

Распределение плотности тока луча имеет вид

$$\rho_l(x, y) = \rho_0 \alpha e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент перехвата, учитывающий какая часть тока катода достигает экрана ЭЛТ;

$$I_k = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_k(x, y) dx dy, \quad (3)$$

где I_k — ток катода ЭЛТ. Определив из уравнения (3) значение ρ_0 и подставив его в (2), получим

$$\rho_l(x, y) = \frac{I_k}{2\pi r} e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}$$

Яркость свечения экрана в рабочем диапазоне плотности тока луча примерно пропорциональна последней [6]. Представим яркость пятна $B(x, y)$ в виде суммы двух слагаемых $B(x, y) = B_1(x, y) + \Delta B(x, y)$:

$$\Delta B(x, y) = c \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(v, \eta) \rho_l(x-v, y-\eta) dv d\eta; \quad (4)$$

$$B_1(x, y) = c A_0(x, y) = B_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}},$$

где c — коэффициент пропорциональности, учитывающий скорость электронов, физические свойства и толщину слоя люминофора; $B(x, y)$ — среднее значение яркости пятна ЭЛТ; $\Delta B(x, y)$ — случайная стационарная функция, характеризующая изменение яркости пятна по полю экрана ЭЛТ.

Можно показать [3], что на выходе ФЭУ средний квадрат реакции $\overline{U^2}$ на случайный сигнал (дисперсия), определяемый уравнением (4), выражается зависимостью

$$\overline{U^2} = \frac{cR^2 d R_0}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\rho_l(\omega_x, \omega_y)|^2 |K(\omega_x, \omega_y)|^2 A(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y, \quad (5)$$

где R — сопротивление нагрузки ФЭУ; d — коэффициент, учитывающий площадь входного зрачка объектива и расстояние от ЭЛТ до ФЭУ; R_0 — коэффициент усиления ФЭУ; ω_x, ω_y — круговая пространственная частота по оси x и y соответственно; $K(\omega_x, \omega_y)$ — пространственная передаточная функция оптической системы; $A(\omega_x, \omega_y)$ — спектр Хинчина — Винера флюктуаций коэффициента светоотдачи люминофора; $\rho_l(\omega_x, \omega_y)$ — пространственная передаточная функция апертуры луча ЭЛТ. Согласно [7],

$$\rho_l(\omega_x, \omega_y) = I_k \alpha e^{-\frac{r^2}{2}(\omega_x^2 + \omega_y^2)}. \quad (6)$$

Дисперсия шума на выходе ФЭУ может быть определена и как

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega, \quad (7)$$

пространственные частоты ω_x временными — $\omega = \omega_x v$, с учетом (1) получаем

$$G(\omega) = \frac{cdR_0^2}{2\pi v} I_k \alpha e^{-\frac{r^2}{v^2}\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-r^2\omega_y^2} \left| K\left(\frac{\omega}{v}, \omega_y\right) \right|^2 \left(A\frac{\omega}{v}, \omega_y \right) d\omega_y, \quad (8)$$

где v — скорость перемещения апертуры луча по экрану. Оптическая система не имеет временных искажений, а по пространственным частотам ФЭУ производит интегрирование, поэтому

$$\left| K\left(\frac{\omega}{v}, \omega_y\right) \right|^2 = K^2, \quad (9)$$

где K — коэффициент пропускания оптической системы. С достаточной для практики точностью экран ЭЛТ высокого разрешения, состоящий из 4—5 слоев люминофора с размером зерен менее 3 мкм, можно считать изотропным. $A(x, y)$ можно рассматривать как случайную функцию, возникающую в результате случайного наложения детерминированных элементарных функций (зерен). Спектры таких функций найдены в [7, 8].

Можно показать, что спектр $A(x, y)$ в полосе пропускания апертуры луча ЭЛТ ($r \geq 10$ мкм) практически является равномерным, т. е.

$$A(\omega_x, \omega_y) = A. \quad (10)$$

Подставив (9) и (10) в (8), получим окончательное выражение для спектральной плотности мощности шума ЭЛТ на выходе ФЭУ

$$G(\omega) = \frac{\beta}{\pi r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{r^2}{2v^2}\omega^2}, \quad (11)$$

где $\beta = dR_0^2 c I_k \alpha K^2 A$.

Дисперсия шума ЭЛТ на выходе идеального фильтра нижних частот составляет

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) |K(j\omega)|^2 d\omega = \frac{\beta}{2\pi r^2} \Phi\left(\frac{r}{v} \omega_0\right), \quad (12)$$

где ω_0 — граничная частота пропускания фильтра;

$\Phi(a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ — интеграл вероятности. При дискретном растре (для момента измерения $v=0$) дисперсия погрешности измерения, вызванная шумами люминофора ЭЛТ, равна

$$\sigma^2 = \frac{\beta}{2\pi r^2}. \quad (13)$$

Зависимость спектральной мощности и среднеквадратичного значения шума ЭЛТ, рассчитанная по формулам (11), (12), показана на рис. 2, 3 (сплошные линии). Из приведенных графиков видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Следует отметить, что формулы (11)—(13) справедливы и для мелкозернистых кино- и фотоматериалов, поскольку они имеют равномерный пространственный спектр гранулярности [9].

Выводы

Пространственный спектр шума ЭЛТ в полосе пропускания апертуры луча ЭЛТ ($r \geq 10$ мкм) равномерен.

Спектральная плотность мощности шума ЭЛТ на выходе ФЭУ обратно пропорциональна радиусу луча и скорости сканирования.

Полоса шума ЭЛТ на выходе ФЭУ пропорциональна скорости сканирования и обратно пропорциональна радиусу луча ЭЛТ.

Дисперсия шума ЭЛТ обратно пропорциональна квадрату радиуса луча ЭЛТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Горьян, Т. М. Цыкунов. Методы измерения отношения сигнал/шум. — Вопросы радиоэлектроники, 1966, серия X, вып. 4.
2. Ю. П. Лагутин. Потенциальная разрешающая способность телевизионных устройств с бегущим лучом. — Вопросы радиоэлектроники, 1969, серия IX, вып. 3

3. Л. М. Биберман. Растры в электрических устройствах. М., «Энергия», 1969.
4. Б. М. Рабин, М. И. Резник. Некоторые импульсные характеристики люминесцентных экранов с очень коротким послесвечением.— Материалы XIX совещания по люминесценции. Рига, 1970.
5. А. М. Остапенко. Анализ точности отсчета координат в системе с оптическими решетками.— Автометрия, 1972, № 3.
6. В. А. Миллер, Л. А. Куракин. Приемные электронно-лучевые трубки. М., «Энергия», 1964.
7. М. В. Ефимов. Следящие системы с оптическими связями. М., «Энергия», 1969.
8. Э. О' Нейл. Введение в статистическую оптику. М., «Мир», 1966.
9. М. А. Айгори. Спектры гранулярности.— Техника кино и телевидения, 1969, № 3.
10. Н. Н. Красильников. Помехоустойчивость телевизионных устройств. М.—Л., Госэнергиздат, 1961.

Поступило в редакцию 12 июля 1972 г.

УДК 621.317.024

О. О. КАГАНОВ, В. Ф. ТКАЧЕНКО

(Львов)

СОГЛАСУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ УСТРОЙСТВА ОБЕГАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

При эксплуатации сложных систем возникает необходимость в упорядочении и контроле информации о большом количестве параметров. Применение устройств обегавшего контроля (УОК) дает возможность для контроля и оперативного управления системами использовать СЦВМ, а определенную часть параметров контролировать визуально. В состав УОК обычно входят разнообразные датчики, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), коммутаторы. АЦП в составе УОК, как правило, имеют невысокое входное сопротивление и рабочие уровни величиной 5—10В. Поэтому при разработке УОК приходится решать вопросы согласования аналоговых датчиков с АЦП. Для работы с датчиками сигналов низкого уровня (например, термопарами) в качестве согласующего усилителя целесообразно применить УПТ с преобразованием. В настоящей работе рассматривается согласующий усилитель, который работает от датчика с выходным сопротивлением до 2 кОм и сигналом в виде постоянного напряжения 0—10 мВ.

Известно, что при разработке УПТ с преобразованием особое внимание уделяется выбору модулирующего элемента. Благодаря высоким модуляционным качествам выбираются МОП-транзисторы. Так как входной ток МОП-транзисторов очень мал (10^{-10} — 10^{-12} А), то статической погрешностью за счет модулятора можно пренебречь. Существенное влияние на работу модулятора оказывает помеха, проходящая из цепи управления через емкость затвор—сток. Если модулятор управляется напряжением прямоугольной формы, то сигнал помехи имеет вид коротких, но больших по величине импульсов (выбросов), которые могут вызвать перегрузку усилителя переменного тока, включенного за модулятором.

Передача выбросов усилителем и усреднение их площадей демодулятором и фильтром приведут к дрейфу. На рис. 1 изображена схема модулятора параллельного типа. Разделительный конденсатор C_p выбран такой величины, что разрядом его

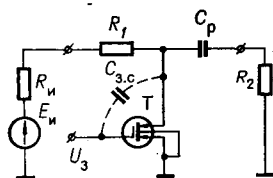


Рис. 1.

$$U_{см} = \frac{1}{T_m} \int_0^{\frac{T_m}{2}} C_{з.с} \frac{dU_3}{dt} \frac{rR_{экв}}{r + R_{экв}} dt, \quad (1)$$