

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет
Кафедра конструирования и технологии радиоэлектронных средств

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания к лабораторным работам

Составитель
Е.Н. ТАЛИЦКИЙ

Владимир 2002

УДК 621.384(075)

Рецензент

Доктор технических наук, профессор Московского
государственного авиационного института (технического университета)
А.В. Назаров

Печатается по решению редакционно - издательского совета
Владимирского государственного университета

Анализ точности электронных средств: Метод. указания к лаб.
работам / Владим. гос. ун-т; Сост. Е.Н. Талицкий. Владимир, 2002. 44 с.

Указания включают описания четырех лабораторных работ по вероятностно-статистическим методам анализа точности электронных средств.

Предназначены для студентов специальностей 220500 – проектирование и технология электронно-вычислительных средств и 200800 – проектирование и технология радиоэлектронных средств.

Табл. 9. Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.

УДК 621.384(075)

ВВЕДЕНИЕ

При анализе точности электронных средств широко используются вероятностно-статистические методы, изучение которых и составляет основную цель представленных в настоящем издании лабораторных работ.

Методические указания включают описания четырех лабораторных работ и являются исправленным переизданием работ, опубликованных в 1975 и 1982 гг.

Обработку результатов экспериментов, построение гистограммы, графиков целесообразно проводить с использованием пакетов программ инженерных и научных расчетов типа MathCAD, MatLab или других, предназначенных для вероятностно-статистических расчетов.

При выполнении лабораторных работ студенты должны:

- углубить свои знания по соответствующим разделам курса;
- приобрести навыки в проведении экспериментальных исследований, научиться обобщать и анализировать полученные результаты, сознательно устанавливать границы применимости теоретических положений;
- изучить устройство и работу измерительных приборов, стендов, установок и испытательного оборудования.

Каждая работа выполняется за лабораторным стендом бригадой из двух – трех студентов в соответствии с графиком очередности лабораторных работ.

До занятий студенты должны изучить описание работы, рекомендуемую литературу и выполнить домашнее задание, чтобы четко представить цель и задачи, знать соответствующие теоретические разделы курса, схему и методику проведения измерений, физическую сущность исследуемых явлений и характер ожидаемых результатов, устройство и работу измерительных приборов, установок, стендов и испытательного оборудования. Результаты фиксируются в рабочей тетради, куда должны быть внесены рабочий план, схемы, таблицы, домашнее задание.

В начале занятий каждый студент предъявляет оформленный отчет по предыдущей работе, рабочую тетрадь с результатами самостоятельных занятий и отвечает на контрольные вопросы преподавателя по следующей работе. Студенты, не выполнившие эти требования, или не защитившие предыдущие работы в соответствии с графиком, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Экспериментальная часть выполняется в соответствии с методическими указаниями к каждой работе при строгом соблюдении правил техники безопасности.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы. Экспериментальное определение закона распределения погрешностей параметров элементов, обусловленных воздействием случайных факторов в процессе производства, и освоение методики статистической обработки опытных данных.

Содержание работы

1. Выполнить измерения параметров 100 – 150 однотипных радиоэлементов.
2. Построить статистический ряд и гистограмму распределения случайных отклонений параметра.
3. Определить числовые характеристики статистического распределения.
4. Аппроксимировать гистограмму теоретической кривой распределения, оценить согласованность статистического распределения с теоретическим, используя критерий хи-квадрат (χ^2).

Методические указания

Случайные факторы, действующие в процессе производства радиоэлементов, приводят к погрешностям их параметров (отклонениям параметров от заданных значений), имеющим тот или иной закон распределения.

Если погрешности определяются действием большого числа взаимно независимых случайных факторов и среди них нет доминирующих (случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность составляют величину одного порядка), то можно считать, что они подчиняются нор-

мальному закону. Если же имеется фактор, резко выделяющийся среди всех остальных по оказываемому им влиянию на суммарную производственную погрешность, то закон распределения последней будет определяться доминирующим фактором. Следует отметить, что на заводах-изготовителях практикуется так называемая выборка, т. е. детали с малыми допусками получают отбором из общей партии. Это также приводит к деформации закона распределения, который при производстве радиодеталей наиболее часто бывает нормальным.

Выявление закона распределения погрешностей и определение его числовых характеристик выполняется методами математической статистики.

Пусть исследуется величина X – значение параметра радиоэлемента, которая в каждом конкретном случае принимает определённое значение. Если разделить весь диапазон наблюдаемых значений на интервалы (разряды), подсчитать количество значений m_i , приходящихся на каждый i -й разряд, и это число разделить на общее число наблюдений n , то получим частоту, соответствующую данному разряду

$$P_i^* = \frac{m_i}{n}.$$

Сумма частот всех разрядов, очевидно, будет равна единице. Сводя полученные значения P_i^* в табл.1, получим статистический ряд:

Т а б л и ц а 1

Интервал	$x_1; x_2$	$x_2; x_3$	. . .	$x_{k-1}; x_k$	$x_k; x_{k+1}$
Частота	P_1^*	P_2^*	. . .	P_{k-1}^*	P_k^*
Вероятность	P_1	P_2	. . .	P_{k-1}	P_k

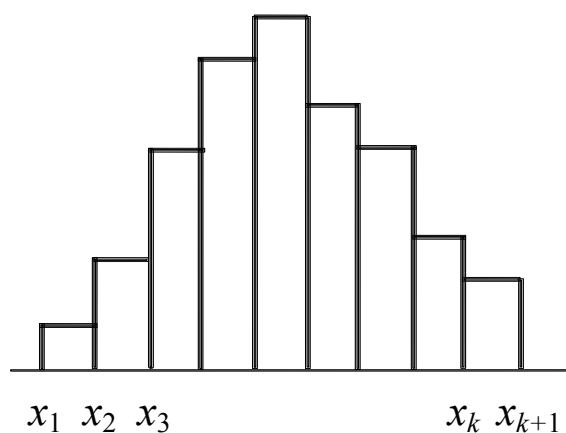


Рис. 1. Гистограмма

Число разрядов желательно выбирать не меньше 10.

Статистический ряд можно представить в виде гистограммы (рис. 1). На оси абсцисс откладываются интервалы, соответствующие разрядам, и на каждом из них, как на основании, строятся прямоугольники, высоты которых выбираются так, чтобы площади их равнялись частоте

те данного разряда (в случае равных по длине разрядов высоты прямоугольников будут пропорциональны соответствующим частотам).

При увеличении числа опытов и уменьшении длины интервалов (увеличении количества разрядов) гистограмма всё более будет приближаться к некоторой кривой, ограничивающей площадь, равную единице. Эта кривая представляет собой график плотности распределения случайной величины X .

Каждой числовой характеристике непрерывной случайной величины соответствует её статистическая аналогия:

- математическому ожиданию – статистическое среднее (среднее арифметическое)

$$m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i P_i^*,$$

- дисперсии случайной величины – статистическая дисперсия

$$D_x^* = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - m_x^*)^2}{n - 1} = \sum_{i=1}^k (\tilde{x}_i - m_x^*)^2 P_i^*,$$

где $\tilde{x}_i$ – среднее значение случайной величины в i -м разряде; P_i^* – частота i -го разряда; k – число разрядов.

Любому статистическому распределению в большей или меньшей мере присущи элементы случайности. Для выявления его существенных черт оно выравняется (сглаживается) путём подбора такой теоретической кривой распределения, которая наилучшим образом описывает данное статистическое распределение. Например, если исследуемая случайная величина X – следствие большого числа независимых, примерно равных по своему влиянию случайных факторов, то из теоретических соображений можно считать, что она распределена по нормальному закону.

Когда вид теоретической функции подобран, её числовые характеристики (обычно m_x и D_x) выбираются так, чтобы они были равны соответствующим статистическим характеристикам m_x^* и D_x^* . После этого рассчитывается значение функции для середины каждого разряда. Этот метод по-

лучил название *метода моментов*. В случае нормального закона плотность распределения $f(x)$ в i -й точке будет

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tilde{x}_i - m_x)^2}{2\sigma^2}}.$$

Результаты расчётов записываются в таблицу статистического ряда распределения. По найденным значениям на одном графике с гистограммой строится выравнивающая теоретическая кривая.

Соответствие кривой статистическому распределению оценивается одним из критериев согласия. Наиболее распространённым является так называемый "*критерий χ^2* " *Пирсона*, при котором согласованность между теоретическим статистическим распределениями оценивается расхождением между вероятностями P_i попадания случайной величины в каждый из разрядов и наблюдаемыми частотами P_i^* . При нормальном законе теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -й разряд определяется через функцию Лапласа

$$P_i = (x_{i-1} < X \leq x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - m_x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_{i-1} - m_x}{\sigma}\right),$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{u^2}{2}} du$ – табулированная функция (см. приложение, табл. П1).

В качестве меры расхождения принимается сумма квадратов отклонений $(P_i^* - P_i)$, взятых с некоторыми "весами" $c_i = n/P_i$. "Веса" разрядов вводятся потому, что отклонения, относящиеся к разным разрядам, нельзя считать равноправными по значимости: одно и то же по абсолютной величине отклонение $(P_i^* - P_i)$ может быть малозначительным, если сама вероятность велика, и очень существенным, если она мала.

С учётом "весов" мера отклонения, обозначаемая через χ^2 , будет определяться по формуле

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}.$$

Если ввести n под знак суммы и учесть, что $P_i^* = m_i/n$,

где m_i – число попаданий случайной величины в i -й разряд, выражение χ^2 можно привести к виду

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}.$$

Распределение χ^2 зависит от параметра r , называемого числом "степеней свободы". Последнее равно количеству разрядов k минус количество независимых условий s ("связей"), накладываемых на частоты P_i^*

$$r = k - s.$$

Такие независимые условия:

1. $\sum_{i=1}^k P_i^* = 1$ (накладывается во всех случаях);
2. $\sum_{i=1}^k \tilde{x}_i P_i^* = m_x$;
3. $\sum_{i=1}^k (\tilde{x}_i - m_x^*)^2 P_i^* = D_x$ и другие моменты высших порядков.

Второе и третье условия накладываются, когда числовые характеристики теоретического распределения m_x и D_x принимаются равными соответствующим статистическим значениям.

Для полученного значения χ^2 и числа степеней свободы r по специальным таблицам П2 находится вероятность P того, что за счёт чисто случайных причин мера расхождения теоретического и статистического распределений будет не меньше, чем фактически наблюдаемое в данной серии опытов значение χ^2 .

Если величина P мала (меньше 0,1), то принятое теоретическое распределение следует считать несоответствующим действительному распределению величины X . Напротив, если вероятность P сравнительно велика (больше 0,8), можно признать расхождения между теоретическим и статистическим распределениями несущественными и отнести их за счёт случайных причин. Принятое теоретическое распределение считается в этом случае не противоречащим опытными данным.

Заметим, что при использовании критерия χ^2 должно быть большим не только общее число опытов n , но и число наблюдений m_i в отдельных разрядах (не менее 5 – 10).

Полученные статистические значения m_x^* и D_x^* всегда будут содержать элемент случайности и, следовательно, отличаться от истинных значений. Причём, ошибка будет тем меньше, чем больше число опытов. Точность и достоверность полученных значений m_x и D_x оцениваются так называемыми *доверительными интервалами* и *доверительной вероятностью*. Эти понятия будут рассмотрены в следующих лабораторных работах.

Порядок выполнения работы

1. Измерить величину параметра радиоэлемента в заданной партии, состоящей из 100 – 150 штук (по указанию преподавателя).
2. По данным измерений построить статистический ряд.
3. Определить статистическое математическое ожидание и дисперсию.
4. Построить гистограмму.
5. Подобрать теоретическую кривую плотности распределения и провести оценку согласованности этой кривой и статистического распределения по критерию χ^2 .

Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методами обработки статистических данных.
2. Составить таблицы для записи результатов измерений.
3. Ознакомиться с техническими характеристиками универсально-измерительного прибора, используемого в работе, и правилами работы с ним (см. приложение).

Лабораторное задание

1. Измерить величину параметра радиоэлемента в партии, состоящей из 100 – 150 штук.
2. Обработать полученные данные в соответствии с «МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ».

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Тип элемента и его номинальное значение; тип и номер измерительного прибора.
3. Измеренные значения параметров элементов.

4. Статистический ряд, гистограмма и теоретическая кривая.
5. Оценка согласованности статистического и теоретического распределений при помощи критерия χ^2 .
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под случайной величиной?
2. Что такое ряд, функция и плотность распределения, гистограмма?
3. Как определяются статистический ряд и функция распределения, гистограмма?
4. Для чего применяется метод моментов?
5. Как находятся статистические оценки числовых характеристик случайных величин?
6. Что понимается под критерием согласия χ^2 Пирсона?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ

Цель работы. Ознакомление с методами определения коэффициентов влияния и расчета электрических допусков.

Содержание работы

1. Экспериментальное и аналитическое определение коэффициентов влияния параметров на частоту мультивибратора.
2. Расчет допусков на частоту колебаний мультивибратора методами предельных отклонений и вероятностным.

Методические указания

Функциональные узлы и детали, из которых состоят современные электронные средства (ЭС), должны обладать строго определенными параметрами для обеспечения требуемой точности работы радиоаппаратуры. Отклонение параметров от заданных значений допускается только в пределах некоторых заранее установленных границ – допусков. Принято де-

лить допуски на механические и электрические в зависимости от того, какие параметры ЭС (механические или электрические) она ограничивает.

Величины допусков обычно устанавливаются в процессе конструирования. Необоснованно назначенные допуски увеличивают стоимость ЭС и удлиняют сроки производства. Излишняя жесткость допусков повышает требования к точности оборудования, качеству оснастки и квалификации рабочих. Слишком большие допуски приводят к увеличению регулировочных работ при сборке. Поэтому допуски в процессе конструирования ЭС необходимо рассчитывать.

Наиболее широкое распространение при расчете допусков нашли методы предельных отклонений и вероятностный, основанные на использовании уравнений погрешностей. Выходной параметр радиоизделия представляет собой функцию многих переменных: параметров деталей и элементов конструкции, напряжений источников питания, паразитных индуктивностей, емкостей, проводимостей, образующихся при сборке, т.е.

$$N = f(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где q_i – параметр i -го элемента.

В реальных условиях параметры активных элементов (транзисторов, микросхем, и др.) всегда отличаются от средних, найденных по усредненным характеристикам в рабочей точке, а параметры деталей – от номинальных значений вследствие неизбежного производственного разброса. Поэтому величины выходных параметров ЭС также отличаются от средних значений, рассчитанных при нормальных и средних значениях параметров элементов.

При определении допусков предполагается, что отклонения параметров от номинальных значений малы, т.е. $\Delta N \ll N_0$, $\Delta q_i \ll q_{i0}$ и изменения их в пределах поля допуска можно считать линейными и пренебрегать членами второго порядка малости по сравнению с членами первого порядка (например, по сравнению с Δq). Практика показывает, что расчет с точностью до малых второго порядка в большинстве случаев приемлем.

На основе сделанных допущений для получения уравнений абсолютной погрешности выходного параметра радиоизделия достаточно взять полный дифференциал выражения (1) и перейти к конечным приращениям.

В результате получим

$$\Delta N = \frac{\partial f}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial f}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial q_n} \Delta q_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial q_i} \Delta q_i. \quad (2)$$

На практике во многих случаях удобнее пользоваться уравнением относительной погрешности, которое можно получить, разделив уравнение (2) на (1)

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial q} \frac{q_i}{f} \right]_0 \frac{\Delta q_i}{q_i}. \quad (3)$$

Это исходное уравнение для расчета допусков. Левая часть уравнения – относительная погрешность выходного параметра радиоизделия, а правая – относительные погрешности параметров его элементов. Член уравнения (3)

$$B_i = \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{q_i}{f} \quad (4)$$

называется коэффициентом влияния. Он определяет степень влияния погрешностей элементов на погрешность выходного параметра радиоизделия. Индекс "0" у квадратных скобок обозначает, что при определении величины коэффициента влияния в его выражение подставляются номинальные значения параметров элементов.

Если качество работы радиоизделия определяется несколькими параметрами, то составляется система уравнений погрешностей, число уравнений в которой равно количеству основных выходных параметров.

При расчете допусков в уравнения (2) или (3) вместо погрешностей необходимо подставлять характеристики поля допуска. К ним относятся: величина поля допуска Δ , координата его середины E , половина поля допуска δ . При вероятностном методе расчета необходимо знать вид закона распределения погрешностей $f\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$ и его числовые характеристики.

На рис. 1 изображены характеристики для случая, когда среднее значение относительной погрешности смещено от номинала в положительную сторону, что не влияет на общность рассуждений. Очевидно, предельное отклонение искомого выходного параметра N можно найти по формуле

$$N_{\text{пр}} = N_0 + \Delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) \pm \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right).$$

При методе предельных отклонений значения $\Delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$ и $\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$

определяются отношениями

$$E\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum_{i=1}^n B_i E\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right);$$

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum_{i=1}^n |B_i| \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right),$$

полученными на основе выражения (3).

При расчете допусков вероятностным методом целесообразно использовать числовые характеристики законов распределения погрешностей, установив связь между этими характеристиками поля допуска, например, половиной поля допуска δ и координатой середины поля допуска E .

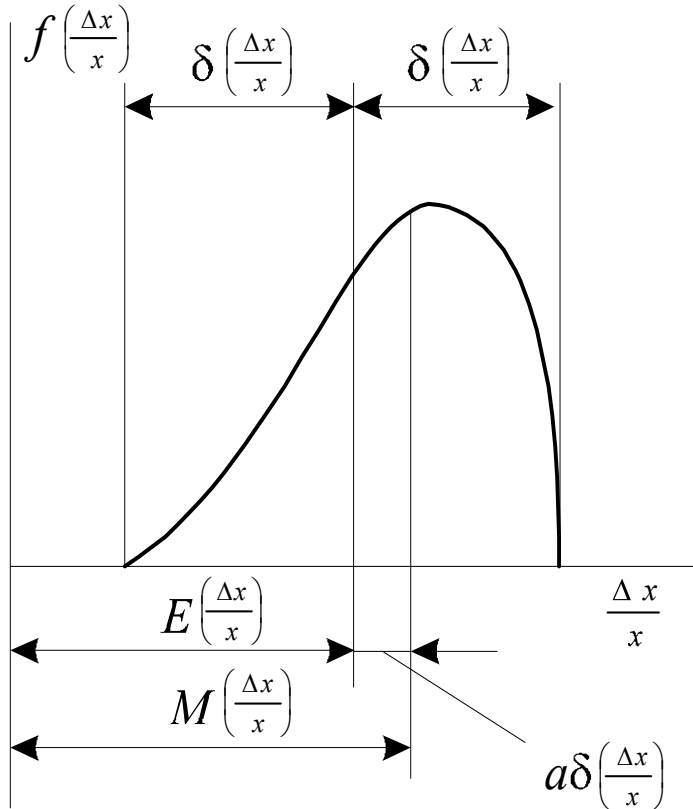


Рис. 1. Распределение погрешностей в пределах поля допуска

Такая связь устанавливается соотношением

$$M\left(\frac{\Delta x}{x}\right) = E\left(\frac{\Delta x}{x}\right) + a\delta\left(\frac{\Delta x}{x}\right),$$

где a — коэффициент относительной асимметрии распределения отклонений в поле допуска, $M\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$ — математическое ожидание.

Используя это выражение и правила суммирования математических ожиданий и дисперсий, на основе уравнения (3) получим формулы для

определения $E\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$ и $\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$:

$$E\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum_{i=1}^n B_i \left[E\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + a_i \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \right]; \quad (5)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \frac{1}{K_N} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 K_i^2 \delta_i^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}. \quad (6)$$

Здесь K – коэффициент относительного рассеивания, определяемый по формуле

$$K = \frac{\lambda}{\lambda_{\circ}},$$

где $\lambda = \frac{\sigma}{\delta}$ – относительное рассеивание погрешностей параметра;

σ – среднее квадратическое отклонение погрешностей;

$\lambda_{\circ} = \frac{\sigma_{\circ}}{\delta_{\circ}}$ – относительное рассеивание эталонного нормального распределения с центром группирования, совпадающим с серединой поля допуска и при $\sigma_{\circ} = \frac{1}{3} \delta_{\circ}$.

Если распределение погрешностей параметра подчиняется нормальному закону, то при значениях $\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = 3\sigma\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$ в пределах поля допуска содержится 99,73 % всех отклонений параметра от номинального значения. Другими словами, вероятность того, что значение выходного параметра будет находиться в пределах поля допуска, равна 0,9973. Коэффициент относительного рассеивания K_N равен единице. Для других значений вероятности величина K_N может быть рассчитана или взята из таблицы [3].

Выражение (6) справедливо для некоррелированных погрешностей параметра q_i , в противном случае половина поля допуска вычисляется по

формуле

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \frac{1}{K_N} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 K_i^2 \delta_i^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2 \sum_{j < i} r_{ij} B_i B_j \cdot K_i K_j \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}. \quad (7)$$

Здесь по i суммируются все независимые и коррелятивно зависимые погрешности, а по j – пары погрешностей, связанные функциональной или коррелятивной зависимостью, которая определяется коэффициентом корреляции r_{ij} . Значение коэффициента находится на основе паспортных данных или статистически.

При расчете допусков необходимо знать коэффициенты влияния B_i , которые определяются методами расчетно-аналитическим, малых приращений и на основе планируемого эксперимента и корреляционного анализа.

Расчетно-аналитический метод применяется, если известно аналитическое выражение выходного параметра через параметры деталей. Согласно выражению (4) для определения коэффициента влияния необходимо:

- взять частные производные выходного параметра по каждому из параметров деталей;
- умножить полученные частные производные на отношение параметра i -го элемента к значению выходной характеристики;
- подстановкой номинальных значений параметров деталей в выражение коэффициентов влияния найти их численные величины.

Выполнение перечисленных операций, особенно нахождение частных производных, связано с большим количеством промежуточных преобразований и требует значительных затрат времени. Поэтому этот метод, как правило, оказывается сложным и трудоемким даже при определении коэффициентов влияния параметров элементов на выходной параметр простейшего функционального узла как функции 6-10 переменных.

Метод малых приращений базируется на линейности исходного уравнения погрешности выходного параметра радиоустройства (3). Такое уравнение можно составить, суммируя погрешности параметров элементов, источников питания и паразитных параметров, умноженных на коэффициент влияния. Из линейности этого уравнения следует принцип неза-

висимости действия погрешности параметра каждого элемента отдельно, полагая, что погрешности параметров остальных элементов равны нулю. Поэтому, если взять функциональный узел с номинальными значениями параметров элементов и дать i -му параметру малое приращение, то отклонение выходного параметра ФУ будет пропорционально изменению i -го параметра $\frac{\Delta N}{N} = B_i \frac{\Delta q_i}{q_i}$, откуда

$$B_i = \frac{\Delta N}{N} \bigg/ \frac{\Delta q_i}{q_i}. \quad (8)$$

Следовательно, для определения коэффициентов влияния методом малых приращений достаточно относительное изменение выходного параметра ФУ, обусловленное изменением параметра i -го элемента, разделить на относительное изменение этого параметра.

В большинстве случаев можно пользоваться реальными радиоустройствами. Их параметры считаются равными номинальным, что может привести к некоторой ошибке значения коэффициента влияния. Но поскольку при расчете погрешности выходного параметра коэффициент влияния умножается на погрешность параметра элемента, то полученная неточность дает ошибку второго порядка малости.

Метод малых приращений позволяет легко и быстро находить коэффициент влияния на выходной параметр радиоустройства погрешностей параметров пассивных элементов и практически не применим для определения коэффициентов влияния погрешностей активных элементов.

Принцип независимости действия погрешностей в реальных схемах выполняется, если отклонение параметра элемента не превышает 5 %. Поэтому метод оказывается неудобным для нахождения коэффициентов влияния погрешностей, параметров, воздействие которых на выходную характеристику незначительно, так как в этом случае необходима прецизионная измерительная аппаратура.

Описание экспериментальной установки

В работе экспериментально исследуется влияния сопротивлений и емкостей схемы мультивибратора, показанной на рис. 2, на частоту его автоколебаний.

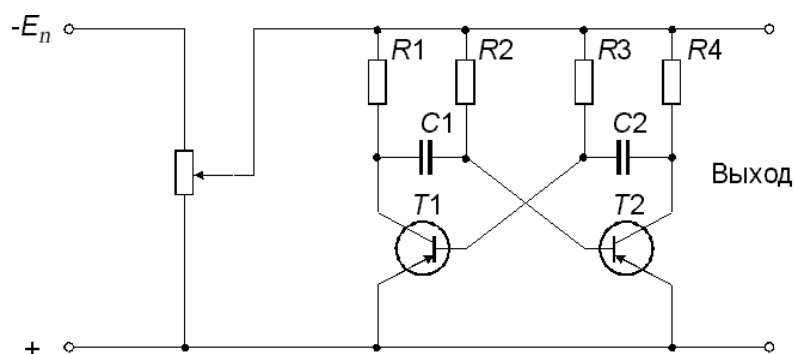


Рис. 2. Электрическая схема мультивибратора

Схема собрана в виде макета. Резисторы и конденсаторы соединяются со схемой с помощью гнезда. При эксперименте элементы схемы могут замещаться на элементы с другими значениями параметров при помощи галетных переключателей.

Частота автоколебаний мультивибратора, рассчитываемая по формуле

$$F \approx \frac{1}{0,7(R_2 \cdot C_1 + R_3 \cdot C_2)}, \quad (9)$$

экспериментально определяется частотомером ЧЗ-33. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 3. При равенстве частот градуированного генератора и мультивибратора на экране осциллографа видно неподвижное искаженное кольцо.

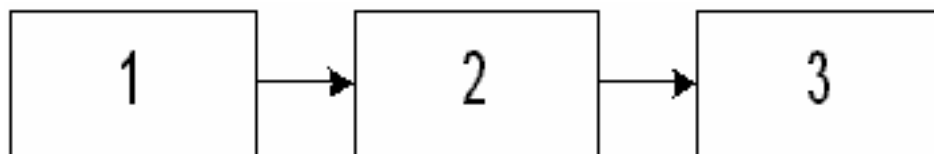


Рис. 3. Блок-схема испытаний:

1 – источник питания; 2 – мультивибратор; 3 – частотомер

Порядок проведения эксперимента

1. Собрать экспериментальную установку.
2. Измерить прибором параметры резисторов или конденсаторов, имеющихся в наборе.
3. Изменяя поочередно галетным переключателем значения параметров элементов установкой в макете резисторов и конденсаторов из набора, определять частоту автоколебаний мультивибратора.
4. По формуле (8) найти коэффициенты влияния.

Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методами расчета допусков и определения коэффициентов влияния.
2. Составить уравнение погрешностей для выражения (9) и рассчитать коэффициенты влияния. Величины параметров резисторов и конденсаторов указаны на макете.
3. Изучить методику проведения испытаний и ознакомиться с техническими характеристиками измерительных приборов, используемых в работе, и правилами работы с ними.

Лабораторное задание

1. Определить коэффициенты влияния методом малых приращений и расчетно-аналитическим.
2. Сравнить коэффициенты влияния, найденные методами малых приращений и расчетно-аналитическим.
3. Рассчитать допуски на частоту автоколебаний мультивибратора методами предельных отклонений и вероятностным. Допуски на параметры радиоэлементов задаются преподавателем.
4. Сравнить результаты расчета.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные формулы для расчета.
3. Блок-схема испытаний и результаты эксперимента.
4. Определение коэффициентов влияния методами расчетно-аналитическим и малых приращений.
5. Расчет допусков методами предельных отклонений и вероятностным.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как составляется исходное уравнение для определения погрешностей?
2. В чем заключаются особенности расчета допусков методами предельных отклонений и вероятностным?
3. Когда применяются методы расчетно-аналитический и малых отклонений для определения коэффициентов влияния? Их особенности.
4. Что понимается под коэффициентом влияния?
5. В чем заключаются задачи анализа и синтеза допусков?
6. Какие существуют виды допусков?
7. Что понимается под коэффициентами относительного рассеивания и относительной асимметрии?
8. Как работает мултивибратор?

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОМ МАТРИЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Цель работы. Изучение метода матричных испытаний и экспериментальное определение работоспособности усилителя низкой частоты (УНЧ).

Содержание работы

1. Матричные испытания УНЧ.
2. Определение вероятности работоспособного состояния УНЧ.
3. Оптимизация параметров УНЧ.

Методические указания

Метод матричных испытаний – метод физического моделирования. Он позволяет определить рабочую область радиоустройства при всех возможных значениях *первичных параметров*, находящихся в пределах допусков, оптимизировать его работоспособность.

Первичные параметры можно разбить на следующие группы:

- параметры деталей, из которых состоит устройство;
- параметры источников питания;
- параметры входных сигналов;
- параметры нагрузки;
- параметры, характеризующие условия окружающей среды.

Суть метода матричных испытаний и задачи оценки и оптимизации работоспособности по результатам этих испытаний поясним на примере устройства, работоспособность которого существенным образом зависит только от двух первичных параметров X_1 и X_2 . Такие параметры будем называть *определяющими первичными параметрами*.

Пусть диапазон возможного изменения этих параметров задан интервалами $[x_{1\min}, x_{1\max}]$ и $[x_{2\min}, x_{2\max}]$. Разобьем интервалы на $l^{(1)}$ и $l^{(2)}$ равных квантов соответственно (рис. 1).

В качестве *представителей квантов* выберем значения параметров, соответствующие серединам квантов. Если устройство оказывается неработоспособным (работоспособным) при значении параметров, соответствующем представителю кванта, то будем считать, что оно не работает (работает) при всех значениях параметров, лежащих в этом кванте.

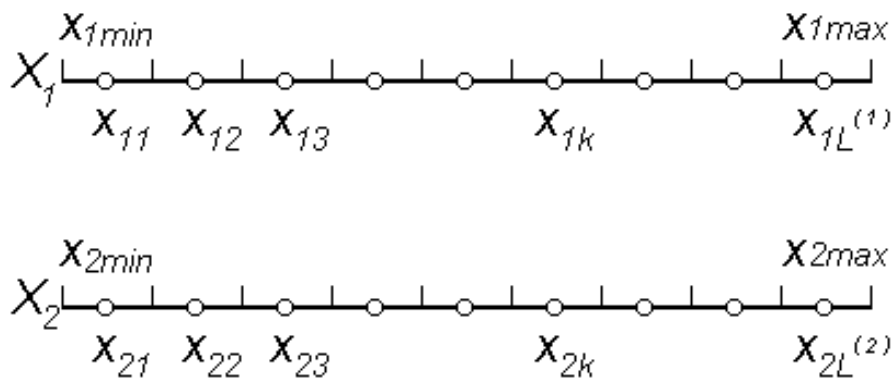


Рис. 1. Пример разбиения параметров X_1 и X_2 на кванты

Введем *понятие ситуации*, под которым будем понимать такое состояние устройства, когда каждый из его двух определяющих параметров (двумерный случай) принимает значение, соответствующее представителю определенного кванта. Определение легко распространить на n -мерный случай. Число всех возможных ситуаций устройства в двумерном случае, очевидно, равно

$$N_2 = l^{(1)} \cdot l^{(2)}.$$

Индекс 2 при N означает, что рассматривается двумерный случай, т.е. имеются два определяющих параметра. В общем случае при n опреде-

ляющих параметрах число возможных ситуаций равно

$$N = \prod_{i=1}^n l^{(i)}.$$

Перебрав в какой-либо последовательности все несовместные ситуации устройства, составим матрицу ситуаций. Для двумерного случая она будет иметь вид

$$\|\alpha_{n_2}\| = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{21} \\ x_{11} & x_{22} \\ \dots & \dots \\ x_{11} & x_{2l^{(2)}} \\ \dots & \dots \\ x_{12} & x_{21} \\ x_{12} & x_{22} \\ \dots & \dots \\ x_{1l^{(1)}} & x_{2l^{(2)}} \end{vmatrix}$$

В матрице вторая строка $x_{11} x_{22}$, например, означает, что параметр X_1 принял значение в первом, а параметр X_2 – во втором кванте.

Упорядоченную таким образом последовательность всех возможных ситуаций устройства обозначим

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{N_2}.$$

Среди N_2 возможных ситуаций устройства при матричных испытаниях будет обнаружено некоторое количество Q отказных ситуаций с точки зрения заданного *критерия отказа* рассматриваемого устройства. Отказные ситуации будем отмечать чертой сверху. Они могут быть определены натурным физическим моделированием, поскольку такое моделирование позволяет довольно точно воспроизвести работу устройства и автоматически учесть все факторы, влияющие на его работоспособность, в том числе и второстепенные, которые при всех других видах моделирования, как правило, не учитываются.

Результаты матричных испытаний позволяют найти область работоспособности устройства (рис. 2), вероятность нахождения выходного параметра в пределах поля допуска и оптимизировать работоспособность.

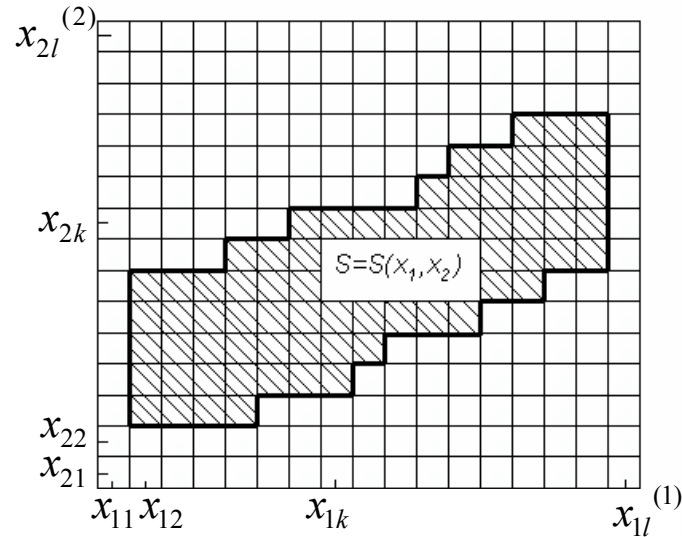


Рис. 2. Область работоспособности

Вероятность того, что схема окажется неработоспособной, выразится так:

$$P = \sum_{i=1}^Q P(\bar{\alpha}_i),$$

где Q – число отказных ситуаций.

Вероятность отказных ситуаций, если определяющие первичные параметры независимы, находят как произведение вероятностей нахождения параметров в соответствующих квантах. Например, для ситуации α_1

$$P(\alpha_1) = P(x_{11}) \cdot P(x_{21}).$$

Вероятность нахождения параметров X_1 и X_2 в квантах x_{11} и x_{21} можно вычислить, если известны законы распределения $f(x)$ этих параметров, по выражению

$$P(\alpha < X \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx.$$

Вероятность будет численно равна площади фигуры под кривой рас-

пределения, построенной на основании, равном длине кванта (рис. 3). При нормальном законе распределения эти вероятности могут быть найдены по формуле

$$P(\alpha < X \leq \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - m}{\sqrt{D}}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m}{\sqrt{D}}\right),$$

где $\Phi(z)$ – функция Лапласа (из таблицы П1); α, β – границы кванта; m, D – математическое ожидание и дисперсия соответственно.

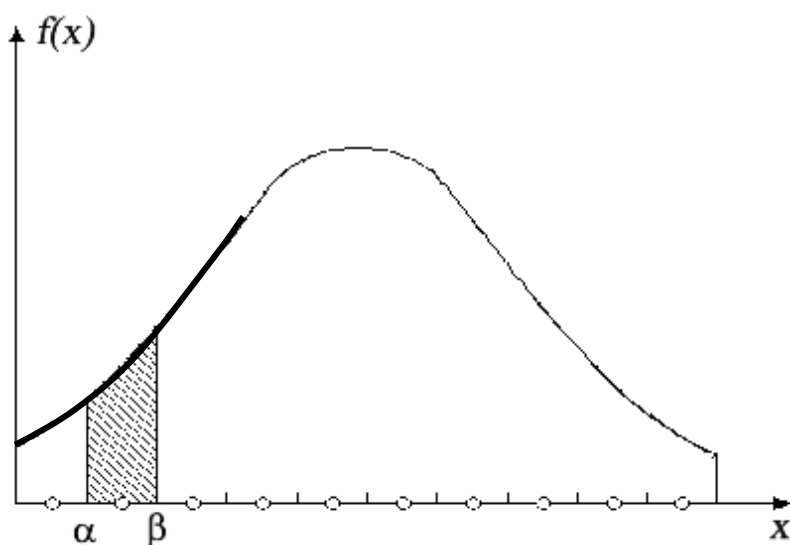


Рис. 3. Плотность распределения параметра X

Для сравнительной оценки вероятность работоспособности исследуемого устройства может быть найдена по формуле

$$P = 1 - \frac{Q}{N}.$$

Вероятность здесь будет несколько заниженной из-за принятия веса каждой отказной ситуации, равной единице. Если в некоторый фиксированный момент времени t известна плотность распределения параметров X_1 и X_2 , то задача оптимизации работоспособности исследуемого устройства для этого момента времени геометрически может рассматриваться как задача отыскания такого положения функции $f(x_1, x_2)$, чтобы объем, вырезаемый из $f(x_1, x_2)$, восстановленный цилиндром с основанием $S(x_1, x_2)$,

был бы максимальным. Аналитически это записывается в виде

$$P_{\max} = \max_{S(x_1; x_2)} \iint f(x_1 - m_{x_1}; x_2 - m_{x_2}) dx_1 dx_2,$$

где m_{x_1} , m_{x_2} – математическое ожидание функции $f(x_1, x_2)$;

$P_{\max}$ – максимальная вероятность нахождения выходного параметра в пределах поля допуска.

Практически задача оптимизации может быть сведена к расчету новых номинальных значений определяющих первичных параметров [1].

Эти значения могут быть установлены простой процедурой нахождения координат центра тяжести n -мерной области работоспособности (в рассматриваемом случае – двумерной области) исследуемого устройства. Координата центра тяжести по j -му параметру x_{jl} :

$$x_{jl} = x_{j1} + \frac{N(l^{(j)} - 1) \cdot \Delta x_j}{2 \cdot (N - Q)} \cdot \left[1 - \frac{2}{N \cdot (l^{(j)} - 1)} \cdot \sum_{\chi=1}^{l^{(j)}-1} \chi \cdot Q_{j, \chi+1} \right],$$

где N – общее количество ситуаций; Q – количество отказных ситуаций; $Q_{j, \chi+1}$ – количество отказных ситуаций, соответствующих $\chi+1$ кванту.

Достоинства метода матричных испытаний – возможность количественной оценки работоспособности. Недостатки – значительная трудоемкость и сложность использования для устройств, в которых моделирование первичных параметров затруднено.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема УНЧ представлена на рис.4. Он усиливает синусоидальное напряжение в диапазоне 50 Гц – 50 кГц.

Отказом считается уход коэффициента усиления K за пределы поля допуска. Наибольшее влияние на K оказывают сопротивление нагрузки в цепи коллектора $R3$, сопротивление автоматического смещения в цепи эмиттера $R4$, которое особенно критично [1], напряжение источника питания.

Для матричных испытаний устройство смонтировано в виде макета, установленного в термошкафу. При помощи галетных переключателей, рукоятки которых выведены на внешнюю сторону дверцы термошкафа,

можно устанавливать различные значения параметров резисторов $R3$ и $R4$.

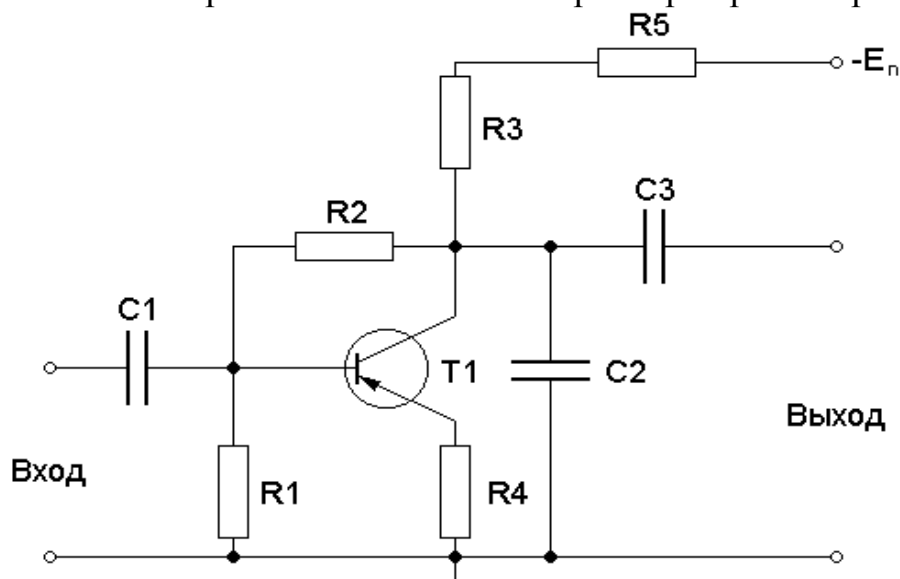


Рис. 4. Электрическая схема УНЧ

Порядок проведения эксперимента

Ознакомиться с макетом УНЧ. В соответствии со схемой измерений (рис. 5) соединить макет с источником питания и измерительными приборами.

Проверить работоспособность усилителя, построить частотную характеристику и произвести матричные испытания на частоте, указанной преподавателем, при заданном значении критерия отказа при температурах 20, 40, 60 °С и напряжениях питания 9,5; 10; 10,5 В, считая их средними значениями квантов.

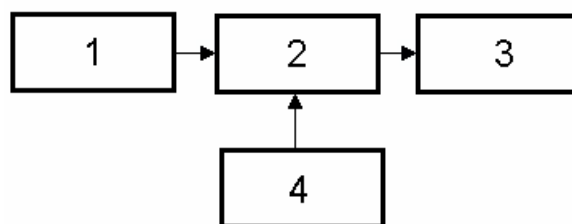


Рис. 5. Блок-схема испытаний:

1 – генератор; 2 – УНЧ; 3 – милливольтметр; 4 – источник питания

При установке температуры повернуть рукоятку терморегулятора до 5-го деления и включить шкаф. За 3 – 8 °С до требуемой температуры (момент определяется по термометру) рукоятку терморегулятора плавно поворачивать против часовой стрелки до тех пор, пока не погаснет лампа. Замерять через 30 минут (время, необходимое для установления теплового равновесия рабочей камеры).

Определить вероятность работоспособности усилителя по приближенной методике и с учетом законов распределения $R3$, $R4$, U_{num} и T °С. Виды законов распределения задаются преподавателем.

Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с методом матричных испытаний.
2. Изучить методику проведения испытаний.
3. Составить блок-схему испытаний, матрицу ситуаций, таблицы для регистрации результатов испытаний.
4. Ознакомиться с техническими характеристиками измерительных приборов, используемых в работе, и правилами работы с ними.

Лабораторное задание

1. Оценить работоспособность УНЧ по заданному критерию отказа при температурах 20, 40, 60 °С.
2. Рассчитать вероятность работоспособного состояния УНЧ при каждой температуре по упрощенной методике и с учетом законов распределения определяющих параметров.
3. Оптимизировать параметры УНЧ.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Блок-схема измерений, краткое описание лабораторного макета.
3. Матрица ситуаций и результаты испытаний.
4. Расчет вероятности работоспособного состояния УНЧ при каждой температуре и расчет оптимальных параметров.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. С какой целью производятся матричные испытания?
2. В чем заключаются достоинства и недостатки метода матричных испытаний? Сравните его с методом статистических испытаний.
3. Как составляется матрица ситуаций?
4. Как определить вероятность работоспособного состояния методом матричных испытаний?
5. Рассказать об оптимизации параметров с использованием метода матричных испытаний.
6. Что понимается под законом распределения параметров? Дайте понятие о функции и плотности распределения.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Цель работы. Изучение метода статистических испытаний.

Содержание работы

1. Расчет вероятности нахождения выходного параметра в пределах поля допуска с использованием таблиц.
2. Разработка алгоритма и программы расчета точности ЭС на ЭВМ.
3. Расчет на ЭВМ и анализ полученных результатов.

Методические указания

Метод статистических испытаний можно успешно применять для решения различных вопросов надежности и точности ЭС [5]. Особенность его в том, что он требует применения большого количества опытов или вычислений, поэтому наиболее эффективно он может применяться с использованием ЭВМ.

Теоретической основой метода является теорема Бернулли, в соответствии с которой при увеличении числа опытов частота появления события стремится к его вероятности. Сущность метода заключается в следующем. Будем считать, что функциональная зависимость

$$N = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

задана в аналитическом виде.

Примечание. Работа выполняется в двух вариантах.

Вариант 1 (без элементов научного исследования) – содержание работы включает пп.1 и 3; вариант 2 (с элементами УИРС) – содержание работы включает пп.2 и 3.

Под начальными (первичными) параметрами $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ и выходными параметрами N в зависимости от конкретной задачи могут пониматься размеры деталей, параметры электрорадиоэлементов и т.д. Напри-

мер, в формуле емкости между двумя коаксиальными цилиндрами

$$C = \frac{0,0556l}{\ln D/d} \quad (2)$$

выходной параметр C – емкость, первичные параметры ℓ , D и d – соответственно активная длина цилиндров, внутренний диаметр наружного цилиндра, наружный диаметр внутреннего цилиндра.

Подставляя в зависимость (1) по одному случайному значению $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, получим одно случайное значение N . Если многократно повторить расчет, подставляя каждый раз новые случайные значения x_i , выбранные в соответствии с их законами распределения, то получим множество случайных значений N . Обработав эти статистические данные, можем построить гистограмму и определить закон распределения параметра N .

Часто достаточно определить вероятность попадания параметра в пределы поля допуска, т.е. $P = (\alpha \leq N < \beta)$. На основе теоремы Бернулли при достаточно большом числе опытов за искомую вероятность можно принять частоту (статистическую вероятность), определяемую по формуле

$$P^* = m/n,$$

где m – число попаданий параметра N в заданный интервал;

n – общее количество вычислений.

Ошибка ε в определении искомой вероятности P по частоте P^* в зависимости от доверительной вероятности γ и числа вычислений n находится по формуле

$$\varepsilon = t_\gamma \sqrt{\frac{P^*(1-P^*)}{n}},$$

где t_γ – параметр распределения Стьюдента (берется из табл. П3 приложения).

Случайные значения параметров x_i могут моделироваться на ЭВМ. Методы такого моделирования подробно описаны в учебном пособии [5] или находятся при помощи таблиц случайных чисел [4], приведенных в табл.П4.- П7.

Пояснения к таблицам случайных чисел

В табл. П4 приведены случайные числа, равномерно распределенные в интервале от 0 до 10000. Для того чтобы получить отсюда случайные числа x_i , равномерно распределенные в интервале от 0 до 1, нужно все числа разделить на 10000.

Если нужны случайные числа u_i , равномерно распределенные в интервале от a , до b , то их можно получить при помощи линейного преобразования

$$u_i = a + x_i(b - a). \quad (3)$$

Пример. Найти три случайных числа, равномерно распределенных в интервале от 20 до 120.

Решение. Используя первые три числа из табл. П4 и уравнение (3), в котором полагаем $a = 20$, $b = 120$, получаем:

$$20 \pm \frac{1009}{10000} \cdot 100 = 30,09;$$

$$20 \pm \frac{7325}{10000} \cdot 100 = 93,25;$$

$$20 \pm 0,3376 \cdot 100 = 53,76.$$

В табл. П5 показаны случайные числа z_i для нормального распределения с параметрами $M(z_i)=0$ и $\sigma(Z_i)=10000$.

Если нужны случайные числа u_i , нормально распределенные с параметрами $M(u) = U_0$, $\sigma(u) = \sigma_u$, то их можно получить при помощи линейного преобразования

$$U_i = U_0 + \frac{Z_i}{1000} \sigma_u. \quad (4)$$

Пример. Найти два случайных числа для нормального распределения с параметрами $U_0 = 1000$, $\sigma_u = 200$.

Решение. Используя первые два числа из табл. П5, находим при по-

мощи уравнения (4):

$$1000 + \frac{464}{1000} \cdot 200 = 1093;$$

$$1000 + \frac{137}{1000} \cdot 200 = 1027.$$

В табл. П6 помещены случайные числа z , отвечающие экспоненциальному распределению с математическим ожиданием 1000. Если нужны случайные числа с математическим ожиданием U_0 , то их можно получить при помощи линейного преобразования

$$U_i = \frac{z_i}{1000} U_0. \quad (5)$$

Пример. Найти два случайных числа, отвечающих экспоненциальному распределению с математическим ожиданием $U_0 = 500$.

Решение. Используя первые два числа из табл. П6, находим при помощи уравнения (5):

$$\frac{550}{1000} \cdot 500 = 275; \quad \frac{426}{1000} \cdot 500 = 213.$$

В табл. П7 приведены случайные числа z_i , отвечающие распределению Вейбулла с параметрами $b = 1,5$ и математическим ожиданием 1000. Если нужны случайные числа u_i , отвечающие распределению Вейбулла с математическим ожиданием U_0 , то их можно получить при помощи линейного преобразования

$$u_i = \frac{z_i}{M(z)} U_0. \quad (6)$$

Пример. Найти два случайных числа, отвечающих распределению Вейбулла с параметрами $b = 1,5$ и $U_0 = 100$.

Решение. Используя два первых числа из табл. П7, для $b = 1,5$ находим при помощи уравнения (6):

$$\frac{1624}{1000} \cdot 100 = 162,4; \quad \frac{1371}{1000} \cdot 100 = 137,1.$$

Пусть, например, параметры ℓ , D и d имеют нормальный закон распределения с параметрами $M(\ell) = 10 \text{ см}$; $M(D) = 0,2 \text{ см}$;

$M(d) = 0,05 \text{ см}; \sigma(\ell) = 0,01 \text{ см}; \sigma(\ell) = 0,02 \text{ см}; \sigma(\ell) = 0,0004 \text{ см}.$

Определить $P(C_n - 5\% \leq C < C_n + 5\%)$.

Результаты расчета P^* целесообразно представить в виде таблицы, приведенной ниже.

№ п/п	ℓ , см		D , см		d , см		C , пФ	$3,81 \leq C < 4,21$ да – 1 нет – 0
	Случайное число	Случайная величина	Случайное число	Случайная величина	Случайное число	Случайная величина		
1	464	10,00464	-2526	0,19495	-634	0,04975	4,073	1
2	137	10,00137	-531	0,19894	697	0,05028	4,043	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...

$$P^* = 5/N.$$

Для расчета на ЭВМ в системе MatLab используется программа stat_lr.m. Запуск программы осуществляется из командного окна системы MatLab посредством набора имени файла в командной строке. В выпадающем меню окна необходимо выбрать одну из формул для проведения расчета, количество вычислений и предельные отклонение рассчитываемого параметра. После чего следует задать законы распределения каждой из входящих в расчетную часть формулы величин и параметры этих распределений. Результатом работы программы станет значение вероятности попадания расчетной величины в заданный интервал и гистограмма, характеризующая закон распределения этой величины.

Задание на подготовку к работе

1. Изучить метод статистических испытаний.
2. Подготовить таблицу для записи результатов ручного расчета по одной из формул, приведенных ниже и указанных преподавателем.
 1. $R = 0,12\rho E h_B / Q_K (1 - \nu)$ – переходное сопротивление контакта;
 2. $C = 0,884\epsilon S/d$ – емкость плоского конденсатора
 3. $C = 0,0556l/(\ln D/d)$ – емкость цилиндрического конденсатора;
 4. $R = R_0 [1 + \alpha(T_2 - T_1)]$ – сопротивление резистора в зависимости от температуры;
 5. $D = EH^3/12(1 - \nu^2)$ – цилиндрическая жесткость пластины.
3. Разработать алгоритм расчета на ЭВМ для новой задачи (только для варианта, выполняемого как УИРС).

Лабораторное задание

1. Рассчитать, используя таблицы случайных чисел, вероятность попадания выходного параметра (R , C , D) в поле допуска. Границы полей допусков, законы распределения первичных параметров и число вычислений задаются преподавателем.
2. Определить доверительный интервал для искомой вероятности по заданной преподавателем доверительной вероятности.
3. Подготовить исходные данные для расчета на ЭВМ и провести расчет.

Примечание. Для варианта работы, выполняемого как УИРС, вместо пп.1 – 2 предусматривается разработка программы расчета.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные для расчета.
3. Пример расчета.
4. Таблица с результатами ручного расчета и расчет доверительного интервала.
5. Алгоритм расчета на ЭВМ (только для УИРС).
6. Программа расчета (только для УИРС).
7. Результаты расчета на ЭВМ, расчет доверительного интервала, анализ полученных результатов.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что является теоретической основой метода статистических испытаний.
2. Порядок расчета вероятности методом статистических испытаний.
3. Как рассчитывается доверительный интервал для искомой вероятности?
4. Объяснить работу алгоритма расчета на ЭВМ (только для УИРС).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а П1

Значение функции Лапласа $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-x^2/2} dx$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,30	0,1179	0,60	0,2257	0,90	0,3159
0,01	0,0040	0,31	0,1217	0,61	0,2291	0,91	0,3186
0,02	0,0080	0,32	0,1255	0,62	0,2324	0,92	0,3212
0,03	0,0120	0,33	0,1293	0,63	0,2357	0,93	0,3238
0,04	0,0160	0,34	0,1331	0,64	0,2389	0,94	0,3264
0,05	0,0199	0,35	0,1368	0,65	0,2422	0,95	0,3289
0,06	0,0239	0,36	0,1406	0,66	0,2454	0,96	0,3315
0,07	0,0279	0,37	0,1443	0,67	0,2484	0,97	0,3340
0,08	0,0319	0,38	0,1480	0,68	0,2517	0,98	0,3365
0,09	0,0359	0,39	0,1517	0,69	0,2549	0,99	0,3389
0,10	0,0398	0,40	0,1554	0,70	0,2580	1,00	0,3413
0,11	0,0438	0,41	0,1591	0,71	0,2611	1,01	0,3438
0,12	0,0478	0,42	0,1628	0,72	0,2642	1,02	0,3461
0,13	0,0517	0,43	0,1664	0,73	0,2674	1,03	0,3485
0,14	0,0557	0,44	0,1700	0,74	0,2703	1,04	0,3508
0,15	0,0596	0,45	0,1736	0,75	0,2734	1,05	0,3531
0,16	0,0636	0,46	0,1772	0,76	0,2764	1,06	0,3554
0,17	0,0675	0,47	0,1808	0,77	0,2794	1,07	0,3577
0,18	0,0714	0,48	0,1844	0,78	0,2823	1,08	0,3599
0,19	0,0753	0,49	0,1879	0,79	0,2852	1,09	0,3621
0,20	0,0793	0,50	0,1915	0,80	0,2881	1,10	0,3643
0,21	0,0832	0,51	0,1950	0,81	0,2910	1,11	0,3665
0,22	0,0871	0,52	0,1985	0,82	0,2939	1,12	0,3686
0,23	0,0910	0,53	0,2019	0,83	0,2967	1,13	0,3708
0,24	0,0948	0,54	0,2054	0,84	0,2995	1,14	0,3729
0,25	0,0987	0,55	0,2088	0,85	0,3023	1,15	0,3749
0,26	0,1026	0,56	0,2123	0,86	0,3051	1,16	0,3770
0,27	0,1064	0,57	0,2157	0,87	0,3078	1,17	0,3790
0,28	0,1103	0,58	0,2190	0,88	0,3106	1,18	0,3810
0,29	0,1141	0,59	0,2224	0,89	0,3133	1,19	0,3830

О к о н ч а н и е т а б л . П1

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1,20	0,3849	1,55	0,4394	1,90	0,4713	2,50	0,4938
1,21	0,3869	1,56	0,4406	1,91	0,4719	2,52	0,4941
1,22	0,3883	1,57	0,4418	1,92	0,4729	2,54	0,4945
1,23	0,3907	1,58	0,4429	1,93	0,4732	2,56	0,4948
1,24	0,3925	1,59	0,4441	1,94	0,4738	2,58	0,4951
1,25	0,3944	1,60	0,4452	1,95	0,4744	2,60	0,4953
1,26	0,3962	1,61	0,4463	1,96	0,4750	2,62	0,4956
1,27	0,3980	1,62	0,4474	1,97	0,4756	2,64	0,4959
1,28	0,3997	1,63	0,4484	1,98	0,4761	2,66	0,4961
1,29	0,4015	1,64	0,4495	1,99	0,4767	2,68	0,4963
1,30	0,4032	1,65	0,4505	2,00	0,4772	2,70	0,4965
1,31	0,4049	1,66	0,4515	2,02	0,4783	2,72	0,4967
1,32	0,4066	1,67	0,4525	2,04	0,4793	2,74	0,4969
1,33	0,4082	1,68	0,4535	2,06	0,4803	2,76	0,4971
1,34	0,4099	1,69	0,4545	2,08	0,4812	2,78	0,4973
1,35	0,4115	1,70	0,4554	2,10	0,4821	2,80	0,4974
1,36	0,4131	1,71	0,4567	2,12	0,4830	2,82	0,4976
1,37	0,4147	1,72	0,4573	2,14	0,4838	2,84	0,4977
1,38	0,4162	1,73	0,4582	2,16	0,4846	2,86	0,4979
1,39	0,4177	1,74	0,4591	2,18	0,4854	2,88	0,4980
1,40	0,4192	1,75	0,4599	2,20	0,4861	2,90	0,4981
1,41	0,4207	1,76	0,4608	2,22	0,4868	2,92	0,4982
1,42	0,4222	1,77	0,4616	2,24	0,4875	2,94	0,4984
1,43	0,4236	1,78	0,4625	2,26	0,4881	2,96	0,49846
1,44	0,4251	1,79	0,4633	2,28	0,4887	2,98	0,49856
1,45	0,4265	1,80	0,4641	2,30	0,4893	3,00	0,49865
1,46	0,4279	1,81	0,4649	2,32	0,4898	3,20	0,49931
1,47	0,4292	1,82	0,4656	2,34	0,4904	3,40	0,49966
1,48	0,4306	1,83	0,4664	2,36	0,4909	3,60	0,49984
1,49	0,4319	1,84	0,4671	2,38	0,4913	3,80	0,499928
1,50	0,4332	1,85	0,4678	2,40	0,4918	4,00	0,499968
1,51	0,4345	1,86	0,4686	2,42	0,4922	5,00	0,499997
1,52	0,4357	1,87	0,4693	2,44	0,4927		
1,53	0,4370	1,88	0,4699	2,46	0,4931		
1,54	0,4382	1,89	0,4706	2,48	0,4934		

Примечание. $\Phi(-x) = 0,5 - \Phi(x)$

Т а б л и ц а П2

Значения χ^2 в зависимости от r и p

$r \backslash p$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41	6,64	10,83
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21	13,82
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	9,84	11,34	16,27
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28	18,46
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	13,39	15,09	20,5
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	15,03	16,81	22,5
7	1,239	1,564	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	16,62	18,48	24,3
8	1,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,1	26,1
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	19,68	21,7	27,9
10	2,56	3,06	3,91	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2	23,2	29,6
11	3,05	3,61	4,58	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68	22,6	24,7	31,3
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1	26,2	32,9
13	4,11	4,76	5,89	7,04	8,63	9,93	12,34	15,12	16,98	19,81	22,4	25,5	27,7	34,6
14	4,66	5,37	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,15	21,1	23,7	26,9	29,1	36,1
15	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	11,72	14,34	17,32	19,31	22,3	25,0	28,3	30,6	37,7
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,3
17	6,41	7,26	8,67	10,08	12,00	13,53	16,34	19,51	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	40,8
18	7,02	7,91	9,39	10,86	12,86	14,44	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
19	7,63	8,57	10,11	11,65	13,72	15,35	18,34	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	43,8
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
21	8,90	9,92	11,59	13,24	15,44	17,18	20,3	23,9	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	46,8
22	9,54	10,60	12,34	14,04	16,31	18,10	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
23	10,20	11,99	13,09	14,85	17,19	19,02	22,3	26,0	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	49,7
24	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	51,2
25	11,52	12,70	14,61	16,47	18,94	20,9	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,7	44,3	52,6
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,1
27	12,88	14,12	16,15	18,11	20,7	22,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	55,5
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
29	14,26	15,57	17,71	19,77	22,5	24,6	28,3	32,5	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	58,3
30	14,95	16,31	18,49	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7

Значения t_γ , удовлетворяющие равенству $2 \int_0^{t_\gamma} S_{n-1}(t) dt = \gamma$, в зависимости от γ и $n-1$

Т а б л и ц а ПЗ

$n-1 \backslash \gamma$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,08	6,31	12,71	31,8	63,7	636,6
2	142	289	445	617	0,816	1,061	1,336	1,886	2,92	4,30	6,96	9,92	31,6
3	137	277	424	584	765	0,978	1,250	1,638	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	134	271	414	569	741	941	1,190	1,533	2,13	2,77	3,75	4,60	8,61
5	132	267	408	559	727	920	1,156	1,476	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
6	131	265	404	553	718	906	1,134	1,440	1,943	2,45	3,14	3,71	5,96
7	130	263	402	549	711	896	1,119	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50	5,40
8	130	262	399	546	706	889	1,108	1,397	1,860	2,31	2,90	3,36	5,04
9	129	261	398	543	703	883	1,100	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25	4,78
10	129	260	397	542	700	879	1,093	1,372	1,812	2,23	2,76	3,17	4,59
11	129	260	396	540	697	876	1,088	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11	4,49
12	128	259	395	539	695	873	1,083	1,356	1,782	2,18	2,68	3,06	4,32
13	128	259	394	538	694	870	1,079	1,350	1,771	2,16	2,65	3,01	4,22
14	128	258	393	537	692	868	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98	4,14
15	128	258	393	536	691	866	1,074	1,341	1,753	2,13	2,60	2,95	4,07
16	128	258	392	535	690	865	1,071	1,337	1,746	2,12	2,58	2,92	4,02
17	128	257	392	534	689	863	1,069	1,333	1,740	2,11	2,57	2,90	3,96
18	127	257	392	534	688	862	1,067	1,330	1,734	2,10	2,55	2,88	3,92
19	127	257	391	533	688	861	1,066	1,328	1,729	2,09	2,54	2,86	3,88
20	127	257	391	533	687	860	1,064	1,325	1,725	2,09	2,53	2,84	3,85
21	127	257	391	532	686	859	1,063	1,323	1,721	2,08	2,52	2,83	3,82
22	127	256	390	532	686	858	1,061	1,321	1,717	2,07	2,51	2,82	3,79
23	127	256	390	532	685	858	1,060	1,319	1,714	2,07	2,50	2,81	3,77
24	127	256	390	531	685	857	1,059	1,318	1,711	2,06	2,49	2,80	3,74
25	127	256	390	531	684	856	1,058	1,316	1,708	2,06	2,48	2,79	3,72
26	127	256	390	531	684	856	1,058	1,315	1,706	2,06	2,48	2,78	3,71
27	127	256	389	531	684	855	1,057	1,314	1,703	2,05	2,47	2,77	3,69
28	127	256	389	530	683	855	1,056	1,313	1,701	2,05	2,47	2,76	3,67
29	127	256	389	530	683	854	1,055	1,311	1,699	2,04	2,46	2,76	3,66
30	127	256	389	530	683	854	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75	3,65
40	126	255	388	529	681	851	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70	3,55
60	126	254	387	527	679	848	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66	3,46
120	126	254	386	526	677	845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,36	2,62	3,37
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,33	2,58	3,29

Равномерно распределенные случайные числа

1009	7325	3376	5201	3586	3467	3548	7680	9590
3754	2048	564	8947	4296	2480	5240	3720	6361
842	2689	5319	6450	9303	2320	9025	6015	9533
9901	9025	2909	3767	715	3831	1311	6588	6767
1280	7999	7080	1573	6147	6403	2366	5398	9511
6606	5747	1734	727	6850	3669	7361	7065	8133
3106	108	545	5718	2406	3530	3426	1486	7990
8526	9776	202	516	5692	6866	5748	1873	538
6357	3321	3505	3254	7048	9055	3575	4828	4682
7379	6457	5303	5296	4778	3580	8342	8260	9352
9852	177	6714	9056	8607	2210	9405	5860	9709
1180	5054	3139	8082	7732	5072	5682	4829	4052
8345	2996	3406	2889	8083	1374	6700	7818	4754
8868	5402	86	5075	8401	3676	6679	5190	3647
9959	4673	4887	5176	4969	9182	6089	2893	7856
6548	1176	7417	4685	950	5804	7769	7473	395
8012	4356	3517	7270	8015	4531	8223	7421	1157
7435	998	1777	4027	7214	4323	6002	1045	5216
6991	6268	366	2522	9148	3693	6872	376	6211
989	3205	514	2256	8514	4642	7567	8896	2977
9149	9145	2368	4792	7686	4616	2835	5494	7508
8033	6945	9826	9403	6858	7029	7341	3553	1403
4410	4819	4985	1574	7954	3297	9265	7557	6004
1255	737	4211	1000	2040	1286	746	9796	6448
6360	6493	2916	5053	4484	4021	9525	6343	6517
6119	6904	4626	4574	7774	5192	4337	2965	3945
1547	4452	6695	2707	9953	5936	7838	4882	3961
9455	7285	7367	8975	4387	5462	2444	3191	1904
4248	1162	1397	3440	8721	1686	8487	6703	711
2352	3783	1773	2088	9837	6893	5914	1626	2522
449	3524	9475	2463	3824	4586	2510	2561	9627
54	9976	5464	518	8159	9611	9638	9654	6928
3596	3153	726	8980	9354	3335	1354	6277	9745
5980	8083	9145	4272	6842	8360	9497	13	212
4605	8852	3601	3909	2286	7728	1440	7793	9108
3217	9005	9787	3792	5241	556	7070	786	7431
6923	4614	620	1174	5204	1595	6600	18	7439
1956	5414	3001	7587	5379	4041	9215	8566	6749
4515	5149	3819	4760	7246	4366	7945	4359	479
9486	1994	9436	1681	851	3488	8815	5301	5403

Нормально распределенные случайные числа

 $M(z) = 0,$ $\sigma(z) = 1000$

464	137	2455	-323	-68	296	-288	1298	241
60	-2526	-531	-194	543	-1558	187	-1190	22
1486	-354	-634	697	926	1375	788	-963	-853
1022	-472	1279	3521	571	-1851	194	1192	-501
1384	-555	46	321	2945	1974	-258	412	439
906	-513	-525	595	881	-934	1579	161	-1885
1179	-1055	7	769	971	712	1090	-631	-255
-1501	-488	-162	-136	1033	203	448	748	-423
-690	756	-1618	-345	-511	-2051	-457	-218	857
1372	225	378	761	181	-736	960	-1530	-260
-482	1678	-57	-1229	-486	856	-491	-1983	-2830
-1376	-150	1356	-561	-256	-312	219	779	953
-1010	598	-918	1598	65	415	-169	313	-973
-5	-899	12	-725	1147	-121	1096	481	-1691
1393	-1163	-911	1231	-199	-246	1239	-2574	-558
-1787	-261	1237	1046	-508	-1630	-146	-392	-627
-105	-357	-1384	360	-992	-116	-1698	-2832	-1108
-1339	1827	-959	424	969	-1141	-1041	362	-1726
1041	535	731	1377	983	-1330	1620	-1040	524
279	-2056	717	-873	-1096	-1396	1047	89	-573
-1805	-2008	-1633	542	250	-166	32	79	471
-1186	1180	1114	882	1265	-202	151	-376	-310
658	-1141	1151	-1210	-927	425	290	-902	610
-489	358	-1939	891	-227	602	873	-437	-220
-1399	-230	385	-649	-577	237	-289	513	738
199	208	-1083	-219	-291	1221	1119	4	-2015
159	272	-313	84	-2828	-439	-792	-1275	-623
2273	606	606	-747	247	1291	63	-1793	-699
41	-307	121	790	-584,	541	484	-986	481
-1132	-2098	921	145	446	-1661	1045	-1363	-586
768	79	-1473	34	-2127	665	84	-880	-579
375	-1658	-851	234	-656	340	-86	-158	-120
-513	-344	210	-736	1041	8	427	-831	191
292	-521	1266	-1206	-899	110	-528	-813	71
1026	2990	-674	-491	-1114	1297	-1433	-1345	-3001
-1334	1278	-568	-109	-515	-566	2923	500	359
-287	-144	-254	574	-451	-1181	-1190	-318	-94
161	-886	-921	-509	1410	-518	192	-432	1501
-1346	193	-1202	394	-1045	843	942	1045	31
1250	-199	-288	1810	1378	584	1216	733	402

Случайные числа, распределенные по экспоненциальному закону

$$M(z)=1000$$

550	426	711	497	1705	1679	1023	474	424	103
334	68	1705	860	487	54	3433	314	389	1272
305	2856	1651	1358	293	597	307	522	368	616
355	5714	3705	69	216	161	414	18	513	1482
1774	125	585	456,	763	1252	1144	903	98	1457
629	14	635	328	1474	273	1478	296	358	2120
840	652	145	1367	9	25	880	285	546	812
1337	85	2256	177	540	1336	295	475	453	386
2827	2651	572	535	3943	2642	242	31	16	2402
411	1972	1992	1295	135	2133	1956	1061	453	361
1036	405	546	434	169	1394	275	729	78	798
2366	7	615	236	151	100	587	2069	3417	132
1194	1419	1437	395	661	939	214	62	47	2289
595	62	840	284	330	1029	2206	1115	1178	274
446	495	3417	306	439	190	1063	3216	1244	1666
1584	2033	771	1529	1021	2534	310	288	1155	164
6320	1044	1260	1116	952	668	3583	257	66	299
585	438	1828	674	63	1133	615	477	86	1319
140	438	11	17	1086	655	1225	360	1720	1546
1162	386	604	956	2417	1399	41	348	2891	984
2157	920	132	247	2561	1782	366	1055	1151	3231
72	1083	799	1358	535	247	2527	2338	2504	267
72	216	1284	1189	934	26	4710	1205	3124	568
848	358	518	1656	1645	2314	1224	645	23	173
637	17	4841	541	1768	171	1730	2729	1902	691
2358	1119	272	781	524	41	1370	1088	4615	26
4	2045	483	33	1678	724	950	483	833	4110
357	1921	523	782	309	851	3642	1020	3490	66
1161	402	106	88	874	112	1007	573	2168	568
1309	843	1594	247	1770	387	572	125	2680	2551

Случайные числа, распределенные по закону Вейбулла

$b = 0,5 \quad M(z) = 100$									
26	17	51	11	1	47	0	13	767	7
207	56	61	1271	79	0	881	60	616	38
4	108	0	137	12	1084	71	34	59	34
3	1	25	11	113	326	3	178	273	226
540	22	24	127	105	2	51	832	501	1
18	1	1775	13	74	2076	572	15	1	39
1	101	29	220	46	512	1928	142	18	89
31	1	371	16	4	34	112	200	24	169
10	43	331	19	12	127	18	43	79	353
3	10	0	9	753	209	38	404	0	121
668	83	40	27	813	0	32	27	208	3
127	105	17	25	4	26	322	191	64	211
$b = 1,5 \quad M(z) = 1000$									
1624	1371	429	292	196	645	995	1869	995	2730
1124	178	203	1393	638	894	1833	1690	921	929
1284	884	595	1719	212	514	1742	1193	133	1452
634	420	742	696	1447	1383	551	214	364	762
512	510	1992	1141	1126	1454	546	449	1648	1275
856	1051	125	991	388	296	788	1092	1968	2847
460	1282	283	1366	1346	1559	803	842	101	1863
770	500	183	2195	412	43	1819	655	236	1094
1079	619	424	461	1279	799	1432	852	822	793
495	464	70	686	29	2400	1004	1236	1180	142
165	296	1576	1153	532	1709	1617	986	1257	2502
1497	1072	776	317	576	140	127	278	822	2652
$b = 2,0 \quad M(z) = 1000$									
1452	969	1124	1559	1061	1998	1037	507	310	1101
359	871	1332	1284	909	1226	454	242	841	565
957	596	969	194	1204	1142	1655	1393	537	1460
688	1203	1128	882	331	350	1540	355	676	341
1249	403	908	651	2670	2080	1425	1164	716	822
640	1791	749	508	588	582	448	1358	201	1618
1558	1288	703	1205	1045	1302	1111	790	1261	983
2124	328	1398	1481	583	609	501	1144	356	305
538	1731	931	497	584	826	1539	1360	688	1080
689	876	1261	1151	866	761	1113	1097	879	815
219	1925	939	855	857	963	1177	1217	231	1882
476	836	728	1041	893	954	645	484	640	2075

Библиографический список

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
2. Управление качеством электронных устройств: Учеб. для вузов / *О.П. Глудкин, А.И. Гуров, А.И. Коробов и др.*; Под ред. *О.П. Глудкина*. – М.: Высш. шк., 1994. – 416 с.
3. *Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В.* Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1973. – 108 с.
4. *Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И.* Таблицы для анализа и контроля надежности. – М.: Сов. радио, 1968. – 288 с.
5. *Талицкий Е.Н.* Введение в статистическое моделирование на ЭЦВМ: Учеб. пособие / Иваново, 1975. – 56 с.

Оглавление

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Определение закона распределения параметра радиоэлемента.....	5
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициентов влияния и расчет электрических допусков.....	10
Лабораторная работа № 3. Определение точности методом матричных испытаний.....	19
Лабораторная работа № 4. Определение точности методом статистических испытаний.....	27
Приложение.....	33
Библиографический список.....	41

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
Методические указания к лабораторным работам

Составитель

ТАЛИЦКИЙ Евгений Николаевич

Ответственный за выпуск – зав.кафедрой профессор М.В. Руфицкий

Редактор-корректор Е.П. Викулова

Верстальщик Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 02.12.02.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,71. Тираж 100 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс

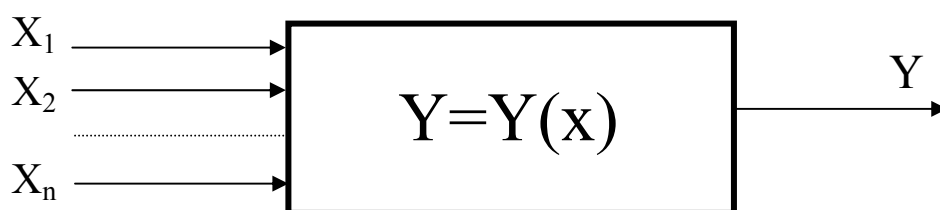
Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.

Владимирский государственный университет

Анализ точности электронных средств

Методические указания
к лабораторным работам



Владимир 2002