

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Ю. КОНЧАЛОВСКИЙ, В.Ф. СЕМЕНОВ, Ю.С. СОЛОДОВ

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Методическое руководство
к лабораторной работе № 6 по курсу
“Метрология и инженерный эксперимент”
для студентов электротехнических специальностей

УДК
621.317
К-652
УДК: 621.317.75

Утверждено учебным управлением МЭИ

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Н.А.Серов
Подготовлено на кафедре информационно-измерительной техники

Кончаловский В.Ю., Семенов В.Ф., Солодов Ю.С.. **Электронно-лучевые осциллографы и их применение**: Методическое руководство к лабораторной работе № 6 по курсу “Метрология и инженерный эксперимент”. -М.: Изд-во МЭИ, 1999. -15 с.

Рассмотрены особенности применения универсальных аналоговых электронно-лучевых осциллографов в качестве средств электрических измерений.

Предназначено для студентов электротехнических специальностей. Продолжительность лабораторного занятия - 4 часа.

1. Введение

Электронно-лучевые осциллографы (ЭО) широко применяются для наблюдения форм кривых периодических и непериодических напряжений, а также для измерений мгновенных значений напряжений, интервалов времени, фазовых сдвигов, частоты и т.д. Осциллографы обладают малым собственным потреблением от источников исследуемых напряжений, высокой чувствительностью, широким частотным диапазоном. Например, с помощью ЭО типа С1-70 можно исследовать напряжения порядка 100 мкВ в полосе частот от 2 Гц до 50 кГц, а с помощью ЭО типа С7-13 – порядка 20 мВ в полосе частот от 0 до 10^{10} Гц.

Некоторые типы ЭО позволяют наблюдать одновременно несколько исследуемых напряжений, запоминать и обрабатывать исследуемые напряжения с целью измерения их мгновенных значений, интервалов времени и других параметров, а также для более детального анализа отдельных участков исследуемых процессов.

Целью данной работы является закрепление теоретических знаний устройства и принципа действия универсальных аналоговых электронно-лучевых осциллографов, а также получение практических навыков их применения в качестве средств электрических измерений.

2. Описание лабораторного стенда

На лабораторном стенде размещены: универсальный электронно-лучевой осциллограф, генератор синусоидальных напряжений и источник исследуемых напряжений.

Правила пользования генератором синусоидальных напряжений помещены на лабораторном стенде.

Источник исследуемых напряжений представляет собой набор генераторов напряжений различной формы, смонтированных внутри лабораторного стенда. На лицевой панели стенда размещены выходные зажимы этих генераторов (зажимы 1-1, 2-2, ... , 6-6), причем все нижние зажимы соединены между собой.

Упрощенная схема используемого в работе ЭО представлена на рис. 1. ЭО состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), делителя напряжений (Д), усилителей вертикального и горизонтального отклонений (Ус. Y и Ус. X) и генератора развёртки (ГР). Кроме того, в осциллографе имеется ряд вспомогательных узлов: источник питания, блоки, с помощью которых устанавливаются масштабы изображения по вертикали и горизонтали (так называемые калибраторы амплитуды и длительности), блок управления яркостью (канал Z) и ряд других. На упрощенной схеме эти блоки не показаны.

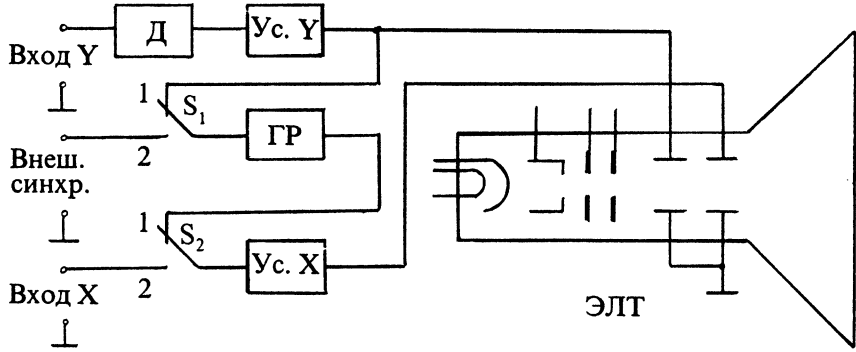


Рис. 1. Упрощенная схема электронно-лучевого осциллографа

Рассмотрим назначение, принцип действия и важные с точки зрения применения ЭО особенности основных блоков.

Электронно-лучевая трубка

Простейшая ЭЛТ (рис.2) представляет собой тщательно откаченный стеклянный баллон с электродами. Катод К, подогреваемый с помощью нити накала Н, эмитирует электроны, которые под действием поля положительно заряженных анодов А₁ и А₂ устремляются в направлении экрана Э. На анод А₂ подаётся положительное относительно катода напряжение порядка 800 – 3000 В, а на анод А₁ – от 20 до 50 % этой величины. Конфигурация, взаимное расположение и напряжения на анодах выбирают так, чтобы электрическое поле ускоряло и фокусировало поток электронов. Фокусировка осуществляется изменением напряжения на аноде А₁, а яркость – изменением напряжения на сетке С.

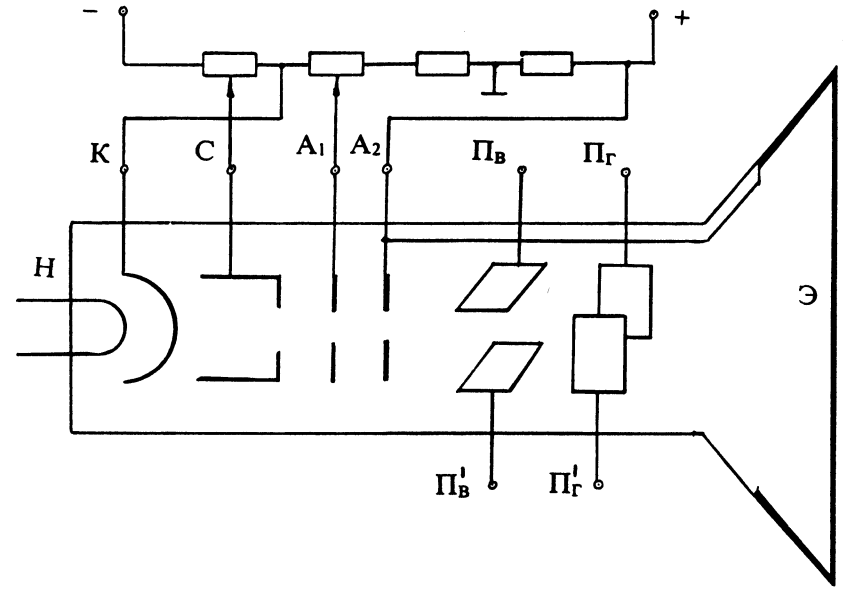


Рис. 2. Электронно-лучевая трубка

Внутренняя поверхность экрана, на которую направляется электронный луч, покрыта специальным составом, светящимся (флюоресцирующим) под действием электронов. Для удаления с экрана электрического заряда на внутренней поверхности баллона вблизи экрана наносится проводящее покрытие, электрически соединённое с анодом А₂.

Практически в достаточно широком диапазоне частот можно считать электронный луч безынерционным. Поэтому координаты X и Y светящегося пятна на экране в любой момент времени пропорциональны мгновенным значениям напряжений u_1 и u_2 , приложенным соответственно к горизонтально отклоняющим (П_г и П_г') и вертикально отклоняющим (П_в и П_в') пластинам:

$$x = S'_x u_1(t), \tag{1}$$

$$y = S'_y u_2(t). \tag{2}$$

Коэффициенты S'_x и S'_y характеризуют чувствительность ЭЛТ. Их значения определяются геометрией ЭЛТ и напряжением на аноде A_2 . Чем больше это напряжение, тем сильнее ускоряются электроны и тем меньше времени они находятся в поле отклоняющих пластин. Поэтому значения S'_x и S'_y обратно пропорциональны напряжению на A_2 .

Начало координат, соответствующее нулевым значениям напряжений u_1 и u_2 , выбирают обычно в центре экрана. Для этого на отклоняющие пластины подаются дополнительные постоянные напряжения того или иного знака, смещающие луч, а следовательно, и изображение на экране по горизонтали и вертикали.

Каналы вертикального и горизонтального отклонения

Исследуемые напряжения, подаваемые обычно на вход Y и реже одновременно на входы X и Y (рис. 1), могут иметь различные значения (например, для ЭО типа С1-76 от 1 мВ до 120 В). Для ослабления напряжений в целое число раз служит делитель D, а для усиления – усилители Ус. Y и Ус. X, выходы которых соединены соответственно с вертикально и горизонтально отклоняющими пластинами. Коэффициенты усиления можно регулировать.

В качестве усилителей обычно используются схемы с гальваническими связями – усилители постоянных напряжений, коэффициенты усиления которых мало зависят от частоты в диапазоне от нуля (постоянное напряжение) до некоторой “верхней” частоты. Для выделения переменной составляющей исследуемого напряжения в ЭО предусмотрен вход Y с разделительным конденсатором (закрытый вход).

Входные сопротивления ЭО по входам X и Y определяются параметрами D, Ус. Y и Ус. X. Каждое из этих сопротивлений может быть представлено в виде параллельного соединения резистора с сопротивлением порядка 1 МОм и конденсатора емкостью порядка десятков пикофард.

Если на вход Y подано исследуемое напряжение, то в соответствии с уравнением (2) координата y светящегося на экране пятна в любой момент времени пропорциональна мгновенному значению исследуемого напряжения $u_y(t)$:

$$y = S'_y k_d k_y u_y(t) = S_y u_y(t) \quad (3)$$

где k_d – коэффициент передачи делителя D, а k_y – коэффициент усиления Ус. Y. Величину S_y называют чувствительностью осциллографа по входу Y.

Если на вход X подать напряжение $u_x(t)$, то для координаты x светящегося пятна аналогично получим:

$$x = S_x u_x(t). \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) полностью описывает движение светящегося пятна на экране осциллографа для любых $u_x(t)$ и $u_y(t)$, действующих одновременно.

Генератор развёртки

Для получения на экране кривой исследуемого напряжения $u_y(t)$ в прямоугольной системе координат необходимо, чтобы напряжение $u_x(t)$ изменялось в течение некоторого интервала времени по линейному закону $u_x(t) = kt$. Тогда в соответствии с (4) имеем:

$$x = S_x kt. \quad (5)$$

Найдя величину t из уравнения (5) и подставив её в (3), получим:

$$y = S_y u_y \left(\frac{x}{S_x k} \right). \quad (6)$$

Сравнивая (6) с зависимостью исследуемого напряжения u_y от времени (3), нетрудно видеть, что координаты изображения y и x связаны между собой той же функциональной зависимостью. По-

стоянные множители S_x , S_y и k определяют лишь масштаб изображения.

Напряжение развёртки $u_x(t)$, вырабатываемое генератором развёртки ГР, имеет пилообразную форму (рис. 3). Интервал времени t_0 – время ожидания запуска генератора. В течение t_0 светящееся пятно находится в левой части экрана; координата x пятна в течение этого интервала времени не изменяется. Интервал времени t_1 называют временем прямого (рабочего) хода луча. В течение t_1 под действием линейно нарастающего напряжения $u_x(t)$ светящееся пятно движется по экрану слева направо с постоянной скоростью. В течение t_2 (времени обратного хода луча) луч движется справа налево в исходное положение. Время t_2 стремятся сделать возможно меньшим ($t_2 \ll t_1$).

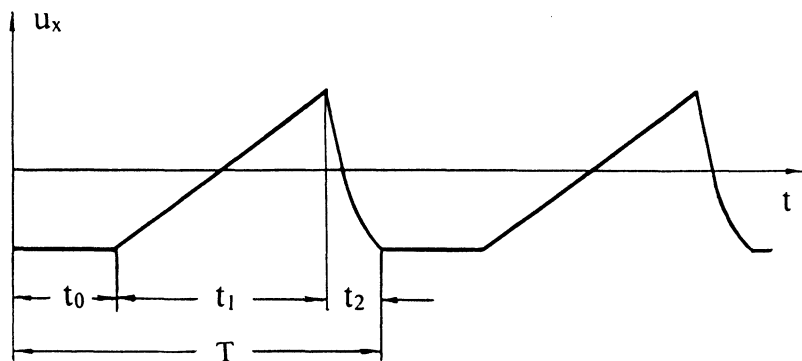


Рис. 3. Напряжение на выходе генератора развёртки

В большинстве ЭО в течение интервала времени t_1 на сетку ЭЛТ подают дополнительное напряжение, увеличивающее яркость. При отсутствии этого напряжения яркость настолько мала, что часть изображения, соответствующая отрезкам времени t_0 и t_2 , на экране незаметна.

При исследовании периодических напряжений изображение на экране будет неподвижным и удобным для наблюдения, если во время каждого прямого хода луча светящееся пятно движется по одной и той же траектории. Это возможно лишь в том случае, когда период напряжения развёртки T равен или в целое число раз больше периода исследуемого напряжения. Регулируя время рабочего хода t_1 или время ожидания t_0 , можно изменять период T и, следовательно,

но, добиваться неподвижности изображения (время обратного хода луча не регулируется).

На практике периоды исследуемого и развёртывающего напряжений обычно нестабильны. Вследствие этого изображение на экране ЭО будет перемещаться. Для получения неподвижного изображения осуществляется жёсткая связь (синхронизация) между периодами исследуемого и развёртывающего напряжений.

Идея синхронизации в режиме непрерывной развёртки, когда $t_0 = 0$, заключается в том, что прямой ход луча принудительно заканчивается при вполне определённом мгновенном значении исследуемого напряжения. При этом малое изменение периода исследуемого напряжения автоматически ведёт к соответствующему изменению периода развёртывающего напряжения. Для осуществления синхронизации исследуемое напряжение, снимаемое с выхода усилителя Y (переключатель S_1 на рис. 1 в положении 1), подаётся на управляющий вход генератора развёртки (“внутренняя синхронизация”). Синхронизация может также осуществляться от внешнего источника напряжения (переключатель S_1 в положении 2), частота которого совпадает с частотой исследуемого напряжения или меньше её в целое число раз (“внешняя синхронизация”).

При заданных напряжениях $u_x(t)$ и $u_y(t)$ нетрудно построить изображение $y=f(x)$, получающееся на экране ЭО, если учесть, что система уравнений (3) и (4) представляет собой уравнение изображения в параметрической форме.

Пусть на вход Y поступает последовательность одинаковых импульсов напряжения, причём длительность импульса гораздо меньше паузы. Для наблюдения и измерения параметров подобных импульсов режим непрерывной развёртки ГР неудобен, так как практически невозможно получить изображение одного импульса, соизмеримое по горизонтали с размерами экрана ЭО. Такое изображение можно получить, используя ждущий режим работы генератора развёртки ($t_0 \neq 0$) с внутренним или внешним запуском.

В ждущем режиме с внутренним запуском генератор развёртки до поступления исследуемого напряжения не работает, “ждёт” (время t_0). Момент начала прямого хода луча соответствует определённому уровню (определённому мгновенному значению) и знаку производной исследуемого напряжения. Этот уровень – уровень запуска можно регулировать. Время t_1 прямого хода луча можно устанавливать произвольным. После окончания обратного хода луча генератор развёртки прекращает работу, “ждёт” до тех пор, пока на его управляющий вход вновь не поступит исследуемое напряже-

ние заданного уровня. Выбрав время t_1 соизмеримым с длительностью исследуемого импульса и используя его фронт для запуска ГР, можно растянуть изображение одного импульса или его части на весь экран ЭО.

В ждущем режиме с внешним запуском генератор развёртки работает аналогично, только его запуск осуществляется фронтом или срезом вспомогательного импульса, который может быть сдвинут во времени относительно исследуемого. Вспомогательные импульсы подаются на вход внешней синхронизации ЭО. В этом режиме удаётся более детально рассмотреть и точнее измерить, например, фронт и срез исследуемого импульса.

При исследовании непериодических напряжений ограниченной длительности (переходные процессы, одиночные импульсы и т.п.) удобно использовать цифровой осциллограф или осциллограф с запоминающей электронно-лучевой трубкой, у которой изображение на экране сохраняется достаточно долго после окончания прямого хода луча.

3. Методические указания

В данных методических указаниях рассмотрены вопросы применения ЭО для измерений мгновенных значений напряжений, интервалов времени и частоты. Более детальные методические указания, в которых приводятся сведения о технических характеристиках используемого в работе ЭО, органах его управления, методике подготовки к работе, методике применения, а также даются рекомендации по обработке результатов измерений, приведены в дополнении к описанию данной работы. Оно выдаётся студентам в начале лабораторного занятия.

Измерение мгновенных значений напряжений

Возможность измерения мгновенных значений напряжений — одно из основных достоинств осциллографов. Подобные измерения обычно производят следующим образом.

С внутреннего генератора (калибратора) на вход Y подаётся образцовое напряжение с известной амплитудой и периодом. Изменением чувствительности S_y добиваются того, чтобы этой амплитуде соответствовал определённый отрезок u_1 на экране ЭО. Зная величину u_1 , можно, используя уравнение (3), найти S_y .

Обычно вместо S_y на лицевой панели осциллографа указывают обратную величину ($1/S_y$), называемую коэффициентом отклонения (k_o). Коэффициент отклонения определяет масштаб по вертикали и показывает, какое напряжение соответствует одному делению (или сантиметру) вертикальной шкалы экрана ЭО. Современные ЭО позволяют осуществлять проверку калибровки при определённом значении k_o , а затем изменять его в целое число раз. При этом повторной калибровки производить не требуется.

Исследуемое напряжение подаётся на вход Y и на экране устанавливается устойчивое изображение. Коэффициент k_o при этом изменять нельзя. Зная k_o и измерив отрезок Δu , соответствующий искомому мгновенному значению исследуемого напряжения u_y , можно определить значение этого напряжения по формуле:

$$u_y = k_o \Delta u. \quad (7)$$

Можно отметить ряд источников погрешностей измерения мгновенных значений исследуемых напряжений:

- погрешность калибратора амплитуды;
- зависимость коэффициента отклонения от частоты;
- зависимость коэффициента отклонения от положения изображения на экране ЭО;
- неточность измерения отрезков, соответствующих измеряемому и образцовому напряжениям. Это связано как с субъективными ошибками наблюдателя, так и с тем, что светящаяся линия, образующая изображение на экране ЭО, имеет конечную ширину (обычно от 0,5 до 1,0 мм).

Для уменьшения погрешностей целесообразно иметь достаточно большие отрезки, но не выходящие за пределы рабочей части экрана, ограниченной шкалами с делениями.

Измерение временных интервалов

ЭО широко применяется для измерений временных интервалов между различными мгновенными значениями исследуемых напряжений. При этом необходимо знать коэффициент развёртки — масштаб изображения по горизонтали. Коэффициент развёртки чис-

ленно равен интервалу времени, за который светящееся пятно перемещается по экрану на одно деление (или сантиметр) по горизонтали. Коэффициент развёртки обратно пропорционален скорости движения пятна по горизонтали, которая зависит от скорости нарастания пилообразного напряжения развёртки и чувствительности S_x по входу X.

В современных осциллографах коэффициент развёртки (k_p) может принимать лишь фиксированные, заранее известные значения (калиброванная развёртка). Проверить правильность калибровки можно, подав с выхода калибратора на вход Y образцовое напряжение и измерив период этого напряжения.

Измерив горизонтальную проекцию Δx между двумя точками на изображении, соответствующими определённым мгновенным значениям исследуемого напряжения, можно вычислить временной интервал:

$$\Delta t = k_p \Delta x. \quad (8)$$

Точность измерения в рассматриваемом случае зависит от погрешности значения k_p и погрешности измерения отрезка Δx . При выборе размера Δx следует руководствоваться соображениями, изложенными выше применительно к выбору размеров вертикальных отрезков.

Измерение частоты

Измерение частоты с помощью ЭО широко распространено, несмотря на наличие частотомеров.

Измерение частоты исследуемого напряжения обычно сводят к измерению временного интервала – периода. Подобное измерение целесообразно производить при сложной форме исследуемого напряжения, так как в этом случае не всегда можно использовать частотомер.

При измерении частоты синусоидального напряжения часто используют метод фигур Лиссажу, рассмотренный ниже.

Пусть на вход Y подано напряжение неизвестной частоты f , а на вход X – напряжение плавно регулируемой известной частоты f_0 (предварительно необходимо отключить генератор развёртки,

переключив S_2 , показанный на рис. 1, в положение 2). Регулировкой частоты f_0 нужно добиться неподвижного изображения на экране – фигуры Лиссажу. Частоту f следует найти из соотношения:

$$\frac{f}{f_0} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (9)$$

где N_1 – наибольшее число точек пересечения фигуры Лиссажу горизонтальной секущей, а N_2 – вертикальной. В частном случае, когда $f = f_0$, фигура Лиссажу представляет собой эллипс.

Если напряжение неизвестной частоты f подавать на вход X, а f_0 – на вход Y, то фигура повернётся на 90° . Поэтому для расчёта f в выражении (9) следует поменять местами N_1 и N_2 . Практически стремятся установить такую фигуру, для которой числа N_1 и N_2 достаточно малы. В противном случае расшифровка фигуры становится затруднительной.

Точность измерения частоты рассмотренным методом не зависит от свойств осциллографа (частотного диапазона, чувствительности, размеров экрана и т.д.), а целиком определяется точностью, с которой известна образцовая частота. Для генератора ГЗ-53, используемого в работе в качестве образцового, основная погрешность по частоте не превышает $\pm (0,001 f_0 + 1)$ Гц.

4. Задание

1. Пользуясь дополнением к описанию лабораторной работы, изучить технические характеристики, органы управления, методику подготовки к работе и методику применения используемого в работе электронно-лучевого осциллографа.

2. Измерить мгновенное значение (указывается преподавателем) и период напряжения на зажимах 1-1.

3. Измерить следующие параметры импульсного напряжения на зажимах 2-2: длительность импульса, амплитуду импульса, амплитуду выброса, длительность фронта, длительность среза (см. приложение).

4. Измерить частоту напряжения на зажимах 3-3 двумя методами: косвенно, измерив период этого напряжения, и методом фигур Лиссажу. Сопоставить полученные результаты с учётом погрешностей измерений.

5. Составить отчёт по требуемой форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические измерения/ Малиновский В.Н., Демидова-Панфёрова Р.М., Евланов Ю.Н. и др. Под ред. В.Н.Малиновского. М.: Энергоатомиздат, 1985 (стр. 166-174).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры, характеризующие импульс

Импульсы, близкие по форме к прямоугольным (рис. 4), принято характеризовать рядом параметров. Основными параметрами являются: амплитуда импульса $U_{и}$, амплитуда выброса $U_{в}$, длительность импульса $\tau_{и}$, длительность фронта $\tau_{ф}$, длительность среза $\tau_{с}$.

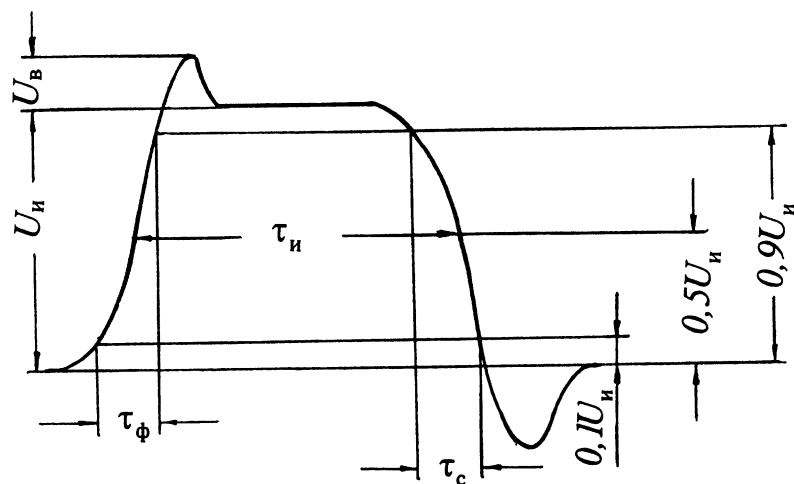


Рис. 4. Параметры импульса

Учебное издание

Кончаловский Вадим Юрьевич
Семенов Вячеслав Федорович
Солодов Юрий Серафимович

Электронно-лучевые осциллографы и их применение.
Методическое руководство к лабораторной работе № 6 по курсу "Метрология и инженерный эксперимент".

Редактор издательства Е.Н.Касьянова

ЛР № 020528 от 05.06.97

Подписано к печати 13.10.99

Формат 60×84/16

Печ. л. 1,0

Тираж 300 Изд. № 69

Заказ 309

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная, д. 14.

Отпечатано в типографии ЦНИИ "Электроника",

117415, Москва, просп. Вернадского, д. 39