

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР  
КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.П.КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА  
ПО ПОСТЕПЕННЫМ ОТКАЗАМ

Лабораторная работа № 2

по курсу "Теоретические основы конструирования,  
технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры"

Куйбышев 1978

Приведено описание лабораторной работы, составленной в соответствии с программой курса "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры" специальности 0705. Лабораторная работа рассчитана на 4 часа занятий и предназначена для приобретения практических навыков в исследовании надежности радиоэлектронной аппаратуры по постепенным отказам методом граничных испытаний.

Утверждена на редакционно-издательском  
совете института 6.10.77 г.

Составители: В.В.Андреева, М.С.Пурсуков,  
И.А.Ухова

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Постановка задачи анализа надежности по постепенным отказам

Задачей анализа надежности по постепенным отказам является определение работоспособности РЭУ при возможных постепенных изменениях параметров комплектующих элементов в условиях эксплуатации. Изменение параметров элементов происходит вследствие старения и действия внешних и внутренних факторов.

Для оценки надежности РЭУ по постепенным отказам используются методы физического и математического моделирования.

При анализе надежности по постепенным отказам методами математического моделирования должны быть известны:

1. Аналитическое выражение, описывающее работу РЭУ, в виде некоторой функции

$$y_i = F_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n), \quad (1.1)$$

где  $y_i$  - выходной параметр РЭУ,  $i = 1, 2, \dots, m$  ;

$m$  - количество выходных параметров;

$x_j$  - входной параметр РЭУ,  $j = 1, 2, \dots, n$  ;

$n$  - количество входных параметров.

В общем случае работоспособность РЭУ характеризуется несколькими выходными параметрами (например, амплитудой, частотой, длительностью выходных импульсов) и оценивается по каждому из выходных параметров неравенством

$$y_i^{min} \leq y_i \leq y_i^{max} \quad (1.2)$$

Иными словами, РЭУ считается работоспособным по данному параметру, если его значение находится в допустимых пределах.

Все входные параметры можно разбить на следующие группы:

- параметры радиоэлементов, из которых состоит РЭУ;
- параметры источников питания;
- параметры входных сигналов;
- параметры нагрузки, к которой подключается исследуемый РЭУ;
- параметры, характеризующие условия окружающей среды.

В силу различных причин (технологический разброс параметров, старение материалов, нестабильность питания, изменение условий окружающей среды и др.) значения входных параметров меняются, что приводит к изменению выходных параметров.

2. Плотности распределения значений входных параметров и их зависимость от времени эксплуатации при условии, что входные параметры изменяются независимо друг от друга. Однако это условие, как правило, не выполняется на практике. Поэтому необходимо знать совместную  $n$ -мерную плотность распределения входных параметров.

Располагая подобными исходными данными, можно в принципе поставить задачу аналитического определения плотности распределения выходных параметров и последующего определения вероятности того, что они находятся в заданных пределах.

Однако практическая реализация методов расчета, основанных на строгой аналитической модели, осложняется целым рядом обстоятельств, не позволяющих использовать эти методы в практике.

Во-первых, аналитические зависимости (I.I) для большинства схем РЭУ—приближенные и не учитывают всех входных параметров.

Во-вторых, отсутствуют полные данные о совместных плотностях распределения входных параметров. Это объясняется огромной сложностью и трудоемкостью подобных исследований.

В-третьих, решение такой задачи даже для простых РЭУ с небольшим количеством входных параметров наталкивается на математические трудности, обусловленные сложностью совместной многомерной плотности распределения входных параметров.

Поэтому при математическом моделировании постепенных отказов используют различные допущения (например, о независимости отклонения параметров или о линейности функций (I.I) и решают задачу приближенно либо аналитически, либо с применением ЭВМ. Однако приближенные методы, хотя и решают задачу определения надежности по постепенным отказам, но за счет введенных допущений приводят к существенным погрешностям, особенно при большом числе входных параметров.

Достоинством методов исследования надежности по постепенным отказам на основе математического описания РЭУ является их значительно меньшая трудоемкость по сравнению с методами физического моделирования.

При исследовании надежности РЭУ по постепенным отказам методами физического моделирования постепенные изменения входных параметров моделируются на реальной физической модели – макете РЭУ.

Одним из таких методов является метод граничных испытаний [1].

## I.2. Метод граничных испытаний

Граничными испытаниями называется экспериментальное определение границ области безотказной работы РЭУ при изменении входных параметров соответственно реальным условиям эксплуатации. Целью граничных испытаний является:

выбор номинальных значений параметров, применяемых в узле радиоэлементов;

выбор допусков на применяемые в узле радиоэлементы;

выбор номинальных значений питающих напряжений.

Если в уравнение (I.I) подставить граничные значения выходного параметра  $y_{i \min}$  и  $y_{i \max}$ , то получатся уравнения:

$$\left. \begin{aligned} y_{i \min} &= F_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ y_{i \max} &= F_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \end{aligned} \right\}, \quad (I.3)$$

которые описывают две в общем случае криволинейные поверхности в  $n$ -мерном пространстве входных параметров. Область, ограничен-

ная поверхностями (I.3), в которой выполняются неравенства (I.2), является областью безотказной работы (ОБР) по выходному параметру  $y_i$ . Если число выходных параметров равно  $m$ , то в общем случае число граничных поверхностей  $k$  будет  $m \leq k \leq 2m$ . Область, ограниченная всеми  $k$  поверхностями, является областью безотказной работы РЭУ по всем выходным параметрам. Эта область не обязательно замкнута.

В любой момент времени совокупность параметров  $x_j$  характеризует место нахождения рабочей точки  $P$  в  $n$ -мерном пространстве. Если все параметры  $x_j$  примут номинальные значения  $x_{jn}$ , которыми обычно оперирует конструктор при разработке РЭУ, то они определяют номинальную рабочую точку  $H$ . Так как входные параметры не постоянны, фактическая рабочая точка  $P$  подвижна и практически не совпадает с номинальной рабочей точкой  $H$ . При неблагоприятном сочетании значений входных параметров она может выйти за пределы ОБР, то есть произойдет отказ РЭУ.

Обычно, исходя из условий эксплуатации, заданного срока службы, сведений о выходных сигналах и нагрузке РЭУ, можно определить пределы изменения каждого из входных параметров в конкретных условиях эксплуатации, т.е.  $x_{jmin} \leq x_j \leq x_{jmax}$ .

В табл. II приведены данные об изменении параметров резисторов и конденсаторов в процессе эксплуатации (табл. II.1).

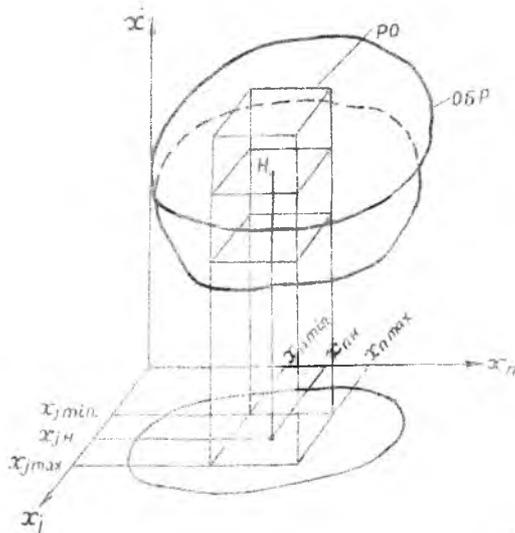
Геометрическое место всех возможных рабочих точек образует так называемую рабочую область (РО), ограниченную плоскостями  $x_{jmin}, x_{jmax}$  (рис. I.I).

Кроме того, для входных параметров известен производственный допуск  $x_{jнижн}, x_{jверхн}$ . Поэтому в начальный период эксплуатации параметр  $x_j$  находится в пределах  $x_{jнижн} \leq x_j \leq x_{jверхн}$ , определяемых его производственным допуском. Геометрическое место всех возможных рабочих точек для начального периода эксплуатации образует расчетную область, ограниченную плоскостями  $x_{jнижн}, x_{jверхн}$ . Расчетная область, как правило, лежит внутри рабочей области (на рис. I.I не показана).

Если рабочая область нигде не выходит за пределы ОБР, то это означает, что РЭУ хорошо спроектирован.

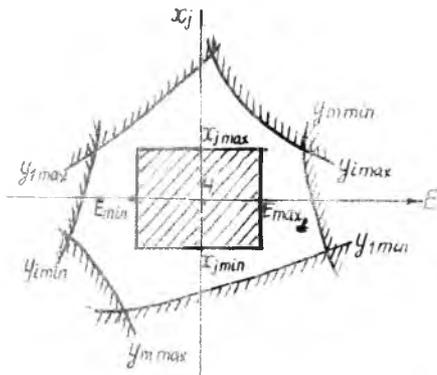
Метод граничных испытаний заключается в установлении области безотказной работы и оценке расположения относительно нее рабочей области, т.е. области, в которой практически возможно нахождение рабочей точки  $P$ .

Так как число входных параметров  $n \gg 3$ , представить себе конфигурацию ОБР невозможно. О ней можно получить некоторое представление, если рассматривать проекции сечений ОБР плос-



Р и с.1.1. Построение области безотказной работы, расчетной и рабочей областей

костями (рис.1.2.). К получению подобных проекций и сводится на практике выполнение граничных испытаний. В соответствии с принятым критерием отказа РЭУ, характеризуемым моментом достижения выходными параметрами допустимых предельных значе-



Р и с.1.2. Проекция сечений ОБР плоскостями, параллельными координатным

ний ( $Y_{imin}$ ,  $Y_{imax}$ ), определяются границы ОБР в координатах ( $E$ ,  $x_j$ ), где  $E$  - параметр граничных испытаний. Для транзисторных схем это обычно напряжение питания в цепи коллектора, так как оно наиболее существенно влияет на выходные параметры РЭУ,  $x_j$  - любой другой из входных параметров.

Всем входным параметрам придаются некоторые исходные значения (номинальные), затем, задавшись рядом значений граничного параметра  $E$ , определяют для каждого из них те значения другого входного параметра  $x_j$ , при которых выходные параметры выходят за заданные пределы ( $Y_{imin}$ ,  $Y_{imax}$ ). Получившийся ряд точек соединяют кривыми. Область, лежащая внутри этих кривых, для которой справедливы неравенства (1.2), и будет проекцией сечения ОБР плоскостью, параллельной координатным осям ( $E$ ,  $x_j$ ). Затем строят проекцию сечения рабочей области (РО заштрихована на рис. 1.2).

Если РО нигде не выходит за пределы ОБР, то можно утверждать, что при исходных значениях остальных входных параметров схема работает надежно.

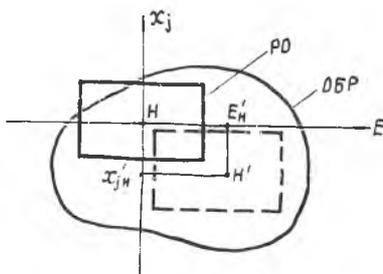
Если хотя бы один из остальных входных параметров изменит свое значение, то конфигурация проекции сечения ОБР изменится. Для полной проверки схемы необходимо убедиться, что РО нигде не выходит за пределы ОБР при всех практически возможных сочетаниях значений остальных входных параметров. Количество требуемых опытов при этом велико. Поэтому на практике обычно находят граничные кривые в координатах тех входных параметров, которые наиболее сильно влияют на работу схемы. Остальным выходным параметрам дают одно или два значения в пределах допусков, наиболее неблагоприятных для работы схемы. Естественно, что качество проведения граничных испытаний при этом более низкое.

Несмотря на отмеченные недостатки, метод граничных испытаний является весьма ценным, так как он дает возможность скорректировать выбранные разработчиком номинальные значения и допуски на входные параметры для достижения наибольшей надежности по постепенным отказам.

Пусть, например, в результате граничных испытаний получены ОБР и РО, как это показано на рис. 1.3. Схема будет более надежной, если номинальную точку  $H$  сдвинуть в точку  $H'$ . Однако, при этом необходимо сразу проверить, не вызовет ли это

выход РО из ОБР  
в координатах других вход-  
ных параметров.

По результатам проведен-  
ных граничных испытаний можно  
сделать заключение о серийно-  
пригодности РЭУ. Под серийно-  
пригодностью РЭУ по выходным  
параметрам понимают свойст-  
во РЭУ, обеспечивающее вос-  
производимость его парамет-  
ров от партии к партии и от



Р и с.1.3. Взаимное перекрытие  
ОБР и РО

образца к образцу в заданных пределах в процессе изготовления. Это свойство РЭУ должно быть сформировано на этапе конструирования. При разработке схем РЭУ необходимо уделять внимание не только обеспечению заданных электрических параметров. Следует помнить, что нельзя применять схемные решения, не удовлетворяющие условиям серийного производства, схемы, критичные к разбросу параметров полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов и др., к расположению монтажных проводов. Введение регулировочных элементов или специальный подбор элементов (например, транзисторов) по параметрам является нарушением принципов грамотного конструирования РЭА.

РЭУ, для которых невозможно выбрать рабочую область с достаточным удалением ее <sup>от</sup> границ области безотказной работы ни сдвигом номинальной рабочей точки, ни уменьшением допусков на входные параметры, следует считать непригодными к серийному производству.

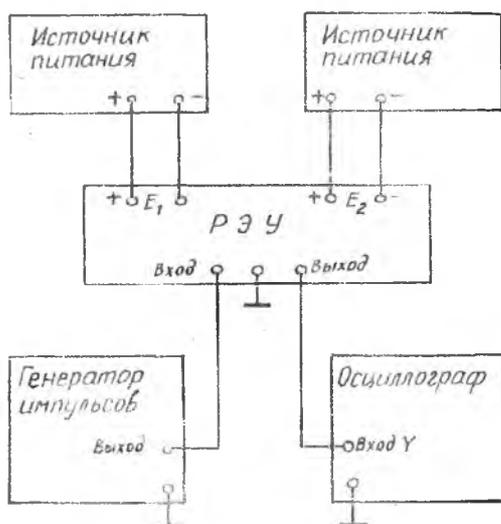
## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

### 2.1. Описание макета и блок-схемы измерений

В качестве исследуемых РЭУ в данной лабораторной работе используются ждущие мультивибраторы, принципиальные схемы кото-

рых приведены в работе [3]. Конструктивно мультивибраторы выполнены в виде печатных плат, на которых расположены радиоэлементы. Каждая плата имеет выводы для подключения к двум источникам питания и измерительным приборам (генератору импульсов и осциллографу). Для соблюдения правильности подключения выводы имеют маркировку.

Запуск мультивибратора осуществляется от генератора импульсов. Контроль и измерение параметров выходных импульсов производится осциллографом. При проведении граничных испытаний соединение макета с измерительными приборами следует производить согласно блок-схеме, представленной на рис. 2.1.



Р и с . 2 . 1 . Блок-схема измерений

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа рассчитана на 4 часа и выполняется за 2 занятия по 2 часа каждое. На первом занятии выдается макет РЭУ, и вся лабораторная работа выполняется на этом макете.

Отчет составляется по результатам работы после каждого занятия и предьявляется преподавателю в начале следующего занятия.

#### 3.1. Первое занятие

Для занятия необходимо:

- ознакомиться с постановкой задачи анализа надежности РЭА по постепенным отказам (с. 3 - 5);
- изучить методику проведения граничных испытаний (с. 5-9).

К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы  
д л я   п р о в е р к и   п о д г о т о в л е н н о с т и  
к   в ы п о л н е н и ю   р а б о т ы  
н а   п е р в о м   з а н я т и и

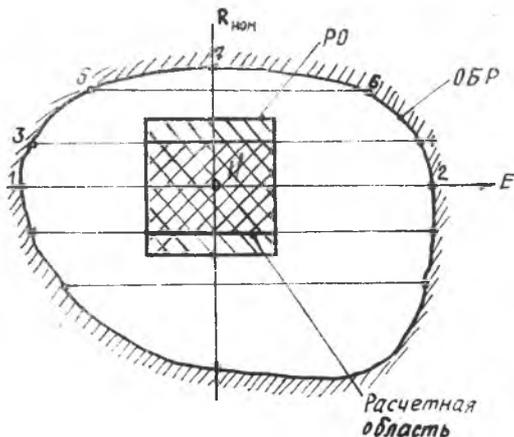
1. В чем заключается исследование надежности РЭУ по постепенным отказам на основе математической и физической модели?
2. В чем состоит цель граничных испытаний?
3. Что понимается под входными и выходными параметрами РЭУ?
4. Что понимается под критерием отказа РЭУ?
5. Из каких соображений выбирается параметр граничных испытаний?
6. Какие радиоэлементы в наибольшей степени влияют на надежность РЭУ по постепенным отказам?

П о р я д о к   в ы п о л н е н и я   р а б о т ы  
н а   п е р в о м   з а н я т и и

1. В соответствии с блок-схемой измерений (рис. 2.1) подключить источники питания и приборы, включить их и убедиться в работоспособности РЭУ.

2. Установить критерий отказа РЭУ по всем выходным параметрам;

3. Исходя из принципа работы РЭУ выбрать резистор, отклонения параметров которого в наибольшей степени по сравнению с другими резисторами влияют на параметры выходного сигнала. Отключить питание, выпаять резистор и на его место поставить переменный резистор соответствующего номинала (или магазин сопротивлений). Включить питание и, изменяя сопротивление потенциометра, получить на выходе сигнал первоначальной формы. Уменьшая, а затем увеличивая (не более, чем до 15В) напряжение источника питания коллекторной цепи, определить напряжение, при котором наступает отказ РЭУ хотя бы по одному из параметров. Полученные точки 1 ( $E_{\text{мин}}, R_{\text{ном}}$ ) и 2 ( $E_{\text{макс}}, R_{\text{ном}}$ ) отметить на графике (рис. 3.1). Если при увеличении напряжения до 15В не произошло отказа ни по одному из параметров, то точка 2 не ставится. Точка пересечения осей координат



Р и с. 3.1. Построение ОБР по результатам эксперимента

каждый раз напряжение питания, находится область безотказной работы РЭУ при  $R > R_{\text{ном}}$ , аналогично при  $R < R_{\text{ном}}$ . Соединяя полученные точки, находим ОБР (рис. 3.1). Эта область может оказаться и незамкнутой.

Кроме графика граничных испытаний для каждого исследуемого резистора приводится таблица, в которой указываются параметры и форма выходного импульса, вид отказа, относительное изменение

соответствует номинальным значениям напряжения питания  $E_{\text{ном}}$  и сопротивления исследуемого резистора  $R_{\text{ном}}$ . Затем сопротивление увеличивается (примерно на 20%), и опять находятся минимальное и максимальное напряжения, при которых наступает отказ РЭУ. На графике (рис. 3.1) снова отмечаются точки, соответствующие отказу (точки 3,4).

Так, последовательно увеличивая сопротивление резистора и изменяя

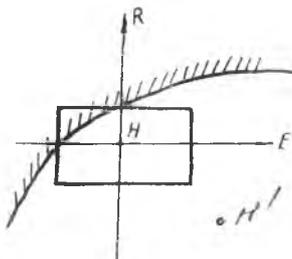
величины сопротивления  $\Delta R/R_{\text{ном}}$  в каждой точке ( в качестве примера - табл. 3.1).

4. Исходя из расположения границ области безотказной работы, назначить допуски на отклонение сопротивления данного резистора и напряжения питания. На графике (рис. 3.1) строится рабочая и расчетная области.

Расчетная область работы РЭУ определяется, исходя из производственных допусков на разброс сопротивлений резистора. Величина производственного допуска для резисторов конкретного типа и номинала указывается в справочниках.

Рабочая область строится, исходя из возможного отклонения сопротивления резистора в процессе эксплуатации. Данные об изменении сопротивления резисторов под действием внешних факторов и старения приведены в табл. П1 и в справочниках на резисторы.

Если границы рабочей области оказались волизи или пересекают границу области безотказной работы, как это показано на рис. 3.2, необходимо сместить номинальную рабочую точку в центр области безотказной работы. Если до этого были проведены граничные испытания по другим резисторам исследуемого РЭУ, необходимо убедиться, что их ОБР не приблизились существенно к границам рабочей области из-за изменения номинальной рабочей точки по данному резистору. Отключив питание, выпаять переменный резистор и на его место поставить исходный резистор, убедиться в работоспособности РЭУ.



Р и с. 3.2. Смещение РО относительно ОБР

Т а б л и ц а 3.1

Номер точки на графике	$\frac{\Delta R}{R_{\text{ном}}}$	Параметры и форма выходного импульса	Вид отказа
1	0		Уменьшение амплитуды импульса
2			Уменьшение плоской вершины импульса

К о н т р о л ь н ы е   в о п р о с ы  
д л я   п р о в е р к и   г о т о в н о с т и  
к   з а щ и т е   р а б о т ы   п о   в т о р о м у  
з а н я т и ю

1. Какие исходные данные требуются для проведения анализа надежности РЭУ по постепенным отказам методами математического моделирования? – Методами физического моделирования?

2. Достоинства и недостатки методов исследования надежности по постепенным отказам на основе математической и физической модели РЭУ?

3. На основании каких результатов может быть сделан вывод о сериопригодности РЭУ?

4. Какие методы могут быть использованы для повышения надежности РЭУ по внезапным и постепенным отказам?

5. Влияет ли установленный критерий отказа РЭУ на ширину области безотказной работы, рабочей области, расчетной области?

6. Какие отказы радиоэлементов преобладают в период нормальной эксплуатации? В период старения?

7. Какие факторы определяют долговечность РЭУ?

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С о т с к о в Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., "Высшая школа", 1970, (с. 198-203).
2. Конспект лекций по курсу "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА".
3. А н д р е е в а В.В., П у р с у к о в М.С., У х о в а И.С. Лабораторная работа № I "Исследование надежности радиоэлектронного узла по внезапным отказам". Куйбышев, КуАИ, 1978.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Т а б л и ц а П I

Средние значения отклонений параметров резисторов  
и конденсаторов в процессе эксплуатации  
(к концу срока службы)

Тип радиоэлемента	Резисторы		Конденсаторы	
			электролитические	остальные
Производственный допуск, %	$\pm 5$	$\pm 10$	+ 50 - 20	$\pm 5$
Отклонения параметров при действии повышенной температуры, %	$\pm 3,5$	$\pm 3,5$	$\pm 30$	$\pm 4$
Отклонения параметров при действии пониженной температуры, %	$\pm 9,6$	$\pm 9,6$	-	-
Отклонения параметров при действии влажности, %	- 3 + 6	- 3 + 6	-	-
Суммарное отклонение параметров, %	+ 15 - 12	+ 17 - 14	+60 -40	+ 6 - 9

П р и м е ч а н и е : данные, приведенные в таблице, — ориентировочные, их рекомендуется использовать лишь в учебных целях.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

1. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ.....	3
1.1. Постановка задачи анализа надежности по постепенным отказам.....	3
1.2. Метод граничных испытаний.....	5
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
2.1. Описание макета и блок-схема измерений.	9
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
3.1. Первое занятие.....	11
3.2. Второе занятие.....	15
Л И Т Е Р А Т У Р А .....	16
П Р И Л О Ж Е Н И Е .....	17

Составители: Валентина Владимировна Андреева,  
Михаил Семенович Цурзуков,  
Ирина Андреевна Ухова

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА  
ПО ПОСТЕПЕННЫМ ОТКАЗАМ

Лабораторная работа № 2

по курсу "Теоретические основы конструирования,  
технологии и надежности радиоэлектронной аппаратуры"

Редактор Н.В. К а с а т к и н а  
Техн. редактор Н.А. К а л е н ю к  
Корректор Л.М. С о к о л о в а

Подписано в печать 13.06.78 г. . Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага оберточная белая. Односторонняя печать. Усл. печ. л. 1,16.  
Уч.-изд. л. 1,0 . Тираж 500 экз. Заказ № 5018 Бесплатно.

Куйбышевский авиационный институт им. С.П.Королева.  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография им. В.И.Мяги, г. Куйбышев,  
ул. Венцека, 60.