

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методическое пособие

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
для обучающихся очной и заочной
форм обучения направления 11.03.01 - Радиотехника
и специальности
11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.38(076)
ББК 32.85я73
К650

Р е ц е н з е н т:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»,

Составитель: В. Г. Слёзкин

К650 Конструирование и технология производства радиоэлектронных средств : учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине для обучающихся очной и заочной форм обучения направления 11.03.01 - Радиотехника и специальности 11.05.01 - Радиоэлектронные системы и комплексы / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и информационной безопасности, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; сост. В. Г. Слёзкин. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2021. – 72 с. – Текст : электронный.

Подготовлено с целью оказания помощи обучающимся в самостоятельной подготовке к выполнению и защите лабораторных работ.

Содержит требования к оформлению отчетов, расчётные задания, задания к экспериментальным исследованиям и контрольные вопросы для самопроверки.

УДК 621.38(076)
ББК 32.85я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ИРИБ СевГУ, протокол № 6 от 24 февраля 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1. Исследование и обеспечение локального теплого режима радиоэлектронных устройств	6
1.1. Теоретические сведения	6
1.2. Описание лабораторной установки.....	8
1.3. Задание на лабораторную работу	9
1.4. Контрольные вопросы и задачи.....	11
Приложение А.1. Описание программы для расчёта теплоотвода в виде плоской пластины	13
Приложение Б.1. Данные исследуемых радиаторов.....	14
2. Лабораторная работа № 2. Анализ технологических процессов и технологического разброса параметров электрорадиоизделий	15
2.1. Физические причины технологических отклонений параметров ЭРИ и их теоретическое описание	15
2.2. Описание лабораторной установки и программного обеспечения.....	22
2.3. Задание на лабораторную работу	24
2.4. Контрольные вопросы и задачи.....	24
Приложение А.2. Таблица распределения величины «хи-квадрат»	26
3. Лабораторная работа № 3. Исследование и обеспечение точности выходного параметра радиоэлектронного функционального узла.....	27
3.1. Задачи обеспечения технологической точности изделий.....	27
3.2. Описание объекта исследования и лабораторной установки.....	33
3.3. Задание на лабораторную работу	36
3.4. Контрольные вопросы и задачи.....	38
Приложение А.3. Стандартные ряды номиналов.....	40
Приложение Б.3. Некоторые статистические таблицы	41
4. Лабораторная работа № 4. Исследование паразитных связей на печатных платах и методов борьбы с ними.....	42
4.1. Теоретические сведения	42
4.2. Описание лабораторной установки и методики исследований.....	49
4.3. Задание на лабораторную работу	54
4.4. Контрольные вопросы и задачи.....	57
Приложение А.4. Данные об объектах исследования	59
5. Лабораторная работа № 5. Обеспечение защиты радиоэлектронного блока от вибрационных ускорений	61
5.1. Теоретические сведения	61
5.2. Описание лабораторной установки.....	67
5.3. Задание на лабораторную работу	68
5.4. Контрольные вопросы и задачи.....	70
Приложение А.5. Справочные данные амортизаторов	71
Библиографический список.....	72

ВВЕДЕНИЕ

Отчёт по лабораторной работе выполняется один на бригаду. Он должен содержать титульный лист с указанием названия работы, группы и фамилий исполнителей и следующие разделы:

- постановка задач исследования;
- предварительные расчёты;
- результаты эксперимента;
- выводы.

В разделе «Постановка задач исследования» формулировку цели работы можно не приводить. Необходимо кратко сформулировать конкретные расчётные и экспериментальные задачи, которые решаются в процессе работы. Например, в работе «Исследование и обеспечение локального теплового режима радиоэлектронных устройств» задачами являются теоретическое и экспериментальное исследование трёх зависимостей, поэтому необходимо перечислить, какие именно зависимости являются предметом исследований.

В разделе «Предварительные расчёты» приводятся исходные данные, исходные расчётные формулы, а также самостоятельно выведенные формулы с необходимыми промежуточными выкладками. Результаты расчётов, относящиеся к исследуемым зависимостям, как правило, оформляют в виде таблиц и графиков. Если на основе результатов численных расчётов делается выбор, то необходимо привести логическое обоснование выбора, например: «Так как величина a меньше допустимого значения, выбор ... считаем удовлетворительным».

В разделе «Результаты эксперимента» следует описать условия каждого эксперимента, включая значения выставляемых параметров, привести результаты прямых измерений, формулы для обработки экспериментальных данных и результаты обработки. Для исследуемых зависимостей приводят эти данные в виде таблиц и графиков, а если для расчётных зависимостей были приведены графики, то экспериментальные данные следует отображать на этих же графиках.

Раздел «Выводы» должен содержать число пунктов, равное числу поставленных перед исследованием задач. Необходимо дать логическую оценку результатов каждой решенной задачи. Следует оценить количественное и качественное согласие расчётных и экспериментальных данных, дать заключение о применимости той или иной расчётной методики для практических целей. Если статистическая обработка результатов не проводилась и точность измерений оценить затруднительно, то обычно для сложного физического эксперимента считают приемлемым расхождение между расчётными и экспериментальными данными в пределах 20—30 %. В этом случае в выводах отмечают согласие расчёта и эксперимента, например: «Так как для зависимости ... относительное расхождение между расчётными и экспериментальными данными не превышает 18 %, можем считать, что расчёт и эксперимент согласуются удовлетворительно».

Ни при каких условиях **нельзя** применять термин «**совпадение**» или «**совпадают**», так как из-за погрешностей измерений и теоретических ограничений совпадение экспериментальных данных с расчётными, строго говоря, невозможно.

Если данные расчёта и измерений расходятся значительно, то необходимо не только это отметить в выводах, но и высказать предположения о возможных причинах. Для тех причин, действие которых можно проверить и устранить путем дополнительных измерений или проверки лабораторной установки, нужно провести дополнительные исследования в лаборатории.

Отчет оформляется на листах белой бумаги стандартного формата А4 (210 x 297 мм) с одной стороны листа согласно требованиям, принятым на кафедре к текстовым работам [1]. Ниже приведены только основные моменты, в которых часто допускаются ошибки.

Ссылка в тексте на рисунок, например, «... изображена на рис. 1» **обязательна**. Рисунок располагают посередине листа сразу после абзаца, в котором содержится первая ссылка на этот рисунок. При ссылке на рисунок, приведенный ранее, следует добавлять «см.», например: «см. рис. 1».

Ссылка в тексте на таблицу, например, «...приведена в таблице 1» **обязательна**. Таблицу приводят сразу после абзаца со ссылкой на нее. Если данные образуют только **одну строку**, то в таблицу их сводить **нельзя**.

Формулы отделяют от текста пустыми строками сверху и снизу и располагают посередине строки. Каждой формуле должно предшествовать пояснение выполняемого вычисления.

Необходимо один раз привести пояснения ко всем величинам, входящим в формулы. Обычно результирующую величину вводят в тексте перед формулой, а пояснения к остальным приводят под формулой, начиная со слова «где...» без двоеточия.

Расчёты по формуле приводят после определения числовых значений составляющих величин. Если эти значения уже известны, то можно приводить вычисления сразу после знака равенства. При оформлении расчётов необходимо подставить значения всех входящих в формулу величин, затем после знака равенства привести результат. Если результирующая величина имеет размерность, то размерность необходимо привести после пробела, без скобок.

Пример оформления формул и расчётов по ним приведён ниже.

«Напряжение U рассчитаем по формуле

$$U = I \cdot R ,$$

где I — ток в цепи;

R — сопротивление.

Подставляя известные значения, получаем

$$U = 1 \cdot 1 = 1 \text{ В.}»$$

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: ознакомиться с методикой анализа и обеспечения локального теплового режима радиоэлектронных устройств (РЭУ), исследовать эффективность пластинчатых радиаторов при естественном воздушном охлаждении.

1.1. Теоретические сведения

Некоторые элементы РЭУ часть потребляемой электрической энергии превращают в тепловую энергию, из-за чего температура этих элементов повышается. При конструировании РЭУ необходимо принять меры, чтобы температура любого элемента $t_{эл}$ была ниже допустимой по техническим условиям $t_{эл, доп}$. В зависимости от типа и конструкции элемента эта температура может быть задана как температура окружающего воздуха либо температура определённой точки: корпуса, $p-n$ перехода и т.п. Само значение $t_{эл, доп}$ устанавливается изготовителем данного элемента, но дополнительные ограничения может установить и конструктором РЭУ.

Наиболее жесткие ограничения накладываются при **стационарном тепловом режиме**, когда тепловой поток Q между элементом и окружающей средой сравнивается с мощностью, рассеиваемой на этом элементе P

$$Q = P. \quad (1.1)$$

При этом температура элемента $t_{эл}$ становится постоянной.

Тепловой поток Q передается окружающей среде путём **теплопередачи**. Известны три способа теплопередачи: конвекция, теплопроводность и излучение. Обобщенное уравнение теплопередачи, учитывающее все механизмы, имеет следующий вид

$$Q = \alpha S(t_{эл} - t_c), \quad (1.2)$$

где t_c — температура окружающей среды, К;

$t_{эл}$ — температура радиоэлемента, К;

α — эквивалентный коэффициент теплопередачи, учитывающий все механизмы теплопередачи, Вт/м²·К;

S — площадь поверхности, с которой тепловая энергия рассеивается в окружающую среду, м².

Задача конструктора состоит в выборе пространственной компоновки изделия, конструкции и размеров теплоотводов, которые обеспечивали бы передачу рассеиваемой электрической мощности в виде теплового потока в окружающую среду при допустимых значениях температур элементов.

Данная задача решается в несколько этапов, параллельно с уточнением конструкции РЭУ.

Для обеспечения **локального** теплового режима наиболее теплонагруженных элементов применяют **радиаторы**.

Из (1.2) следует, что с ростом площади поверхности теплоотвода тепловой поток Q возрастает. Однако соотношение между различными механизмами теплопередачи, а следовательно, эквивалентный коэффициент теплопередачи α , сложным образом зависят от температур t_c , $t_{эл}$ и от конструкции радиатора. В связи с этим перед выполнением каких-либо расчётов задаются конкретным видом конструкции радиатора, имея в виду, что после анализа результатов первых оценок возможны изменения в конструкции.

Для расчёта радиатора необходимо задать:

- мощность P , рассеиваемую элементом;
- тип и конструкцию выбранного радиатора, в которой выделены подбираемые и неизменные размеры;
- максимально возможную температуру окружающей среды и условия теплообмена с окружающей средой (естественная или принудительная конвекция);
- допустимую температуру элемента $t_{эл, доп}$.

Радиатор принято характеризовать **тепловым сопротивлением** R_p , определяемым соотношением [2, 3]

$$R_p = \frac{\Delta t_p}{Q}, \quad (1.3)$$

где $\Delta t_p = t_p - t_c$ — перегрев радиатора, то есть превышение температуры радиатора t_p над температурой окружающей среды t_c .

Величина R_p численно показывает, на сколько градусов изменяется температура радиатора при изменении рассеиваемой мощности на 1 Вт.

Таким образом, чем меньше величина теплового сопротивления, тем большую мощность может отвести данный радиатор при заданной температуре, а значит, с уменьшением теплового сопротивления эффективность радиатора растёт.

Подставив в (1.3) выражение для теплового потока (1.2), получим расчётную формулу

$$R_p = \frac{\Delta t_p}{\alpha S \Delta t_p} = \frac{1}{\alpha S}. \quad (1.4)$$

Для оценки эффективности радиатора используют также **тепловую проводимость** Y_p — величину, обратную тепловому сопротивлению

$$Y_p = \frac{1}{R_p} = \alpha S. \quad (1.5)$$

Расчёт радиатора выполняют в следующем порядке:

- согласно (1.1) задаются тепловым потоком Q для стационарного режима, равным рассеиваемой мощности P ;

- по допустимой температуре элемента $t_{\text{эл. доп}}$ выбирают расчётную температуру радиатора $t_{\text{р. доп}}$ с некоторым запасом в меньшую сторону;
- рассчитывают допустимый перегрев радиатора для наиболее неблагоприятных условий (максимальной температуры окружающей среды)

$$\Delta t_{\text{р доп}} = t_{\text{эл. доп}} - t_{\text{с}};$$

- согласно (1.3, 1.5) оценивают необходимые значения теплового сопротивления $R_{\text{р}}$ либо тепловой проводимости $Y_{\text{р}}$;
- расчётным путём, по справочным данным или таблицам [2, 3] подбирают размеры радиатора.

Сложность расчётов обусловлена существенной зависимостью коэффициента теплопередачи от температуры и от характера поверхности радиатора, а также тем, что площадь теплоотвода S лишь в первом приближении равна площади поверхности радиатора: если температура по радиатору распределена неравномерно, то под S следует понимать **эффективное** значение площади, которое меньше реальной площади радиатора.

Предметами исследования в данной работе являются:

- расчётная методика, основанная на численном решении уравнения теплопередачи (1.2) для пластинчатого теплоотвода (приложение А);
- экспериментальные зависимости $R_{\text{р}}$ и $Y_{\text{р}}$ от рассеиваемой на элементе мощности P и от площади теплоотвода S .

1.2. Описание лабораторной установки

Установка содержит источник питания, измерительный блок и исследуемый блок, на котором закреплены 6 радиаторов (приложение Б) различных размеров с имитаторами тепловой нагрузки. К радиаторам придаются съёмные шторки. При надетой шторке перекрывается поток воздуха между корпусом блока и радиатором, поэтому имитируется односторонний теплоотвод, при снятой — двусторонний.

В измерительном блоке осуществляется коммутация исследуемых радиаторов, изменение рассеиваемой мощности и измерение температуры.

Для установки требуемой мощности P необходимо:

- подключить штекером провод питания измерительного блока к одному из гнезд источника питания: 5 В для мощностей до 5 Вт и 10 В — для больших мощностей;
- ручками «Грубо» и «Точно» на коммутационном блоке установить требуемое значение мощности, которое контролируется микроамперметром по потребляемому току (отсчёт «10» соответствует току 1 А, так что при напряжении питания 5 В одно малое деление соответствует мощности 1 Вт, а при напряжении 10 В отсчёт «10» соответствует мощности 10 Вт).

В установке предусмотрен контроль температуры с помощью термопар, встроенных в радиатор, причем термопара № 1 установлена в центре тепловы-

деления каждого радиатора (приложение Б). Коммутация термодпар осуществляется переключателем «Термодпары».

Температура нагрева индицируется стрелочным прибором, имеющим градуировку с ценой деления $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отсчёт следует производить при таком положении глаза, чтобы стрелка прибора была видна как тонкая нить. Если прибор включить в сеть, то обеспечиваются абсолютные измерения температуры среды и температуры нагрева. Если прибор в сеть не включать, то индицируется только температура перегрева радиатора над температурой среды.

**Для предупреждения выхода из строя транзисторов следует использовать режим абсолютных измерений.
Температура не должна превышать $110\text{ }^{\circ}\text{C}$!**

Примечание. Для полного установления температуры радиатора требуется некоторое время. Процесс установления температуры рекомендуется ускорять методом «перегрева»:

- сопоставляем начальное или следующее расчётное значение мощности с расчётным значением температуры;
- устанавливаем мощность, на $10\text{—}15\text{ Вт}$ большую расчётной;
- когда температура приблизится к расчётному значению, устанавливаем расчётное значение мощности;
- выжидаем не менее 2 минут и фиксируем установившееся значение температуры.

1.3. Задание на лабораторную работу

1.3.1. Задание к предварительным расчётам

1. Выполнить на компьютере с помощью программы «Радиатор-Ц» (приложение А) **два расчёта** зависимости температуры t_p , перегрева Δt_p и теплового сопротивления R_p для центра радиатора, номер которого соответствует номеру бригады, от рассеиваемой мощности: сначала для **двустороннего** теплоотвода, затем — для **одностороннего**.

Поверхность теплоотводов считать грубо обработанной, температуру окружающей среды задать равной $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчёт выполнять для мощностей от 1 Вт с шагом $1\text{—}2\text{ Вт}$ до значений, при которых абсолютная температура приблизится к $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Шаг следует выбирать с таким расчётом, чтобы получить примерно 10 точек исследуемой зависимости. Например, если при мощности 1 Вт температура увеличилась на 10 градусов, то на 90 градусов она возрастет при мощности около 10 Вт : можно выбрать шаг по мощности 1 Вт .

Значения мощности и результаты расчёта занести в две таблицы по типу таблицы 1.1, а также представить зависимости теплового сопротивления от мощности в виде **двух графиков на одной сетке**: для двустороннего и одностороннего теплоотводов.

Таблица 1.1 — Результаты расчёта зависимости теплового сопротивления R_p от мощности P для двустороннего теплоотвода

P , Вт	t_p , °C	Δt_p , °C	R_p , К/Вт
1	32	12	12
2	...	...	...

2. Для температуры около 90 °C выписать из таблицы результатов расчёта три значения температуры (одно — в центре и два — в сторону края по длине). Расчётные распределения температур занести в таблицу по типу таблицы 1.2 и представить в виде **двух графиков на одной сетке**: для двустороннего и одностороннего теплоотводов.

Таблица 1.2 — Результаты расчёта распределений температур для двустороннего $t_{p2}(x)$ и одностороннего $t_{p1}(x)$ теплоотводов

Координата x	0	...	...
$t_{p2}(x)$, °C	90	89	...
$t_{p1}(x)$, °C	...	...	...

Примечание. Так как положения термодпар в эксперименте могут не совпадать с узлами расчёта, распределения температур следует представлять в виде зависимостей от значений безразмерной координаты x , для которой $x=0$ соответствует центру пластины, а $x=1$ — её краю. В программе «Радиатор-Ц» точки контроля температуры находятся **в центрах** прямоугольников и задаются дискретной координатой $X=1,2 \dots 5$ (см. приложение А, рис. А.1). Центр пластины (точка $x=0$) соответствует значению $X=3$, остальные координаты узлов расчёта необходимо соответственно пересчитать.

3. При расчёте зафиксировать одно значение мощности, при котором температура двустороннего теплоотвода будет около 50 °C. Для этого единственного значения мощности рассчитать зависимость температуры t_p , перегрева Δt_p и тепловой проводимости Y_p от площади двустороннего радиатора, используя значения площадей всех имеющихся радиаторов (приложение Б). Результаты расчёта представить в виде таблицы по типу таблицы 1.3 и графически в виде зависимости тепловой проводимости от площади.

Таблица 1.3 — Результаты расчёта зависимостей температуры t_p , перегрева Δt_p и тепловой проводимости Y_p от площади S для двустороннего теплоотвода

S , мм ²	t_p , °C	Δt_p , °C	Y_p , Вт/К
3276	50	30	...
...	...	...	...

1.3.2. Задание к экспериментальным исследованиям

1. Для 5—7 значений мощности измерить t_p температуру в центре заданного радиатора, сначала для открытого радиатора, затем — для радиатора с надетой шторкой. Результаты измерений и их обработки занести в две таблицы, аналогичные по форме таблицам для результатов расчёта (см. табл. 1.1). Экспе-

риментальные значения теплового сопротивления нанести **на расчётные графики** в виде точек и соединить их линейно-ломаными линиями.

2. Для условий, соответствующих условиям расчёта, измерить температуры в трёх точках двустороннего и одностороннего радиаторов, переключая термопары. Результаты измерений занести в таблицу и нанести на расчётные графики, соединив экспериментальные точки линейно-ломаной линией.

Примечание. Координаты x_n термопар ($n=1, 2, 3$) для введённой при расчёте безразмерной переменной x можно вычислить по формуле

$$x_n = \frac{2 X_n}{L_1},$$

где X_n — физические координаты термопар (см. приложение Б.1, табл. Б.1);

L_1 — длина пластины (см. приложение Б.1, рис. Б.1).

3. По экспериментальным данным определить мощность, соответствующую значению температуры двустороннего радиатора около 50 °С. Устанавливая это значение, измерить значения температур t_p , достигаемых в центре каждого радиатора. Результаты эксперимента и их обработки занести в таблицу, аналогичную по форме таблице для результатов расчёта (см. табл. 1.3). Экспериментальные значения тепловой проводимости нанести на расчётный график в виде точек и соединить их линейно-ломаной линией.

1.4. Контрольные вопросы и задачи

- 1) Допустимые температуры для элементов задают как снизу, так и сверху. Почему основная задача обеспечения теплового режима относится к верхнему пределу? Какими средствами можно обеспечить тепловой режим по нижнему пределу?
- 2) Какие исходные данные требуется вводить при расчётах по программе «Радиатор-Ц»?
- 3) Каким значениям обобщенной переменной x ($x=0$ — центр пластины, $x=1$ — её край по длине) соответствуют положения узлов расчёта по программе «Радиатор-Ц»?
- 4) Как экспериментально смоделировать односторонний и двусторонний теплоотводы?
- 5) Какие действия необходимо выполнить для ускорения процесса измерения температуры методом «перегрева»?
- 6) Изобразить качественно две зависимости теплового сопротивления радиатора R_p от рассеиваемой мощности P :
 - упрощенную, непосредственно следующую из уравнения (1.2) при постоянных значениях коэффициентов;
 - учитывающую физические особенности механизма естественной конвекции.
- 7) Изобразить качественно две зависимости тепловой проводимости Y_p от площади радиатора S :

- упрощенную, непосредственно следующую из соотношений (1.2, 1.4) при постоянных значениях коэффициентов;
- учитывающую физические особенности конвекции для радиатора больших размеров.

8) Изобразить качественно два графика зависимостей: теплового сопротивления от мощности $R_p(P)$ для некоторого значения площади S^* и тепловой проводимости от площади $Y_p(S)$ для некоторого значения мощности P^* . Показать, как с помощью этих графиков можно определить размеры пластинчатого радиатора для заданных значений мощности P и допустимой температуры, если заданная мощность не равна P^* .

Приложение А.1. Описание программы для расчёта теплоотвода в виде плоской пластины

Программа для расчёта плоского теплоотвода составлена в двух вариантах: для одного источника тепла в центре пластины (имя программы «Радиатор-Ц.exe») и для нескольких источников тепла («Радиатор.exe»).

Основой алгоритма является численное решение термостатического уравнения Лапласа для тонкой пластины (толщина много меньше длины и ширины). Ввод исходных данных выполняется по запросам программы.

Исходными данными для программы «Радиатор-Ц» являются:

- материал теплоотвода (в память заложены параметры меди, алюминия, латуни, мягкой стали);
- температура окружающей среды в градусах Цельсия;
- коэффициент чистоты поверхности $K_{\text{ч}}$ (односторонний теплоотвод при грубой обработке имеет $K_{\text{ч}} = 2$, теплоотвод с чернением и средней шероховатостью — $K_{\text{ч}} = 1$, с гладкой поверхностью — $K_{\text{ч}} = 0,5$; для двусторонних теплоотводов значение $K_{\text{ч}}$ удваивается);
- мощность, рассеиваемая источником тепла, в ваттах;
- размеры пластины в миллиметрах (длина, ширина, толщина).

Результаты расчёта выводятся в виде двух таблиц:

- расположение источников тепла на пластине с указанием мощности в ваттах;
- распределение температур по пластине в расчётных точках (рис. А.1).

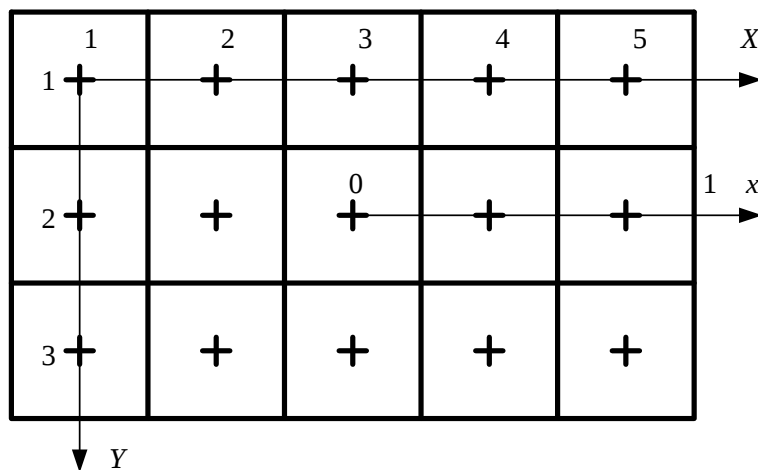


Рис. А.1 — Расположение расчётных точек на пластине в программе «Радиатор-Ц» и ось безразмерной переменной x

Дополнительно выводятся для центра пластины:

- температура;
- перегрев (разность температур радиатора и окружающей среды);
- тепловое сопротивление;
- тепловая проводимость.

Приложение Б.1. Данные исследуемых радиаторов

Радиаторы из алюминиевого сплава в виде плоских пластин различных размеров (табл. Б.1) имеют грубо обработанные поверхности и расположены на пластмассовых стойках так, чтобы воздух мог свободно обтекать обе стороны пластин.

Таблица Б.1 — Параметры пластинчатых радиаторов

Номер радиатора	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	S , мм ²	Положение термопар		
					X_1 , мм	X_2 , мм	X_3 , мм
1	63	52	4	3276	0	17,5	27,5
2	63	62	4	3906	0	17,5	27,5
3	72	63	4	4536	0	17,5	31,5
4	80	62	4	4960	0	17,5	33,5
5	92	63	4	5796	0	17,5	42,5
6	100	92	4	9200	0	17,5	42,5

На каждой пластине в глухие отверстия впрессованы по три термопары типа «хромель-копель» вдоль длинной стороны (рис. Б.1).

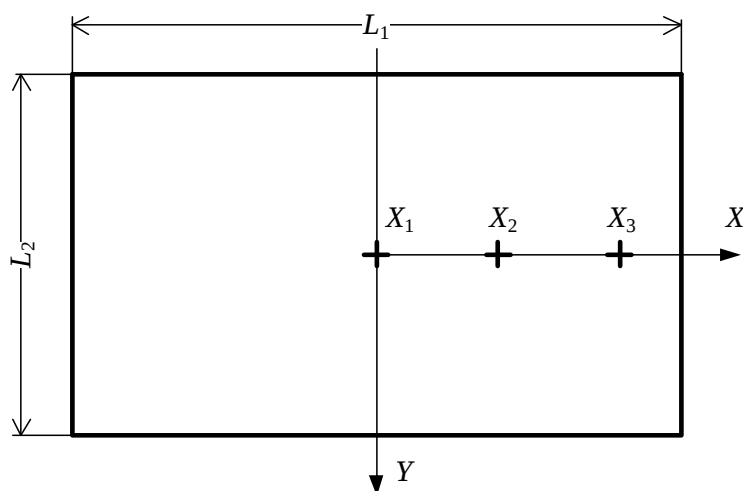


Рис. Б.1 — Схема установки термопар на радиаторах

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Цель работы: освоить методику анализа отклонений параметров электро-радиоизделий (ЭРИ), возникающих при их изготовлении, а также методику анализа точности и устойчивости технологических процессов.

2.1. Физические причины технологических отклонений параметров ЭРИ и их теоретическое описание

2.1.1. Особенности технологических процессов изготовления ЭРИ

Основными видами ЭРИ, входящими в состав радиоэлектронных устройств, являются:

- резисторы;
- конденсаторы;
- катушки индуктивности и трансформаторы;
- дискретные полупроводниковые элементы;
- интегральные микросхемы.

Для изготовления ЭРИ используют определенные химические и физические процессы, однако существует множество причин, по которым абсолютно точное воспроизведение условий изготовления в любой момент времени невозможно. Например, результат химического процесса может зависеть от содержания в рабочих веществах незначительных примесей, от влияния состава окружающей среды, от точности поддержания условий процесса. Параметры физического процесса могут отклоняться от требуемых из-за посторонних механических воздействий, из-за ограниченной точности контрольных приборов, из-за влияния трудноконтролируемых физических факторов (например, скорости изменения температуры или давления). Отклонения в результатах механической обработки обусловлены естественным износом инструмента, естественной разладкой оборудования, возникновением скрытых неисправностей в оборудовании и контрольно-измерительных приборах, а также субъективными причинами (ошибками работников).

Таким образом, все факторы, влияющие на результат технологического процесса, можно условно разделить на две группы:

- длительно действующие естественные причины;
- кратковременные, непредсказуемые нарушения условий.

2.1.2. Проектирование и анализ технологических процессов

Исходными показателями для разработки технологического процесса изготовления ЭРИ являются:

- номинальное значение параметра ЭРИ x_0 ;
- границы поля допуска $[x_{min}, x_{max}]$ на значение параметра.

Для простоты будем полагать, что поле допуска симметрично и можно ввести допустимое отклонение $\Delta x_{\text{доп}}$:

$$x_{\min} = x_0 - \Delta x_{\text{доп}}; \quad x_{\max} = x_0 + \Delta x_{\text{доп}}.$$

Партией изделий называют совокупность изделий, изготовленных при неизменных условиях техпроцесса.

Объём партии N могут ограничивать количество основного материала, время работы оборудования при постоянных параметрах процесса и другие факторы. Например, при изготовлении транзисторов к одной партии относят изделия, выполненные из одного слитка полупроводникового материала, так как содержание примесей в другом слитке может быть иным.

Обычно для ЭРИ массового производства объёмы партий велики (сотни и тысячи изделий), поэтому при разработке и контроле техпроцесса применяют **статистический** подход: контролируемый параметр изделий считают случайной величиной, статистические характеристики которой определяют путём обработки эмпирических данных.

На выходе техпроцесса измеряют значения параметра всех изделий из выбранной партии x_i ($i=1, 2, \dots, N$) и находят важнейшие статистические характеристики партии изделий [5]:

— **эмпирическое среднее** значение $\bar{x}$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad (2.1)$$

— **эмпирическую дисперсию** σ_x^2

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.2)$$

Величину корня квадратного из дисперсии σ_x называют **среднеквадратическим отклонением** (СКО).

Техпроцесс стараются настроить так, чтобы среднее значение параметра $\bar{x}$ было как можно ближе к номинальному значению x_0 , а большие, по сравнению с СКО, отклонения параметра от номинала были бы маловероятны.

Поскольку отклонения в техпроцессе вызваны множеством причин, характер их плотности вероятностей $p(x)$ чаще всего оказывается близким к нормальному закону

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right). \quad (2.3)$$

Вероятность попадания случайной величины $P(a < x < b)$ в некоторый интервал $[a, b]$ равна значению интеграла от плотности вероятностей $p(x)$

$$P(a < x < b) = \int_a^b p(x)dx = F\left(\frac{b - \bar{x}}{\sigma_x}\right) - F\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma_x}\right) \quad (2.4)$$

где $F(t)$ — табулированная функция «интеграл вероятностей».

Если в качестве расчётного интервала случайной величины x выбрать её поле допуска, то **процент брака по точности** $E(x)$ можно найти с помощью (2.4) как **вероятность непопадания** параметра x в поле допуска

$$E(x) = 1 - P(x_0 - \Delta x_{\text{доп}} < x < x_0 + \Delta x_{\text{доп}}) \cdot 100 \%. \quad (2.5)$$

Изготовитель ЭРИ закладывает в технологический процесс определённый процент брака по точности, однако на этапе выходного контроля негодные изделия могут отбраковываться, поэтому, в зависимости от особенностей техпроцесса, возможны различные случаи.

Случай 1. Процесс удастся настроить так, что среднее значение практически равно требуемому номиналу, а процент брака не превышает установленного ограничения. Отбраковка не производится, для описания технологического разброса можно использовать нормальный закон распределения.

Случай 2. Процесс принципиально даёт большой разброс значений параметра, а приемлемый процент брака достигается только отбраковкой большего числа изделий. В результате закон распределения параметра годных изделий приближается к равномерному в пределах от минимального значения $x_{\min}$ до максимального $x_{\max}$

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta x_{\text{доп}}}, & x \in [x_{\min}, x_{\max}], \\ 0, & x \notin [x_{\min}, x_{\max}]. \end{cases} \quad (2.6)$$

Случай 3. Процент брака превышает допустимую величину, но после изготовления все негодные изделия отбраковываются. Разброс значений параметра описывается усечённым нормальным законом, значения которого за пределами поля допуска равны нулю.

2.1.3. Поддержание точности и устойчивости технологического процесса

При выпуске изделий техпроцесс периодически контролируют с целью анализа его точности и устойчивости для выбора способов поддержания требуемой точности. Периодичность контроля устанавливают из следующих соображений:

- для получения достоверных статистических данных нужно накопить достаточно большое количество изделий (большой объём выборки n);
- чтобы выявить изменения в точности техпроцесса, время накопления выборки не должно быть слишком большим.

Проводится углублённая статистическая обработка результатов измерений параметра x : кроме расчёта среднего значения и СКО выполняются расчёт и

графическое построение **гистограммы** отклонений, а также подбор **эмпирического закона** распределения.

Гистограммой называют ступенчатую диаграмму, отображающую количество попаданий случайной величины в каждый разряд (интервал значений). Эмпирический закон распределения — это математическое выражение плотности вероятностей и соответствующая кривая на графике, который считается близким к экспериментальным данным.

Через установленный интервал времени перечисленные действия повторяют. Путём сравнения результатов для разделенных по времени выборок оценивают точность и устойчивость техпроцесса.

Для примера рассмотрим возможные различия между эмпирическими плотностями вероятностей $p_1(x)$ и $p_2(x)$, полученными, соответственно, в моменты времени t_1 и t_2 (рис.2.1).

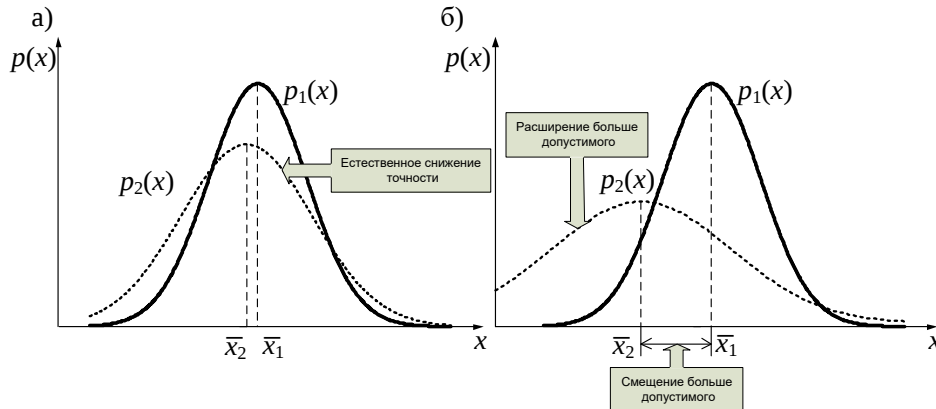


Рис. 2.1 — Формы плотности вероятностей выходного параметра для устойчивого (а) и неустойчивого (б) технологических процессов

Если форма графика плотности вероятностей сохраняется, а различия в значениях среднего и СКО незначительны (см. рис. 2.1 а), то процесс считают устойчивым, а снижение точности относят на счёт естественных причин (например, износ режущего инструмента). При такой картине для поддержания необходимой точности достаточно периодически выполнять подналадку оборудования.

Если же выяснилось, что форма распределения или её параметры резко изменились (см. рис. 2.1 б), то процесс считают неустойчивым. Нарушение устойчивости может быть вызвано особыми причинами, например, неисправностью прибора, контролирующего выходной параметр. В этом случае меры по восстановлению устойчивости следует предпринимать немедленно.

Так как визуальная оценка форм распределений (см. рис. 2.1) субъективна, для количественных оценок различий в исходном и контролируемом техпроцессах вводят следующие коэффициенты:

— коэффициент относительного ухода среднего значения δ_{cp}

$$\delta_{cp} = \left| \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{x1}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (2.7)$$

— коэффициент относительного ухода СКО $\delta_{\text{СКО}}$

$$\delta_{\text{СКО}} = \left| \frac{\sigma_{x1} - \sigma_{x2}}{\sigma_{x1}} \right| \cdot 100 \%, \quad (2.8)$$

где $\bar{x}_1, \sigma_{x1}$ — среднее значение и СКО для исходного техпроцесса;

$\bar{x}_2, \sigma_{x2}$ — среднее значение и СКО для контролируемого техпроцесса.

Решение о точности и устойчивости техпроцесса принимают путем сравнения полученных значений $\delta_{\text{ср}}, \delta_{\text{СКО}}$ с установленными для них ограничениями $\delta_{\text{срдоп}}$ и $\delta_{\text{СКОдоп}}$: для устойчивого техпроцесса полученные значения не должны превышать допустимых значений.

2.1.4. Методика анализа технологической точности

Анализ проводится по результатам измерений выходного параметра изделия x в выборке объёма n . Установление объёма выборки является важной и ответственной задачей.

С одной стороны, объём выборки не должен быть малым, так как при малом числе данных точность оценки статистических параметров получается недопустимо низкой. С другой стороны, время накопления изделий должно укладываться в интервал, на котором параметры техпроцесса можно считать постоянными: чаще всего это рабочая смена или её часть.

Рассмотрим методику анализа на конкретном числовом примере.

Пусть исследуются относительные отклонения номиналов некоторых элементов от установленного значения, объём выборки $n = 100$ штук.

1) Измеренные значения записываем в порядке их получения

$$-2,5 \%; \quad +5,3 \%; \quad \dots \quad +1,4 \%.$$

2) Переписываем данные в порядке возрастания (вариационный ряд)

$$-19 \%; \quad -18,6 \%; \quad \dots \quad 25,8 \%; \quad 26 \%.$$

3) Из данных выделяем минимальное и максимальное значения

$$x_{\min} = -19 \%; \quad x_{\max} = 26 \%.$$

4) Вычисляем предварительные значения среднего $\bar{x}$, дисперсии σ_x^2 и СКО σ_x

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4,17 \%;$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 72,6;$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{72,6} = 8,52 \%.$$

5) Проверяем данные на наличие грубых ошибок по критерию «трех сигм». Для этого находим величину $3\sigma_x$

$$3\sigma_x = 3 \cdot 8,52 = 25,56 \%.$$

Проверяем отклонения максимального и минимального значений от среднего:

$$|x_{\max} - \bar{x}| = |26 - 4,17| = 21,83 \% < 25,56 \% \text{ — отбрасывать не требуется;}$$

$$|x_{\min} - \bar{x}| = |-19 - 4,17| = 23,17 \% < 25,56 \% \text{ — отбрасывать не требуется.}$$

При наличии грубых ошибок следует эти результаты отбросить, уменьшить число измерений, повторить расчёт среднего и дисперсии и проверку на наличие грубых ошибок для новых крайних значений.

6) Определяем расчётное число разрядов гистограммы L по формуле

$$L \approx 1 + 3,2 \lg n = 1 + 3,2 \lg 100 = 7,4.$$

Округляем это число до целого: $L = 7$.

7) Находим расчётную величину интервала гистограммы Δx_c

$$\Delta x_c \approx \frac{x_{\max} - x_{\min}}{L} = \frac{26 + 19}{7} = 6,43 \ \%.$$

Округляем эту величину в **большую** сторону с точностью 0,1 от исходного значения, т.е. выбираем значение из интервала

$$6,43 \leq \Delta x \leq 7,073.$$

Удобно выбрать целое число $\Delta x = 7 \%$.

8) Выполняем построение гистограммы.

На числовой оси отмечаем значение середины интервала варьирования

$$\frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} = \frac{26 - 19}{2} = 3,5 \ \%.$$

Так как число разрядов — нечётное, от середины вправо и влево откладываем по половине интервала

$$\Delta x / 2 = 7 / 2 = 3,5 \ \%,$$

отмечаем остальные границы интервалов через Δx .

Путем анализа вариационного ряда данных определяем число попаданий параметра в каждый интервал гистограммы n_j ($j=1, 2, \dots, L$), выполняем обработку для получения величины χ^2 (см. ниже), результаты сводим в таблицу (табл. 2.1) и строим гистограмму (рис. 2.2).

Таблица 2.1 — Данные для построения гистограммы

Интервалы				Обработка			
j	границы	середина	n_j	n_j^*	p_j^*	np_j^*	$(n_j^* - np_j^*)^2 / np_j^*$
1	-21; -14	-17,5	2	—	—	—	—
2	-14; -7	-10,5	6	8	0,092	9,2	0,156
3	-7; 0	-3,5	15	15	0,218	21,8	2,132
4	0; 7	3,5	44	44	0,322	32,2	4,312
5	7; 14	10,5	16	16	0,247	24,7	3,061
6	14; 21	17,5	16	17	0,12	12	2,012
7	21; 28	24,5	1	—	—	—	—
	Итого:		100		1,0		11,673

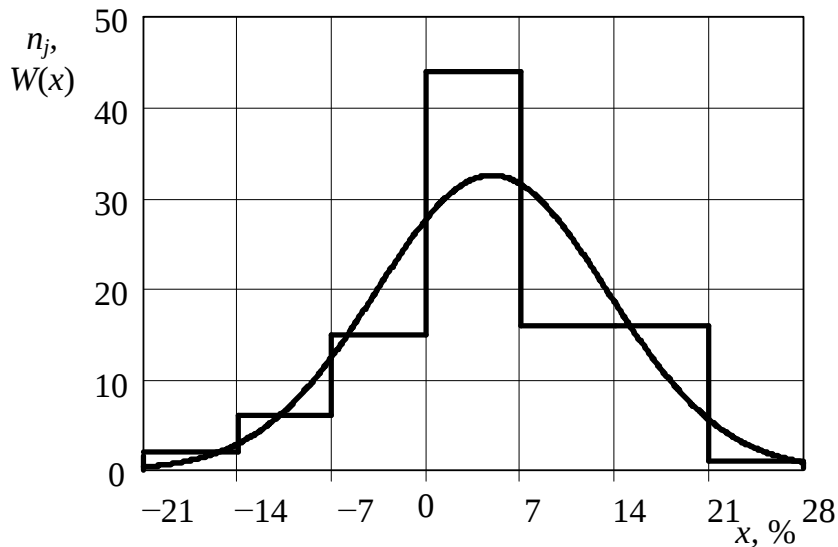


Рис. 2.2 — Гистограмма экспериментальных данных и эмпирический закон распределения

9) Проверяем соответствие эмпирического закона распределения экспериментальным данным.

По виду гистограммы убеждаемся, что может подойти нормальный закон $p(x)$ (2.3), в котором используем эмпирические значения среднего и дисперсии. Строим график функции (см. рис. 2.2)

$$W(x) = n p(x) \Delta x,$$

которая соответствует нормальному закону для объёма выборки n -и интервала гистограммы Δx .

Проверку выполним по критерию χ^2 («хи-квадрат») Пирсона [4, 5].

Шаг 1. Определяем расчётное число интервалов гистограммы (см. табл. 2.1). В нашем случае в крайних интервалах $n_j < 4$, поэтому при расчёте эти интервалы не учитываем, а числа попаданий в них относим к соседним интервалам. Получили расчётное число интервалов $L^* = 5$.

Шаг 2. Находим вероятности попадания случайной величины в каждый из разрядов:

- для левого крайнего интервала вероятность попадания в него p_1 равна значению интеграла вероятностей для середины интервала;
- для средних интервалов вероятности p_j равны разности значений интеграла вероятностей для их середин;
- для правого крайнего интервала вероятность p_L^* равна разности между единицей и значением интеграла вероятностей для его середины.

Шаг 3. Вычисляем значение величины χ^2 (см. табл. 2.1)

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{L^*} \frac{(n_j^* - np_j)^2}{np_j} = 11,673.$$

Находим число степеней свободы n_f распределения χ^2

$$n_f = L^* - 3 = 5 - 3 = 2.$$

По таблице критических значений $\chi^2_{кр}$ (приложение А.2, табл. А.2) для строки $n_f=2$ пытаемся найти столбец, удовлетворяющий условию $\chi^2 \leq \chi^2_{кр}$. Каждый столбец соответствует определенному уровню доверительной вероятности P : обычно эту величину берут равной 0,05, 0,03 или 0,01.

В нашем случае такой столбец отсутствует, следовательно, уровень значимости ниже 1 %: гипотеза о соответствии нормального закона экспериментальным данным маловероятна. Для более определённой оценки следует радикально увеличить объём выборки и повторить обработку.

2.2. Описание лабораторной установки и программного обеспечения

2.2.1. Объекты исследований и установка

Объектами исследований являются две партии резисторов одного номинала и партия или две партии транзисторов, которые для удобства смонтированы на печатных платах.

В лабораторную установку входят:

- коммутационно-измерительный пульт;
- мост процентный цифровой полуавтоматический Е6-9 или измеритель сопротивлений;
- цифровой вольтметр постоянного тока.

Пульт имеет два разъёма: один — для подключения резисторов, другой — для подключения транзисторов. Контакты разъёмов коммутируются подекадно на гнезда переключателями, расположенными на лицевой панели. Для измерения статического коэффициента усиления транзисторов пульт содержит источник питания, который включается тумблером.

Мост процентный измеряет непосредственно в процентах отклонения значений сопротивления от установленного номинала. Для установки номинала служат переключатели на лицевой панели. Прибор может работать в ручном режиме, тогда каждое измерение выполняется после нажатия кнопки запуска, или в периодическом режиме, тогда можно регулировать время измерения. Вход процентного моста одним проводом со штекером должен быть соединён с общей шиной пульта, а второй провод следует подключать к гнезду нужной декады. Результаты измерений, включая знак отклонения, выводятся на трёхразрядный цифровой дисплей.

Индикация +9.99 либо –9.99 соответствует выходу измеренного отклонения за пределы шкалы прибора!

Вольтметр используется при измерениях статического коэффициента усиления транзисторов. Поскольку в установке обеспечено калиброванное значение базового тока каждого транзистора, равное 0,1 мА, а коллекторный ток проходит через прецизионный резистор номиналом 10 Ом, статический коэф-

коэффициент усиления будет численно равен измеренному напряжению в милливольтах.

2.2.2. Обработка результатов измерений

Статистическую обработку результатов измерений можно проводить с помощью калькулятора по методике, описанной в п. 2.1.4, или с помощью программы «Статистическая обработка», составленной для среды *MathCAD*.

Перед загрузкой программы необходимо подготовить исходные данные в виде текстового файла с разделителями данных следующих видов:

- по строке — символом табуляции;
- между строк — символом конца абзаца («Enter»).

Разделителем целой и дробной частей чисел должна быть **точка**. Если операционная среда компьютера настроена на разделитель «запятая», то необходимо изменить настройку следующими действиями:

- нажать кнопку «Пуск», далее «Настройки», «Панель управления», «Язык и стандарты», «Числа»;
- выбрать разделитель в виде точки.

Данные можно записывать в одну строку или в прямоугольную таблицу, причем таблица должна быть полностью заполнена, так как по ней формируется прямоугольная матрица.

Выполнить подготовку данных можно с помощью любого текстового редактора (например, стандартной программы «Блокнот»), но удобнее использовать для этого среду *EXCEL*:

- загрузить *EXCEL* через ярлык на рабочем столе или через кнопку «Пуск», далее «Программы», «*Microsoft EXCEL*»;
- в строках сетки набрать данные в виде прямоугольной таблицы (например, для 60 чисел — 10 столбцов и 6 строк);
- в меню *File* выбрать команду «*Save as...*», тип файла «Текстовый с разделителем табуляции», набрать имя файла (например, *BR1-R1* — бригада 1, набор резисторов № 1), выбрать каталог назначения, содержащий программу статистической обработки, и дать команду на сохранение.

Теперь можно загрузить программу статистической обработки через ярлык на рабочем столе «Статистическая обработка».

Программа обрабатывает только один набор данных, поэтому нужно вводить имена файлов с данными последовательно, скопировав или выписав результаты обработки предыдущего набора.

Другие действия нужно выполнять, следуя подсказкам.

Особое внимание следует уделить форматированию осей гистограммы:

ступени гистограммы должны соответствовать границам разрядов!

2.3. Задание на лабораторную работу

2.3.1. Задание к экспериментальным исследованиям

Выполнить измерения относительных отклонений номиналов двух партий резисторов и статического коэффициента усиления двух партий транзисторов.

Результаты по каждому набору данных нужно записывать в отдельную таблицу.

2.3.2. Указания к обработке результатов измерений

1. Выполнить статистическую обработку отклонений номиналов резисторов:

- для каждой партии отдельно;
- объединив данные двух партий в один массив.

Описание шагов обработки в отчёте следует выполнять в соответствии с образцом (см. п. 2.1.4): Вариационные ряды приводить не требуется, а числовые данные по каждому шагу нужно записывать **сразу для трёх наборов**.

Графики гистограмм и эмпирических законов должны быть размещены **на одном листе** отчёта, один под другим.

2. Рассчитать значения коэффициента относительного ухода среднего значения $\delta_{\text{ср}}$ и коэффициента относительного ухода СКО $\delta_{\text{СКО}}$ по формулам (2.7, 2.8).

Оценить точность и устойчивость техпроцесса изготовления резисторов, сопоставив полученные данные с допустимыми значениями (табл. 2.2).

Таблица 2.2 — Допустимые значения коэффициентов относительного ухода среднего значения и СКО

Номер бригады	1	2	3	4	5
Допуск на уход среднего значения $\delta_{\text{срдоп}}$	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Допуск на уход СКО $\delta_{\text{СКОдоп}}$	3 %	5 %	8 %	10 %	15 %

3. Выполнить статистическую обработку результатов измерений статического коэффициента усиления транзисторов, оценить точность и устойчивость техпроцесса изготовления транзисторов аналогично тому, как это было выполнено для резисторов.

2.4. Контрольные вопросы и задачи

- 1) Какие виды воздействий используются в технологических процессах изготовления ЭРИ?
- 2) Каковы причины отклонений параметров ЭРИ от установленных номиналов?
- 3) Что такое «партия изделий»? Из каких соображений выбирается объём партии для анализа точности техпроцесса?

- 4) По каким формулам можно рассчитать эмпирическое среднее значение параметра изделия, дисперсию и среднеквадратическое отклонение (СКО) для партии изделий?
- 5) Каков физический смысл функции распределения случайной величины и интегрального закона её распределения?
- 6) Как выглядит график функции нормального закона распределения случайной величины при нулевом среднем значении и единичной дисперсии?
- 7) Как найти процент брака по точности, зная закон распределения?
- 8) Пусть некоторый техпроцесс обеспечивает определенный процент брака по точности (негодные изделия отбраковываются). К каким издержкам и последствиям приведёт попытка достичь снижения процента брака по точности?
- 9) Какие особенности техпроцесса приводят к нормальному закону распределения отклонения параметров ЭРИ, а какие — к равномерному закону?
- 10) Как выбрать объёмы выборок и интервалы взятия выборок для статистического анализа отклонений параметров ЭРИ с целью анализа точности и устойчивости техпроцесса?
- 11) Какие меры должны приниматься для сохранения точности техпроцесса и для обеспечения его устойчивости?
- 12) Как подобрать эмпирический закон распределения и проверить по критерию «хи-квадрат» соответствие этого закона экспериментальным данным? Как поступать при малой вероятности соответствия?

Приложение А.2.

Таблица распределения величины «хи-квадрат»

По закону распределения случайной величины χ^2 («хи-квадрат») распределены отклонения гистограммы, построенной для экспериментальных данных, от подбираемого эмпирического закона (табл. А.1).

Таблица А.1 — Критические значения χ^2 для доверительной вероятности P , числа степеней свободы n_f

n_f	P						
	0,90	0,80	0,50	0,10	0,05	0,03	0,01
1	0,016	0,064	0,455	2,71	3,84	4,71	6,64
2	0,211	0,446	1,386	4,6	6,0	7,01	9,21
3	0,584	1,005	2,37	6,25	7,82	8,95	11,35
4	1,064	1,646	3,36	7,78	9,50	10,71	13,28
5	1,610	2,34	4,35	9,24	11,1	12,38	15,08
8	3,49	4,59	7,34	13,36	15,5	17,01	20,09
10	4,86	6,18	9,34	15,99	18,3	19,92	23,21

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА

Цель работы: освоить методики теоретического и экспериментального анализа связи между отклонениями входных и выходных параметров радиоэлектронных функциональных узлов (РЭФУ), а также методики синтеза допусков на входные параметры.

3.1. Задачи обеспечения технологической точности изделий

3.1.1. Постановка задач

Значение выходного параметра радиоэлектронного функционального узла (РЭФУ) y определяется значениями параметров схемных элементов x_i ($i=1, 2, \dots, N$) и функциональной зависимостью между ними для данного схемотехнического решения

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (3.1)$$

В процессе расчёта схемы по необходимому (расчётному) значению выходного параметра $y_{\text{рас}}$ определяют расчётные значения параметров элементов $x_{i\text{рас}}$.

Для каждого электрорадиоизделия (ЭРИ) значение его параметра x_i может отличаться от расчётного номинала $x_{i\text{рас}}$ на некоторую величину Δx_i

$$x_i = x_{i\text{рас}} + \Delta x_i,$$

в силу чего выходной параметр также приобретает отклонение Δy

$$y = y_{\text{рас}} + \Delta y.$$

К отклонениям входных параметров Δx_i от их расчётных номиналов приводят следующие причины:

- дискретность сетки номиналов покупных ЭРИ;
- технологический разброс;
- уход параметров при изменении внешних условий (например, температуры окружающей среды);
- уход параметров из-за «старения» элементов.

Для каждого конкретного РЭФУ задают границы поля технологического допуска на выходной параметр: двустороннее $[y_{\text{min}}, y_{\text{max}}]$ или одностороннее ограничение.

Задача **обеспечения технологической точности** относится к моменту выпуска изделия с предприятия-изготовителя. В процессе эксплуатации решают задачу обеспечения **параметрической надежности**, которая сводится к поддержанию требуемой точности выходного параметра различными техническими мерами.

Предметом данной работы является только задача обеспечения технологической точности РЭФУ, которая формулируется следующим образом.

Заданы:

- расчётное значение выходного параметра $y_{рас}$;
- границы поля допуска $[y_{min}, y_{max}]$;
- функциональная зависимость между выходным и входными параметрами.

Требуется определить:

- номинальные значения входных параметров ЭРИ x_{i0} ;
- границы полей допуска для каждого входного параметра.

При решении данной задачи необходимо:

- оценить статистические характеристики входных параметров x_i ;
- оценить влияние каждого параметра ЭРИ на выходной параметр РЭФУ;
- установить требования на номиналы ЭРИ и их технологический разброс;
- определить расчётный процент брака по точности выпускаемых РЭФУ.

3.1.2. Статистические характеристики параметров ЭРИ

В состав изделий входят как покупные ЭРИ, так и ЭРИ собственного изготовления. Номинальные значения параметра для покупных ЭРИ чаще всего задают по одной из стандартных **сеток номиналов** (приложение А.3), а для ЭРИ собственного изготовления (катушки индуктивности, трансформаторы и т.п.) стремятся обеспечить расчётные значения номиналов.

Для общности будем полагать, что в результате расчёта параметра i -го ЭРИ его точное значение $x_{iрас}$ отличается от номинала x_{i0} из-за дискретности самого набора номиналов. В этом случае отклонение номинала от расчётного значения параметра можно определить как по величине, так и по знаку:

$$x_{i0} = x_{iрас} + \Delta x_{идет},$$

где $\Delta x_{идет}$ — **детерминированная** составляющая отклонения.

Так как технологический разброс носит случайный характер, значение параметра x_i каждого ЭРИ может отличаться от номинального на некоторую величину

$$x_i = x_{i0} + \Delta x_{исл} = x_{iрас} + \Delta x_{идет} + \Delta x_{исл} = x_{iрас} + \Delta x_i,$$

где $\Delta x_{исл}$ — **случайная** составляющая отклонения;

$\Delta x_i = \Delta x_{идет} + \Delta x_{исл}$ — полное отклонение.

В отличие от детерминированной составляющей отклонения, одинаковой для всех ЭРИ данного номинала, случайная составляющая у другого элемента из этой же партии может иметь как иную величину, так и противоположный знак.

Для партии ЭРИ можно определить только статистические характеристики: среднее значение $\bar{x}_i$, дисперсию отклонений σ_{xi}^2 , дифференциальный закон распределения $p(x_i)$ и некоторые другие характеристики (см. лабораторную работу № 2).

3.1.3. Связь отклонений входных параметров ЭРИ с отклонениями выходного параметра РЭФУ

При малых отклонениях входных параметров Δx_i от их расчётных значений $x_{i\text{рас}}$ отклонения выходного параметра Δy от расчётного значения $y_{\text{рас}}$ могут быть найдены аналитически, если известна математическая модель РЭФУ в виде функции многих переменных (3.1). Для этого используют разложение функции в ряд Тейлора, но считают, что отклонение выходного параметра Δy обусловлено только линейными членами ряда

$$\Delta y \approx \sum_{i=1}^N \left. \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot \Delta x_i, \quad (3.2)$$

так что полное отклонение Δy складывается из составляющих Δy_i , вызванных отклонениями параметра каждого элемента

$$\Delta y_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot \Delta x_i.$$

Входящие в (3.2) значения производных могут служить мерой влияния входных параметров на выходной, однако на практике такая мера неудобна, так как эти значения являются размерными величинами.

Обычно вводят в рассмотрение **относительные отклонения** для входных и выходных параметров

$$\begin{aligned} \delta x_i &= \frac{\Delta x_i}{x_{i\text{рас}}} \cdot 100 \%; \\ \delta y &= \frac{\Delta y}{y_{\text{рас}}} \cdot 100 \%; \\ \delta y_i &= \frac{\Delta y_i}{y_{\text{рас}}} \cdot 100 \%. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Тогда вместо (3.2) используют соотношение

$$\delta y = \sum_{i=1}^N K_{bi} \cdot \delta x_i, \quad (3.4)$$

где K_{bi} — коэффициент влияния i -го параметра на выходной параметр

$$K_{bi} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \bigg|_{x_{ipac}} \cdot \frac{x_{ipac}}{y_{pac}} = \frac{\partial(\ln f)}{\partial x_i} \bigg|_{x_{ipac}} \cdot x_{ipac}. \quad (3.5)$$

Формула (3.5) содержит два равноценных варианта расчётного соотношения: в каждом данном случае применяют наиболее удобный.

Определение понятия коэффициента влияния следует из (3.3)

$$K_{bi} = \frac{\delta y_i}{\delta x_i}. \quad (3.6)$$

Коэффициент влияния является как бы коэффициентом передачи между относительным отклонением параметра данного элемента и относительным отклонением выходного параметра.

Для оценки систематических отклонений соотношения (3.2, 3.4) применяют непосредственно. Для случайных отклонений среднее значение также находят с помощью (3.2, 3.4), куда вместо номиналов подставляют средние значения параметров ЭРИ.

Дисперсию случайных отклонений определяют **статистическим суммированием**. При независимых отклонениях такое суммирование задается соотношением

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^N K_{bi}^2 \cdot \sigma_{xi}^2, \quad (3.7)$$

где $\sigma_y^2, \sigma_{xi}^2$ — дисперсии случайных относительных отклонений выходного параметра РЭФУ и параметров ЭРИ, соответственно.

Обычно считают, что предельные относительные отклонения параметров ЭРИ пропорциональны значениям корней квадратных из дисперсий, то есть среднеквадратическим отклонениям (СКО). Тогда формулу статистического суммирования для предельных допустимых отклонений $\delta y_{доп}$ и $\delta x_{iдоп}$ можно записать в виде

$$\delta y_{доп} = \sqrt{\sum_{i=1}^N K_{bi}^2 \cdot (\delta x_{iдоп})^2}. \quad (3.8)$$

Если аналитический вид зависимости (3.1) не известен, то связь отклонений находят непосредственным моделированием малых отклонений в численной или физической модели. При этом коэффициенты влияния рассчитывают на основе определения данного понятия:

- придают достаточно малое отклонение анализируемому параметру;
- измеряют или рассчитывают отклонение выходного параметра;
- рассчитывают относительные отклонения (3.3), затем коэффициенты влияния (3.6).

3.1.4. Синтез допусков на параметры элементов и выбор их номиналов

Для выходного параметра РЭФУ y считаются известными его расчётное значение $y_{\text{рас}}$ и допустимые отклонения «вверх» $\Delta y_{\text{доп}+}$ и «вниз» $\Delta y_{\text{доп}-}$. Для простоты будем считать их одинаковыми: $\Delta y_{\text{доп}+} = \Delta y_{\text{доп}-} = \Delta y_{\text{доп}}$.

Введём допустимое относительное отклонение выходного параметра $\delta y_{\text{доп}}$

$$\delta y_{\text{доп}} = \frac{\Delta y_{\text{доп}}}{y_{\text{рас}}} \cdot 100 \, \%. \quad (3.8)$$

Обычно допускается некоторое отклонение среднего значения выходного параметра $\bar{y}$ от расчётного $y_{\text{рас}}$ для партии изделий. Введём относительное отклонение $\delta_{\text{ср}}$ среднего значения от расчётного

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\bar{y} - y_{\text{рас}}}{y_{\text{рас}}} \cdot 100 \, \% \quad (3.9)$$

и коэффициент относительной асимметрии среднего значения $\beta_{\text{ср}}$

$$\beta_{\text{ср}} = \left| \frac{\delta_{\text{ср}}}{\delta y_{\text{доп}}} \right| \cdot 100 \, \%. \quad (3.10)$$

Будем считать, что связь между параметрами ЭРИ (входными) и выходным параметром задается соотношением (3.1), причём вид функции считается известным. Непосредственно из (3.1) различными математическими методами можно найти расчётные значения входных параметров $x_{i\text{рас}}$, а с помощью формул (3.6) — значения их коэффициентов влияния.

Основой для установления допусков на входные параметры служит соотношение (3.8). Однако данная задача относится к некорректно поставленным, так как необходимо определить значения N неизвестных допусков, имея только одно условие: суммарное относительное отклонение выходного параметра не должно превышать допустимой величины. Подобные задачи решают методом **последовательных приближений**.

Шаг 1. В первом приближении полагают, что **вклады** отклонений каждого входного параметра в отклонение выходного параметра **одинаковы**, а значит, все члены суммы в правой части (3.8) одинаковы. Тогда допустимые относительные отклонения первого приближения входных параметров $\delta x_{i\text{доп}1}$ находят по простой формуле

$$\delta x_{i\text{доп}1} = \frac{\delta y_{\text{доп}}}{K_{vi} \sqrt{N}}. \quad (3.11)$$

Шаг 2. Подбирают допустимые отклонения второго приближения $\delta x_{i\text{доп}2}$ путём «округления» до ближайших стандартных значений (приложение А.3). При этом нужно учитывать, что выбрав для допуска первого элемента значение, большее расчётного, мы ужесточаем требования к остальным элементам. Выбирать же минимальные допуски сразу для всех элементов нецелесообразно

по экономическим соображениям, так как более точные элементы, как правило, дороже менее точных.

Шаг 3. Находят относительное отклонение выходного параметра $\delta y_{\text{доп2}}$ путём статистического суммирования отклонений второго приближения $\delta x_{i\text{доп2}}$ по формуле

$$\delta y_{\text{доп2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N K_{vi}^2 \cdot (\delta x_{i\text{доп2}})^2}. \quad (3.12)$$

Проверяют, не превышает ли допустимое значение $\delta y_{\text{доп}}$. В случае превышения выбирают элементы, точность которых можно повысить (например, используя прецизионные элементы или соединения однотипных элементов — так называемый «составной номинал»), устанавливают для них более жёсткие допуски и повторяют проверку.

Шаг 4. По сеткам номиналов, соответствующим выбранным допускам (приложение А.3), выбирают номиналы элементов x_{i0} , максимально близкие к расчётным.

По формуле (3.1) рассчитывают номинальное значение выходного параметра y_0 для выбранных номиналов элементов

$$y_0 = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{N0}). \quad (3.13)$$

Затем определяют относительное отклонение δ_0 его от расчётного и значение коэффициента относительной асимметрии β_0 по формулам

$$\delta_0 = \frac{y_0 - y_{\text{рас}}}{y_{\text{рас}}} 100\%; \quad (3.14)$$

$$\beta_0 = \left| \frac{\delta_0}{\delta y_{\text{доп}}} \right| \cdot 100\%. \quad (3.15)$$

Сравнивают значение β_0 с допустимым $\beta_{\text{доп}}$. Если $\beta_0 \leq \beta_{\text{доп}}$, то выбор номиналов и допусков считают удовлетворительным, в противном случае пытаются подобрать другие номиналы либо, если это не удастся сделать из-за излишней «грубости» сетки номиналов, выбирают более жёсткие допуски (более «тонкую» сетку) для одного или нескольких элементов.

3.1.5. Оценка процента брака по точности для всего изделия

Пусть для каждого из типов и типономиналов ЭРИ, входящих в изделие, известно следующее:

- номинал по техническим условиям x_{i0} ;
- допустимое относительное отклонение от номинала $\delta x_{i\text{доп}}$;
- допустимый процент брака по точности E_{xi} .

Предполагаем, что случайные отклонения параметров элементов и выходного параметра подчиняются нормальному закону распределения, а средние значения в каждой партии совпадают с номиналами.

В этом случае процент брака по точности ЭРИ E_{xi} связан со значениями интеграла вероятностей $F(t)$ следующим соотношением [4]

$$E_{xi} = [1 + F(-c\sigma_{xi}) - F(c\sigma_{xi})] \cdot 100 \% = [2 - 2F(c\sigma_{xi})] \cdot 100 \%,$$

где σ_{xi} — среднеквадратическое отклонение (СКО);

c — множитель.

По допустимому значению процента брака по точности ЭРИ E_{xi} находим значение множителя c либо по таблице значений интеграла вероятностей (приложение Б.3, таблица Б.1), либо по таблице аргументов интеграла вероятностей, выраженной в значениях E_{xi} и c (приложение Б.3, таблица Б.2).

Рассчитываем значение дисперсии относительных отклонений параметров элементов

$$\sigma_{xi}^2 = \left(\frac{\delta x_{i\text{доп}}}{c} \right)^2.$$

Используя перечисленные данные, расчётным путём определяем:

- номинальное значение выходного параметра y_0 по формуле (3.13);
- относительное отклонение среднего значения выходного параметра от расчётного δ_{cp} по формуле (3.14);
- среднеквадратическое отклонение (корень квадратный из дисперсии) относительного отклонения выходного параметра σ_y по формуле (3.7);
- процент брака по точности E_y

$$E_y = [2 - F(t_1) - F(|t_2|)] 100 \%, \quad (3.16)$$

где $t_1 = \frac{1}{\sigma_y} (\delta_{cp} + \delta y_{\text{доп}})$;

$$t_2 = \frac{1}{\sigma_y} (\delta_{cp} - \delta y_{\text{доп}}).$$

3.2. Описание объекта исследования и лабораторной установки

3.2.1. Объект исследования

Исследуемым РЭФУ является мультивибратор с коллекторно-базовыми связями на двух транзисторах, который генерирует периодическую последовательность импульсов. Мультивибратор с источником питания конструктивно размещен в пульте. На лицевой панели пульта имеется мнемосхема объекта с гнездами для подключения внешних элементов и измерительных приборов.

Длительности положительных импульсов на коллекторах транзисторов определяют следующие времязадающие цепи:

- для VT1 — C2, R2;
- для VT2 — C1, R3.

Времязадающие резисторы R2, R3 — составные; их номиналы определяются **суммой** сопротивлений, установленных переключателями магазинов сопротивлений, и сопротивлений добавочных резисторов по 1 кОм, которые встроены в макет.

На магазинах сопротивлений следует устанавливать значения, на 1 кОм меньше требуемых.

Конденсатор C2, встроенный в макет, имеет постоянный номинал, равный 100 нФ.

Конденсатор C1 реализован в виде высокоточного магазина емкостей. Его номинал следует выставить перед измерениями в соответствии с заданием.

Таким образом, в данном случае число варьируемых элементов N равно двум: роль параметров x_1 и x_2 играют значения сопротивлений R2 и R3.

Выходным параметром объекта исследований y является **период повторения** импульсов $T(R2, R3)$, который равен сумме длительностей положительных импульсов на коллекторах — $T_1(R3)$ и $T_2(R2)$, соответственно:

$$T(R2, R3) = T_1(R3) + T_2(R2), \quad (3.17)$$

где $T_1(R3) = 0,7 \cdot C1 \cdot R3$;

$T_2(R2) = 0,7 \cdot C2 \cdot R2$.

Примечание. При расчётах рекомендуется ёмкости задавать в нанофарадах, сопротивления — в килоомах, тогда длительности будут иметь размерность микросекунд. Например, при $C2 = 100$ нФ, $R2 = 5$ кОм получаем $T_2 = 0,7 \cdot 100 \cdot 5 = 350$ мкс.

Скважность Q положительных импульсов на коллекторе VT1 равна

$$Q = \frac{T(R2, R3)}{T_1(R3)} = \frac{T_1(R3) + T_2(R2)}{T_1(R3)}. \quad (3.18)$$

3.2.2. Лабораторная установка и работа с ней

В состав установки входят:

- макет с подключёнными к нему магазином емкостей и двумя магазинами сопротивлений;
- электронносчётный частотомер с блоком временных интервалов;
- два осциллографа.

Электронно-лучевой (аналоговый) осциллограф включен в состав установки только для визуального контроля формы импульсов: измерения по его осциллограмме не проводятся.

Измерения можно выполнять по одному из двух вариантов.

Вариант 1: с помощью частотомера.

Перед измерениями периода повторения импульсов и длительности импульса частотомером ЧЗ-34А следует проверить настройки базового блока:

- режим запуска: «АВТОМАТ»;
- время измерения: «1 ms»;
- метки времени: «1 mks».

Импульсы положительной полярности с коллектора VT1 с помощью сигнального кабеля подаются на вход «В» блока временных интервалов, настройки которого должны быть следующими:

- переключатели уровней входа: «1 : 3»;
- плавная регулировка уровней: примерно посередине между «0» и «1» вольт;
- режим работы: «СОВМЕСТНО»;
- фронты импульсов: для входа «В» — положительный перепад, для входа «Г» — отрицательный перепад.

При измерении периода повторения переключателем «РОД РАБОТЫ» включить режим « T_B ».

Для измерения длительности импульса переключателем «РОД РАБОТЫ» включить режим « $t_{B-Г}$ ».

Вариант 2: с помощью цифрового осциллографа *SIGLENT SDS 1072CNL*.

Сигнальный кабель может быть подключён к любому входу прибора: CH1 или CH2, штекеры кабеля — к общей шине макета и к коллектору VT1.

Осциллограф включается и выключается кнопкой, расположенной на верхней панели прибора.

После включения необходимо выполнить следующие настройки:

- нажать кнопку *Default Setup*;
- нажать кнопку выбора того канала (CH1 или CH2), к которому подключен сигнальный кабель;
- установить подходящий масштаб по вертикали вращением ручки *Push-Variable* (размах импульсов не менее 5 делений) и отцентрировать изображение ручкой *Position*;
- установить масштаб по горизонтали вращением ручки *Push-Zoom* так, чтобы период колебаний занимал большую часть экрана;
- нажать кнопку *Run Stop*.

Примечание. Режим остановки осциллограммы *Run Stop* применяется для исключения влияния нестабильности периода на результаты измерений. Этот режим следует включать только перед измерениями, а после измерений — отключать.

Измерения периода и длительности импульсов выполняются в следующем порядке:

- нажимаем кнопку *Cursors*: в правой части экрана появится меню «КУРСОР / Режим / Выкл»;
- включаем два курсора кнопкой против слова «Выкл»;

- кнопкой в строке меню «Тип / Напряжение» переключаем прибор в режим «Время»: на экране отобразятся курсоры A и B в виде вертикальных линий (курсор B может быть скрыт изображением меню);
- включаем управление первым курсором кнопкой в строке «Кур A » и вращаем ручку *Intensity / Adjust* до совмещения курсора с началом периода или с передним фронтом импульса;
- включаем управление вторым курсором кнопкой в строке «Кур B » и вращаем ручку *Intensity / Adjust* до совмещения курсора с моментом окончания периода или с задним фронтом импульса;
- в левом верхнем углу экрана считываем значение ΔT — результат измерения.

3.3. Задание на лабораторную работу

3.3.1. Задание к предварительным расчётам

1. Выполнить расчётным путем подбор номиналов резисторов R_2 и R_3 мультивибратора и рядов допусков на них для условий, выбранных в соответствии с номером бригады по таблице заданий (таблица 3.1), в которой приведены расчётные значения периода $T_{\text{рас}}$, номинал емкости C_1 , допустимое относительное отклонение периода $\delta T_{\text{доп}}$ (играет роль величины δy), допустимое значение коэффициента относительной асимметрии $\beta_{\text{доп}}$, расчётное значение скважности $Q_{\text{рас}}$ (требования по точности к скважности не предъявляются).

Таблица 3.1 — Условия выбора времязадающих резисторов

№ зад.	C_1 , нФ	$T_{\text{рас}}$, мкс	$\delta T_{\text{доп}}$, %	$\beta_{\text{доп}}$, %	$Q_{\text{рас}}$	E_{R_2}	E_{R_3}
1	60	556	6	30	2,18	1%	3%
2	80	605	6	25	2,16	2%	2%
3	90	740	7	30	2,35	3%	2%
4	60	604	5	30	2,37	2%	1%
5	80	886	5	25	2,84	5%	4%

Для выполнения данного задания необходимо:

- с помощью формул (3.17, 3.18) найти расчётные значения длительностей импульсов $T_{1\text{рас}}$, $T_{2\text{рас}}$, затем — расчётные значения сопротивлений $R_{2\text{рас}}$ и $R_{3\text{рас}}$;
- вывести расчётные формулы для коэффициентов влияния R_2 и R_3 на период T , исходя из формулы (3.5), рассчитать значения K_{BR_2} , K_{BR_3} ;
- согласно методике, описанной в п. 3.1.4, получить первое приближение для расчётных допусков на номиналы R_2 и R_3 с помощью формулы (3.11) и выполнить остальные шаги по выбору допусков и номиналов, включая проверку допуска на асимметрию.

2. Определить процент брака по точности для изделия «Мультивибратор» по методике, изложенной в п. 3.1.5, для выбранных номиналов резисторов, их

относительных допустимых отклонений и заданных значений процента брака по точности резисторов E_{R2} и E_{R3} (см. таблицу 3.1).

3.3.2. Задание к экспериментальным исследованиям

1. Выполнить оценку применимости расчётных формул к выходному параметру исследуемого РЭФУ следующим образом.

Перед измерениями установить заданное значение ёмкости конденсатора $C1$ и расчётные значения сопротивлений резисторов $R_{2\text{рас}}$, $R_{3\text{рас}}$.

Измерить экспериментальное значение периода колебаний $T_{\text{э}}$ и длительности импульса на коллекторе первого транзистора $T_{1\text{э}}$.

Определить относительное расхождение результатов расчёта и эксперимента для периода δ_T

$$\delta_T = \left| \frac{T_{\text{рас}} - T_{\text{э}}}{T_{\text{рас}}} \right| \cdot 100 \, \%.$$

Сопоставить величину δ_T с допуском на отклонение среднего значения, составляющим $1/3$ от $\delta T_{\text{доп}}$. Если δ_T больше этой величины, то следует подобрать экспериментально такое значение ёмкости $C1$, чтобы достигалось максимально близкое к расчётному значение периода.

Рассчитать экспериментальное значение скважности импульсов $Q_{\text{э}}$ и найти относительное отклонение его от заданного значения δ_Q

$$\delta_Q = \left| \frac{Q_{\text{рас}} - Q_{\text{э}}}{Q_{\text{рас}}} \right| \cdot 100 \, \%.$$

2. Оценить детерминированную составляющую отклонения выходного параметра.

Для этого выставить на макете номиналы R_{20} , R_{30} , выбранные по рядам номиналов.

Измерить длительность периода T_0 и длительность импульса T_{10} .

Рассчитать значения детерминированной составляющей относительного отклонения $\delta_{\text{дет}}$

$$\delta_{\text{дет}} = \left| \frac{T_0 - T_{\text{рас}}}{T_{\text{рас}}} \right| \cdot 100 \, \%,$$

а также и коэффициента относительной асимметрии $\beta_{\text{дет}}$

$$\beta_{\text{дет}} = \frac{\delta_{\text{дет}}}{\delta_{\text{доп}}} \cdot 100 \, \%.$$

3. Определить экспериментальные значения коэффициентов влияния $K_{\text{в2}}$ и $K_{\text{в3}}$ резисторов на период колебаний.

Для этого выполнить измерения четырёх значений периода:

- при номинальном значении $R3_0$, варьируя номинал $R2$ на величину $\Delta R2$ относительно величины $R2_0$ «вверх» и «вниз»: T_{2+} и T_{2-} , соответственно;
- при номинальном значении $R2_0$, варьируя номинал $R3$ на величину $\Delta R3$ относительно величины $R3_0$ «вверх» и «вниз»: T_{3+} и T_{3-} , соответственно.

Перед измерениями оценить размах случайных отклонений периода, вызванных собственной нестабильностью частоты (мультивибратор относится к генераторам импульсов с низкой стабильностью частоты). Интервалы варьирования $\Delta R2$ и $\Delta R3$ следует подобрать так, чтобы соответствующие отклонения периода в 10—20 раз превышали размах случайных отклонений.

Рассчитать экспериментальные значения коэффициентов влияния по формулам

$$K_{в2} = \frac{T_{2+} - T_{2-}}{T_0} \cdot \frac{R2_0}{2\Delta R2};$$

$$K_{в3} = \frac{T_{3+} - T_{3-}}{T_0} \cdot \frac{R3_0}{2\Delta R3}.$$

3.4. Контрольные вопросы и задачи

- 1) Как ставится задача обеспечения технологической точности выходного параметра?
- 2) Чем отличаются постановки задач технологической точности и параметрической надежности изделий?
- 3) Какие вероятностные характеристики могут быть определены для случайных отклонений параметров элементов и выходного параметра РЭФУ?
- 4) Какие виды моделей выходного параметра используют при решении задачи обеспечения точности?
- 5) Пусть в результате синтеза допусков установлены ограничения для 3 элементов, равные 0,1 %, 1 %, 5 %. Какими техническими решениями можно их обеспечить?
- 6) Пусть коэффициенты влияния двух параметров равны 0,1 и 1; параметры имеют допуск ± 5 %. Каковы будут при этом пределы случайных отклонений выходного параметра?
- 7) Пусть коэффициенты влияния двух параметров равны 1, параметр первого элемента имеет допуск ± 10 %, выходной параметр имеет допуск ± 6 %. Какими техническими решениями обеспечить требуемую точность выходного параметра?
- 8) Как с помощью численной модели РЭФУ в виде компьютерной программы определить коэффициенты влияния отдельных параметров?
- 9) Как определить коэффициенты влияния параметров в физическом эксперименте?

- 10) Пусть выходной параметр имеет допуск $\pm 10\%$. Установить стандартные допуски на параметры 4 элементов, для которых коэффициенты влияния равны 1; 0,5; 0,3; 0,2.
- 11) Номинал резистора R получен последовательным соединением резисторов R_1, R_2 . Коэффициент влияния номинала R на выходной параметр K_{BR} известен. Вывести формулы для коэффициентов влияния номиналов R_1, R_2 на выходной параметр.
- 12) Номинал R получен параллельным соединением резисторов R_1, R_2 . Коэффициент влияния номинала R на выходной параметр K_{BR} известен. Вывести формулы для коэффициентов влияния номиналов R_1, R_2 на выходной параметр.

Примечание. Для описания параллельного соединения рекомендуется применить наиболее простую формулу (сложение проводимостей).

Приложение А.3. Стандартные ряды номиналов

Ряды номиналов обозначают индексами E_n . Они представляют собой геометрические прогрессии с единичным начальным значением и знаменателем $q_n=(10)^{1/n}$. Наиболее употребительные ряды приведены в табл. А.1.

Таблица А.1 — Ряды номиналов для резисторов и конденсаторов

Индекс	Допуск в процентах	Буквенный шифр	Значения (единицы, десятки, сотни)
$E6$	± 20	M	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8
$E12$	± 10	K	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 8,2
$E24$	± 5	J	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 1,1 1,6 2,4 3,6 5,1 7,5 1,2 1,8 2,7 3,9 5,6 8,2 1,3 2,0 3,0 4,3 6,2 9,1
$E48$	± 2	G	1,00 1,47 2,15 3,16 4,64 6,81 1,05 1,54 2,26 3,32 4,87 7,15 1,10 1,62 2,37 3,48 5,11 7,50 1,15 1,69 2,49 3,65 5,36 7,87 1,21 1,78 2,61 3,83 5,62 8,25 1,27 1,87 2,74 4,02 5,90 8,66 1,33 1,96 2,87 4,22 6,19 9,09 1,40 2,05 3,01 4,42 6,49 9,53

Приложение Б.3. Некоторые статистические таблицы

Для положительного аргумента t значения интеграла вероятностей $F(t)$ приведены в таблице Б.1, для отрицательных аргументов используется соотношение

$$F(-t) = 1 - F(t).$$

Таблица Б.1 — Значения интеграла вероятностей

t	$F(t)$	t	$F(t)$	t	$F(t)$	t	$F(t)$
0,0	0,5000	1,0	0,8413	2,0	0,9772	3,0	0,9986
0,1	0,5398	1,1	0,8643	2,1	0,9821	3,1	0,9990
0,2	0,5793	1,2	0,8849	2,2	0,9860	3,2	0,9993
0,3	0,6179	1,3	0,9032	2,3	0,9892	3,3	0,9995
0,4	0,6554	1,4	0,9192	2,4	0,9918	3,4	0,9996
0,5	0,6915	1,5	0,9332	2,5	0,9937	3,5	0,9997
0,6	0,7257	1,6	0,9452	2,6	0,9953	3,6	0,9998
0,7	0,7580	1,7	0,9554	2,7	0,9965	3,7	0,9998
0,8	0,7881	1,8	0,9641	2,8	0,9974	3,8	0,9999
0,9	0,8159	1,9	0,9713	2,9	0,9981	3,9	0,9999

Используя таблицу Б.1, можно найти вероятность выхода случайной величины за границы интервала $[-c, c]$, которая определяет процент брака по точности (таблица Б.2).

Таблица Б.2 — Значения множителя c для заданного процента брака E при нормальном законе распределения отклонений

E	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	10 %	20 %
c	2,576	2,326	2,17	2,054	1,96	1,881	1,812	1,645	1,281

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С НИМИ

Цель работы: изучение методики экспериментального исследования паразитных связей между цепями на печатных платах и основные способы борьбы с паразитными сигналами.

4.1. Теоретические сведения

В диапазоне частот 1—1000 кГц основными видами паразитных связей между печатными проводниками являются емкостная связь и связь через взаимную индуктивность [7]. Условия проявления этих видов связи различны:

- емкостная (электростатическая) связь возникает при наличии ненулевого потенциала в цепи источника наводки и при ненулевом сопротивлении между цепью приемника наводки и общей шиной;
- для проявления связи через взаимную индуктивность необходимы протекание тока в цепи источника наводки и возможность протекания тока в цепи приемника наводки.

При анализе паразитных связей считают известной ЭДС источника наводки $E_{ин}$, а задача состоит в определении напряжения наводки U_n на выходе приемника наводки и **коэффициента паразитной связи K_n**

$$K_n = \frac{|U_n|}{E_{ин}}.$$

4.1.1. Анализ емкостной паразитной связи

Цепь **емкостной паразитной связи** на печатной плате (рис. 4.1) составляют:

- контур источника наводки, содержащий источник ЭДС $E_{ин}$ и печатный проводник (для простоты считается, что к проводнику не подключена активная нагрузка — режим холостого хода);
- паразитная ёмкость $C_{пар}$;
- контур приемника наводки, который состоит печатного проводника, источника полезного сигнала с внутренним сопротивлением Z_i (величина его ЭДС не влияет на напряжение паразитного сигнала), приёмника сигнала и наводки с входным сопротивлением $Z_{вх}$.

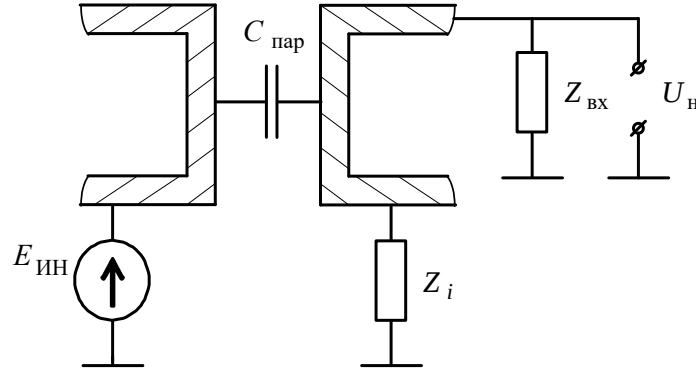


Рис. 4.1 — Эквивалентная схема цепи емкостной паразитной связи

Для гармонического паразитного сигнала с частотой $\omega_{\text{пар}}$ напряжение наводки $U_{\text{н}}$ равно [7]

$$U_{\text{н}} = \frac{E_{\text{ин}} j\omega_{\text{пар}} C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}}}{1 + j\omega_{\text{пар}} C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}}}, \quad (4.1)$$

где $Z_{\text{пр}} = \frac{Z_i Z_{\text{вх}}}{Z_i + Z_{\text{вх}}}.$

Соответственно, для коэффициента паразитной связи емкостной наводки $K_{\text{ен}}$ получим

$$K_{\text{ен}} = \frac{\omega_{\text{пар}} C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + (\omega_{\text{пар}} C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}})^2}}. \quad (4.2)$$

В большинстве случаев величина $K_{\text{ен}}$ мала по сравнению с единицей, поэтому формулу (4.2) можно упростить.

Величина паразитной ёмкости $C_{\text{пар}}$ зависит от конфигурации проводников, их взаимного расположения и протяженности l_i **участков связи**, на которых поперечное сечение остается неизменным.

Зависимость $C_{\text{пар}}$ от l_i является линейной, поэтому в рассмотрение обычно вводят **погонную ёмкость** $C_{\text{пог}}$ — ёмкость на единицу длины участка связи. При нескольких участках связи паразитная ёмкость будет равна сумме ёмкостей отдельных участков [7, 8]

$$C_{\text{пар}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{пог}i} l_i, \quad (4.3)$$

где n — число участков связи.

Величину $C_{\text{пог}}$ можно определить с погрешностью не более $\pm 20\%$ по следующей методике [7].

Если проводники расположены на одной стороне платы, то

$$C_{\text{пог}} = K_{\text{пi}} \frac{\varepsilon_{\text{окр}} + \varepsilon_{\text{пл}}}{2}, \quad (4.4)$$

где $K_{\text{пi}}$, пФ/см — погонная ёмкость при воздушном заполнении;

$\varepsilon_{\text{окр}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость окружающей среды (для воздуха $\varepsilon_{\text{окр}} = 1$);

$\varepsilon_{\text{пл}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость материала основания печатной платы (для стеклотекстолита $\varepsilon_{\text{пл}} \approx 5$).

Для проводников с двух сторон платы:

$$C_{\text{пог}} = K_{\text{пi}} \cdot \varepsilon_{\text{пл}}. \quad (4.5)$$

Величину $K_{\text{пi}}$, определяемую взаимным расположением проводников, можно найти с помощью графиков [7] или по аппроксимирующим формулам:

- для проводников шириной $t_1=t_2=t$ с зазором между ними S на одной стороне платы (рис. 4.2 а)

$$K_{\text{п}} = 0,15 \left(1 - 0,7 \lg \frac{S}{t} \right), \text{ пФ/см.}$$

- для проводников при $t_1 < t_2/3$ на одной стороне платы (рис. 4.2 б)

$$K_{\text{п}} = 0,17 \left(1 - 0,7 \lg \frac{S}{t} \right), \text{ пФ/см.}$$

- для проводников шириной $t_1=t_2=t$, расположенных друг над другом на двух сторонах платы (рис. 4.2 в)

$$K_{\text{п}} = 10^{-0,69(1+0,8 \lg \frac{S}{t})}, \text{ пФ/см.}$$

- для проводников при $t_1 < t_2/3$, расположенных друг над другом на двух сторонах платы (рис. 4.2 г)

$$K_{\text{п}} = 10^{-0,55(1+\lg \frac{S}{t})}, \text{ пФ/см.}$$

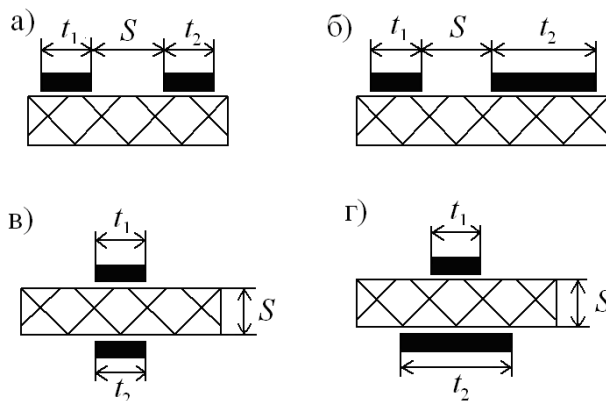


Рис. 4.2 — Конфигурации печатных проводников

4.1.2. Анализ взаимоиндуктивной паразитной связи

Расчёт напряжения наводки, обусловленной **взаимоиндуктивной паразитной связью** можно выполнить на основе анализа эквивалентной схемы (рис. 4.3), в которую входят:

- контур источника наводки, имеющий ЭДС $E_{ин}$ и полное контурное сопротивление $Z_{ин}$;
- паразитная взаимная индуктивность $M_{пар}$;
- контур приёмника наводки, в котором учитываются контурное сопротивление $Z_{к}$ (в него входят омическое и индуктивное сопротивление проводников, сопротивления схемных элементов), входное сопротивление приёмника сигнала и наводки $Z_{вх}$, внутреннее сопротивление источника полезного сигнала Z_i .

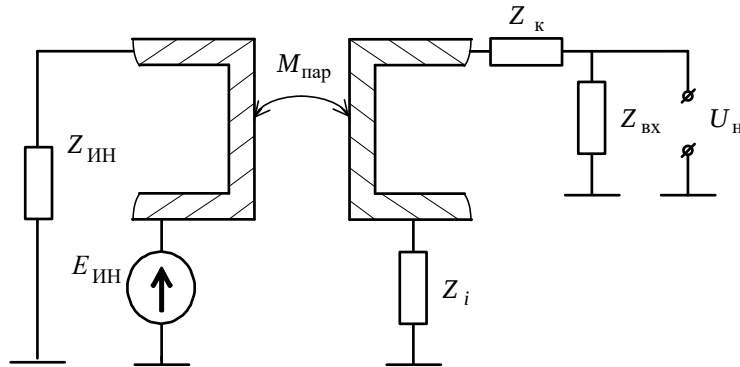


Рис 4.3 — Эквивалентная схема цепи при взаимоиндуктивной паразитной связи

Тогда напряжение наводки $U_{н}$ равно [7,8]

$$U_{н} = \frac{E_{ин} j\omega_{пар} M_{пар} Z_{вх}}{Z_{ин} \cdot Z_{пр}}, \quad (4.6)$$

где $Z_{пр} = Z_{вх} + Z_{к} + Z_i$.

Коэффициент паразитной связи взаимоиндуктивной наводки $K_{вн}$

$$K_{вн} = \omega_{пар} M_{пар} \left| \frac{Z_{вх}}{Z_{ин} \cdot Z_{пр}} \right|, \quad (4.7)$$

Для расчёта взаимной индуктивности $M_{пар i}$ на участке связи конфигураций «а» и «в» (см. рис. 4.2) протяженностью l_i рекомендуется формула [8]

$$M_{пар i} = 0,2 \cdot l_i \ln \frac{2l_i}{S + 0,5(t_1 + t_2)}, \quad (4.8)$$

где взаимная индуктивность измеряется в наногенри, а линейные размеры — в миллиметрах.

4.1.3. Меры борьбы с паразитными связями

Для оценки эффективности любого метода ослабления влияния паразитных связей вводят **коэффициент ослабления наводки** $K_{осл.н}$

$$K_{\text{осл.н}} = \left| \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}^*} \right|, \quad (4.9)$$

где $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{н}}^*$ — напряжения наводки до и после введения мер борьбы с паразитными связями, соответственно.

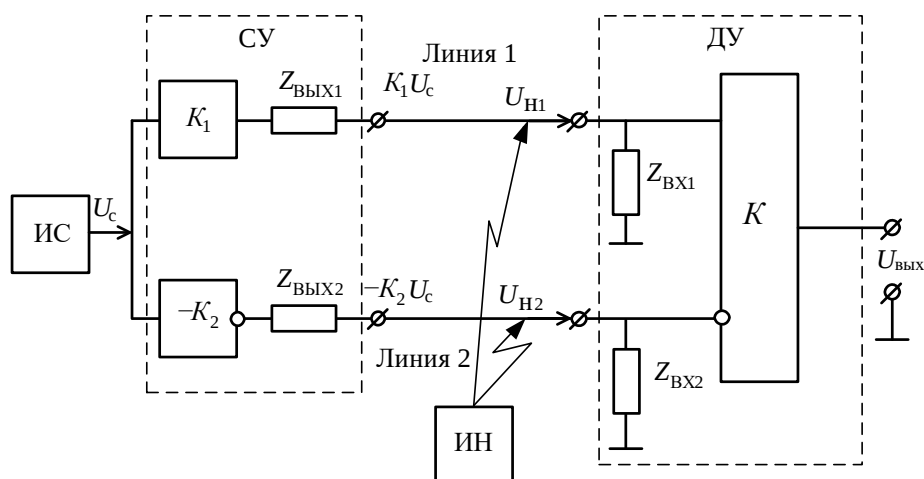
Часто коэффициент ослабления выражают в децибелах $N_{\text{осл.н}}$

$$N_{\text{осл.н}} = 20 \lg(K_{\text{осл.н}}), \quad (4.10)$$

В данной лабораторной работе рассматриваются три способа борьбы с паразитными сигналами:

- симметризация сигналов;
- гальваническая развязка;
- электростатическое экранирование.

Метод симметризации сигналов относится к схемотехническим мерам борьбы, направленным на снижение чувствительности схем к наводкам любого вида (рис. 4.4).



ИС — источник сигнала; СУ — симметрирующее устройство;
ИН — источник наводки; ДУ — дифференциальный усилитель.

Рис.4.4 — Структурная схема цепи с симметричными сигналами

Полезный сигнал напряжением U_c с выхода источника сигнала ИС поступает на симметрирующее устройство СУ, которое имеет два выхода. Коэффициент передачи СУ со входа на первый выход равен K_1 , а на второй равен $-K_2$ (фаза сигнала изменяется на **противоположную**). Выходы СУ соединены с двумя линиями, по которым передаются полезные сигналы. Паразитные сигналы от источника наводки ИН попадают через паразитную связь на сигнальные линии. Так как паразитные сигналы не проходят через СУ, напряжения наводки на первой и второй линиях ($U_{\text{н1}}$ и $U_{\text{н2}}$, соответственно) **синфазны**.

Концы линий с симметричными полезными сигналами подключены к дифференциальному усилителю ДУ с коэффициентами передачи K и $-K$ по соответствующим входам. Напряжение на выходе ДУ $U_{\text{вых}}$ является суммой напряжений полезного сигнала $U_{\text{с.вых}}$ и наводки $U_{\text{н.вых}}$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{с.вых}} + U_{\text{н.вых}}.$$

Если выходные сопротивления СУ $Z_{\text{вых1}}, Z_{\text{вых2}}$ равны, а также равны и входные сопротивления ДУ $Z_{\text{вх1}}, Z_{\text{вх2}}$, то напряжение полезного сигнала на выходе ДУ будет равно

$$U_{\text{с.вых}} = K \cdot K_1 \cdot U_c - K \cdot (-K_2) \cdot U_c = K \cdot (K_1 + K_2) \cdot U_c.$$

Напряжение наводки на выходе ДУ равно

$$U_{\text{н.вых}} = K \cdot U_{\text{н1}} - K \cdot U_{\text{н2}} = K \cdot (U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}}).$$

Таким образом, напряжения полезных сигналов в ДУ суммируются, а наводок — вычитаются.

Коэффициент ослабления наводки $K_{\text{осл.н}}$ можно оценить, сравнивая $U_{\text{н.вых}}$ с величиной, которая будет на выходе ДУ при подключении только одной линии (например, первой)

$$K_{\text{осл.н}} = \frac{K \cdot U_{\text{н1}}}{K (U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}})} = \frac{U_{\text{н1}}}{U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}}}.$$

Видно, что при $U_{\text{н1}} = U_{\text{н2}}$ ослабление стремится к бесконечности: теоретически наводка может быть полностью подавлена, что невозможно на практике. Чем сильнее нарушена симметрия в механизме передачи наводки, тем меньше будет величина $K_{\text{осл.н}}$.

Широкое применение **электростатических экранов** для подавления емкостной наводки обусловлено их простотой: не требуется, чтобы эти экраны были обязательно сплошными.

Пусть между проводниками А и Б, входящими в цепи источника и приёмника наводки, имеется еще один проводник Э (экранный), причем последний соединен с общей шиной через сопротивление Z_3 (рис.4.5).

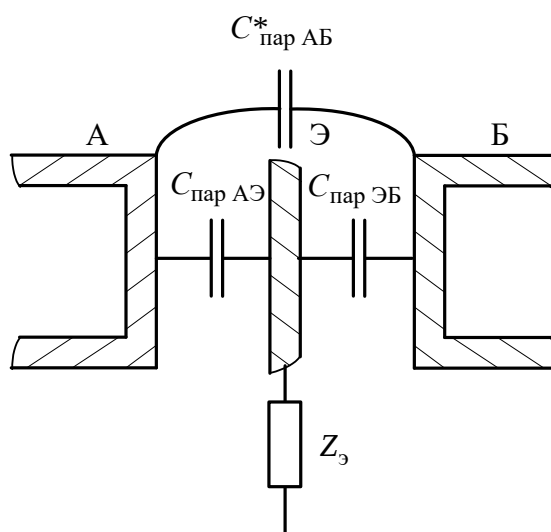


Рис.4.5 — К пояснению действия электростатического экрана в виде печатного проводника

При $Z_3 \rightarrow \infty$ (холостой ход для экранного проводника) паразитная ёмкость между А и Б $C_{\text{пар.хх}}$ равна

$$C_{\text{пар.хх}} = \frac{C_{\text{пар.АЭ}} \cdot C_{\text{пар.БЭ}}}{C_{\text{пар.АЭ}} + C_{\text{пар.БЭ}}} + C_{\text{пар.АБ}}^*,$$

где $C_{\text{пар.АЭ}}$, $C_{\text{пар.БЭ}}$ — паразитные емкости между проводниками А—Э, Э—Б, соответственно;

$C_{\text{пар.АБ}}^*$ — остаточная паразитная емкость между проводниками А—Б.

При $Z_3=0$ (короткое замыкание экранного проводника на общую шину) напряжение на проводнике Э равно нулю, поэтому передачу наводки по пути А—Э, Э—Б можно не учитывать. Наводка передаётся только через $C_{\text{пар.АБ}}^*$, следовательно

$$C_{\text{пар.кз}} = C_{\text{пар.АБ}}^*.$$

Значения $C_{\text{пар.АЭ}}$, $C_{\text{пар.БЭ}}$ можно определить по методике, описанной выше для пары проводников. Величину $C_{\text{пар.АБ}}^*$ расчётным путем оценить практически невозможно, так что эффективность экранирования следует определять по экспериментальным данным.

Гальваническая развязка обеспечивает снижение чувствительности цепей передачи сигнала к взаимоиндуктивной наводке.

При передаче сигнала от источника ИС с ЭДС E_c , расположенного в экранированном корпусе, к нагрузке Z_n внутри корпуса получателя сигнала ПС по двухжильному или экранированному кабелю обратный ток в оплётке кабеля $I'_{\text{обр}}$ не будет равен прямому току $I_{\text{пр}}$, так как часть обратного тока $I''_{\text{обр}}$ замыкается по цепи защитного заземления, следовательно, магнитное поле прямого тока $H_{\text{пр}}$ не будет полностью компенсироваться магнитным полем обратного тока $H'_{\text{обр}}$ (рис. 4.6).

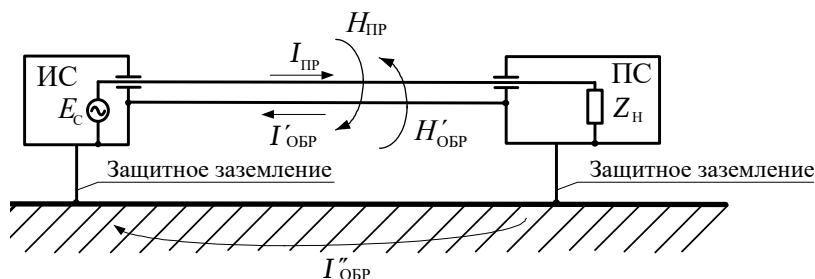


Рис. 4.6 — Схема цепи передачи сигнала между двумя экранированными устройствами

Компенсация магнитных полей прямого и обратного токов может быть обеспечена при следующих условиях:

- для обратного тока применяется специальный провод, не соединённый с корпусом устройства-приёмника сигнала;
- в устройстве-приёмнике сигнала нагрузка Z_n соединена с сигнальной линией через устройство гальванической развязки (УГР), которое обеспечивает передачу сигнала со своего входа на выход без гальванической связи между входными и выходными цепями (рис. 4.7).

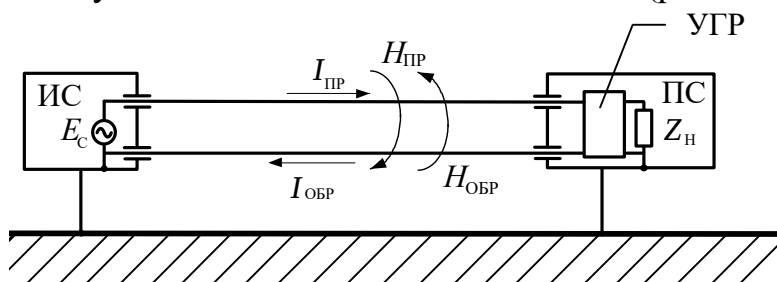


Рис. 4.7 — Схема передачи сигнала между двумя устройствами с применением устройства гальванической развязки

Эффективность применения гальванической развязки можно оценить только экспериментально.

4.2. Описание лабораторной установки и методики исследований

4.2.1. Лабораторная установка

Объект исследования $A1$ (печатная плата) с помощью разъёма $XP1$ соединяется с разъёмом $XS1$ лабораторного макета $A2$, который содержит:

- гнезда, подключенные к соответствующим контактам разъёма $XS1$;
- гнезда, подключенные к корпусу макета;
- гнезда, соединенные между собой попарно (свободные);
- трансформатор $T1$ с тремя обмотками, подключенными к соответствующим гнездам.

К гнездам могут быть подключены перемычки и кабели следующих приборов:

- генератора сигналов $A3$;

- дифференциального усилителя $A4$ с прямым входом A и инверсным входом B , причём параллельно входам подключены нагрузочные резисторы $R1$, $R2$ по 50 Ом ;
- вольтметра $A5$, подключённого к выходу усилителя (рис. 4.8).

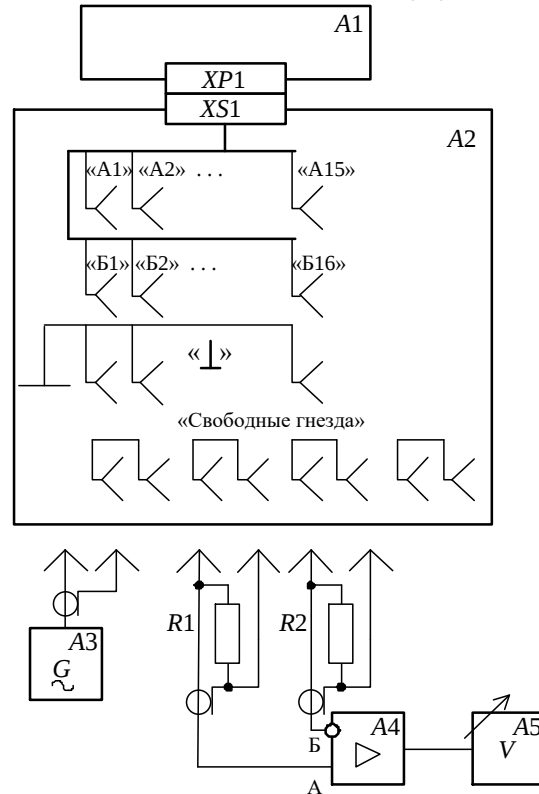


Рис.4.8 — Структурная схема лабораторной установки

Приборы имеют следующие особенности.

1) Генератор сигналов $A3$ имеет внутреннее сопротивление $R_i=50\text{ Ом}$; выход прибора выдерживает короткое замыкание на корпус.

2) Дифференциальный усилитель $A4$ имеет калиброванный переключаемый коэффициент усиления от 1 до 1000. Переключателем могут быть выбраны следующие режимы усиления: «Вход A »; «Вход B »; « $A-B$ » (вычитание сигналов по входам A и B). Входное сопротивление усилителя — не менее 1 МОм , входная емкость — не более 40 пФ . Полоса рабочих частот усилителя — регулируемая; в данной работе используется режим широкой (максимальной) полосы.

3) Вольтметр переменного тока $A5$ — широкополосный. Имеет максимальную чувствительность 1 мВ на шкалу, однако из-за высокого уровня собственных шумов не рекомендуется устанавливать чувствительность выше 10 мВ на шкалу. Пределы отклонения стрелки прибора нужно поддерживать, изменяя ступенчато усиление усилителя $A4$. При этом результаты измерений должны пересчитываться с учетом установленного коэффициента усиления.

Для повышения точности измерений между входами усилителя $A4$ и сигнальными кабелями включены переходные устройства, содержащие высокоча-

стотные резисторы $R1$ и $R2$ номиналами по 50 Ом. Этим обеспечивается выполнение следующих условий:

- входное сопротивление приемника наводки можно считать чисто активным: $Z_{вх} = R_{вх}$;
- реактивное сопротивление паразитных емкостей много больше входного сопротивления приемника наводки: $(\omega_{пар} C_{пар})^{-1} \gg R_{вх}$;
- контурное сопротивление приемника наводки пренебрежимо мало по сравнению со входным сопротивлением: $|Z_k| \ll R_{вх}$.

4.2.2. Методика исследований

1. Перед измерениями необходимо проверить и при необходимости выполнить настройку приборов:

- шкала вольтметра — 10 В;
- коэффициент усиления усилителя — «1»,
- источник сигнала усилителя — «Вход А»;
- полоса рабочих частот усилителя — широкая (символ «»);
- частота сигнала — согласно заданию;
- напряжение на выходе генератора, подключённом к нагрузочному резистору номиналом 50 Ом — 5 В.

При измерении уровня сигнала необходимо выход генератора через сигнальный штекер кабеля подключить к одному из свободных (попарно соединенных между собой) гнезд макета; а ко второму гнезду подключить вход А усилителя через кабель с нагрузочным резистором. Так как внутреннее сопротивление генератора равно сопротивлению нагрузочного резистора, измеренное напряжение на выходе генератора равно половине величины ЭДС.

Экранные оплётки кабелей, кроме специально оговоренных случаев, должны быть подключены штекерами к общей шине пульта через соответствующие гнезда.

2. Измерения **емкостного паразитного сигнала** проводят по следующей методике:

- к гнезду, соединённому с одним концом первого исследуемого проводника (приложение А), подключают сигнальный штекер кабеля от генератора (второй конец этого проводника остается в режиме **холостого хода**);
- вход А усилителя подключают через гнездо к одному из концов второго исследуемого проводника (второй конец этого проводника остается в режиме холостого хода);
- подбирают подходящую шкалу вольтметра и, при необходимости, коэффициент усиления усилителя: стрелка прибора должна отклоняться не менее, чем на треть шкалы.

При измерении «собственного» паразитного сигнала макета исследуемую плату вынимают из разъёма пульта.

3. Измерения **взаимоиндуктивного паразитного сигнала** выполняют по следующей методике:

- к гнезду, соединённому с одним концом первого исследуемого проводника (приложение А), подключают сигнальный штекер кабеля от генератора, а второй конец этого проводника через гнездо соединяют перемычкой к общей шине пульта (режим **короткого замыкания**);
- вход А усилителя подключают через гнездо к одному из концов второго исследуемого проводника, а второй конец этого проводника через гнездо соединяют перемычкой к общей шине пульта (режим **короткого замыкания**);
- подбирают подходящую шкалу вольтметра и, при необходимости, коэффициент усиления усилителя: стрелка прибора должна отклоняться не менее, чем на треть шкалы.

При измерении «собственного» паразитного сигнала макета сигнальный штекер кабеля от генератора подключают к одному из гнезд общей шины так, чтобы расстояние между обоими штекерами этого кабеля было примерно равно длине исследуемых проводников. Плату при этом **нельзя вынимать** из разъёма.

4. Оценку эффективности **электростатического экрана** проводят в системе из трёх проводников по следующей методике:

- проводят измерения ёмкостного паразитного сигнала между первым и третьим проводниками по приведённой выше методике (см. п. 2), когда второй (средний) проводник находится в режиме **холостого хода**;
- второй проводник с помощью перемычки соединяют с общей шиной (режим **короткого замыкания**) и проводят новое измерение ёмкостного паразитного сигнала между первым и третьим проводниками.

5. Исследование метода **симметризации сигнала** проводят в системе из трёх проводников по следующей методике:

- подключить сигнальный штекер кабеля генератора к одному концу первого проводника, вход «А» усилителя — к концу второго проводника, вход «Б» усилителя — к концу третьего проводника (рис. 4.9 а);
- измерить напряжения наводок в трёх режимах усиления: «Вход А», «Вход Б», «А–Б»;
- переключить кабель генератора на конец второго (среднего) проводника, а вход «А» усилителя — на конец первого проводника (рис. 4.9 б);
- измерить напряжения наводок в режимах «Вход А», «Вход Б», «А–Б».

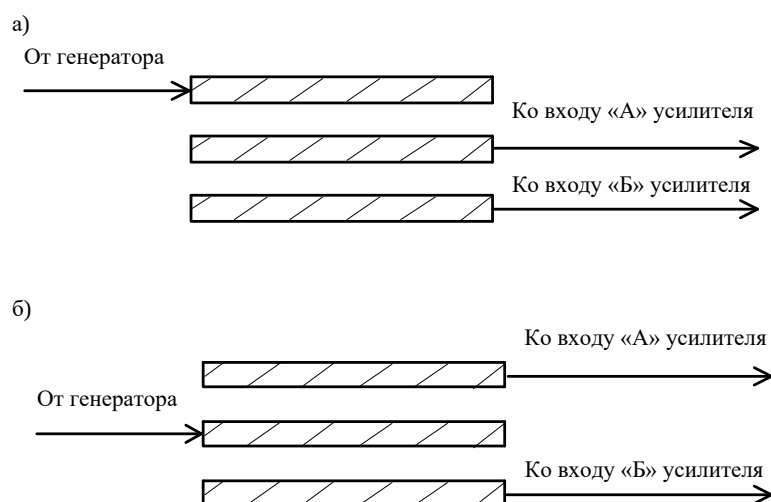


Рис.4.9 — Схемы измерений при исследовании метода симметризации для емкостной наводки

Примечание. При измерении подавления **емкостной наводки** вторые концы проводников должны быть в режиме холостого хода (см. рис. 4.9), а при измерении подавления **взаимоиндуктивной наводки** — соединены перемычками с общей шиной.

6. Исследования эффективности **гальванической развязки** проводят в системе из трёх проводников по следующей методике:

- собрать измерительную схему без гальванической развязки (рис. 4.10 а), измерить напряжение наводки;
- «нулевой» штекер кабеля генератора переключить к одному концу свободного проводника 3, второй конец которого перемычкой подключить ко второму концу среднего проводника 2 (рис. 4.10 б), измерить напряжение наводки в цепи без гальванической связи корпуса генератора с корпусами остальных приборов.

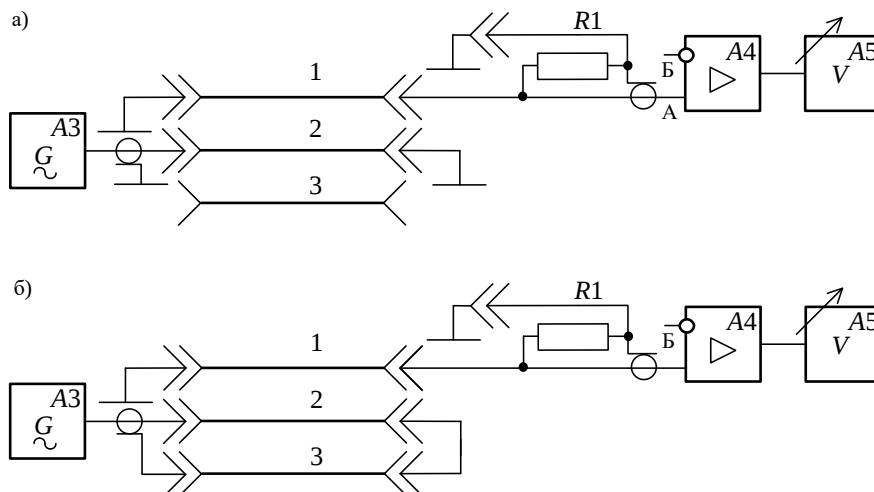


Рис. 4.10 — Схемы измерений при исследовании гальванической развязки

4.3. Задание на лабораторную работу

4.3.1. Задание к предварительным расчётам

1. Выполнить расчёт зависимости коэффициента передачи емкостной наводки K_n на указанной частоте между заданными парами проводников (таблица 4.1) от параметра, определяемого видом платы (приложение А.4). Результаты расчёта свести в таблицу по форме таблицы 4.2 и отобразить на графике.

Примечание. Если плата содержит тройки проводников, то расчёт выполняется для **одной пары** из каждой тройки.

Таблица 4.1 — Варианты заданий к расчёту зависимости K_n

№ варианта	1	2	3	4	5
№ платы	327-1	327-2	327-1	328-2	328-1
Частота, кГц	30	35	40	30	40

Таблица 4.2 — Результаты расчёта коэффициента передачи емкостной наводки (пример оформления)

Плата №327, $f = \dots$ кГц							
Пары пров.	$L_{св}$, см	S , мм	t , мм	S/t	K_n , пФ/см	$C_{пар}$, пФ	$K_n \cdot 10^{-4}$
1 – 2	35	0,95	0,3	...	...	...	...
4 – 5	35	0,8	0,45	...	...	...	...
7 – 8	35	0,45	0,8	...	...	...	...
...	..	...	...	...	...	...	...
...	..	...	...	...	...	...	...

2. Для одной пары проводников из заданной системы рассчитать значения K_n на всех заданных частотах (таблица 4.3). Результаты расчёта отобразить на графике.

Таблица 4.3 — Варианты заданий для расчёта K_n пары проводников

№ варианта	1	2	3	4	5
№ платы	327-1	327-2	327-1	327-1	327-2
Система проводников	4–5–6	7–8–9	13–14–15	1–2–3	4–5–6
Частоты, кГц	15, 30, 60	20, 35, 60	20, 40, 60	15, 30, 60	20, 40, 60

3. Оценить ожидаемую эффективность применения симметричных сигналов для двух случаев подключения источника наводки:

- к крайнему проводнику;
- к среднему проводнику.

Если обозначить крайние проводники номерами 1 и 3, а средний — 2, то коэффициенты ослабления наводки для этих случаев $N'_{осл.н}$, $N''_{осл.н}$ можно рассчитать по формулам

$$N'_{\text{осл.н}} = 20 \lg \frac{K_{\text{н12}}}{|K_{\text{н12}} - K_{\text{н13}}|}; N''_{\text{осл.н}} = 20 \lg \frac{K_{\text{н12}}}{|K_{\text{н12}} - K_{\text{н23}}|}, \quad (4.11)$$

где $K_{\text{н12}}, K_{\text{н23}}, K_{\text{н13}}$ — коэффициенты передачи наводки между проводниками 1 и 2, 2 и 3 (крайним и средним), 1 и 3 (крайними), соответственно.

Примечание. При расчёте $K_{\text{н13}}$ для емкостной наводки следует полагать, что паразитные емкости C_{12} и C_{23} одинаковы и включены последовательно. Для взаимоиндуктивной наводки величину $M_{\text{пар13}}$ можно рассчитать, полагая расстояние между проводниками 1 и 3 равным $2S$.

4. Выполнить расчёт зависимости коэффициента передачи взаимоиндуктивной наводки $K_{\text{н}}$ на указанной частоте между заданными парами проводников (табл. 4.1) от параметра, определяемого видом платы (приложение А.4). Результаты расчёта свести в таблицу по форме таблицы 4.4 и отобразить на графике.

Таблица 4.4 — Результаты расчёта коэффициента передачи взаимоиндуктивной наводки (*пример оформления*)

Плата № 327, $f = \dots$ кГц

Пары пров.	$L_{\text{св}}$, см	S , мм	t , мм	S/t	$M_{\text{пар}}$, нГн	$K_{\text{н}} \cdot 10^{-4}$
1 – 2	35	0,95	0,3	...	...	...
4 – 5	35	0,8	0,45	...	...	...
7 – 8	35	0,45	0,8	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

5. Для одной пары проводников из заданной системы рассчитать $K_{\text{н}}$ на всех заданных частотах (табл. 4.3). Результаты расчёта отобразить на графике.

6. Оценить ожидаемую эффективность применения симметричных сигналов для подавления взаимоиндуктивной наводки по формулам (4.11).

4.3.2. Задание к экспериментальным исследованиям

1. Выполнить измерения напряжения емкостной наводки для условий расчёта по п.1 задания в подразделе 4.3.1. Найти экспериментальные значения $K_{\text{нэ}}$. Результаты свести в таблицу по типу таблицы 4.5, куда также перенести расчётные значения $K_{\text{нр}}$. Определить относительные отклонения d экспериментальных значений от расчётных

$$d = \frac{|K_{\text{нэ}} - K_{\text{нр}}|}{K_{\text{нр}}} 100 \, \%.$$

Таблица 4.5 — Результаты расчёта и эксперимента для емкостной наводки

Плата № 327, $f = \dots$ кГц, $E_{\text{ин}} = 10$ В.

№ пров.	S/t	$U_{\text{нм}},$ мВ	$U_{\text{м}},$ мВ	$U_{\text{н}},$ мВ	$K_{\text{нз}} \cdot 10^{-4}$	$K_{\text{нр}} \cdot 10^{-4}$	d
1 – 2	...	1,2	0,2	1,0	1,0	0,89	12 %
4 – 5	...	...	...	...	...	...	...

В таблице 4.5 приняты следующие обозначения:

- $U_{\text{нм}}$ — измеренное напряжение наводки;
- $U_{\text{м}}$ — напряжение наводки для макета без платы;
- $U_{\text{н}}$ — уточненное напряжение наводки с учетом качества макета

$$U_{\text{н}} = U_{\text{нм}} - U_{\text{м}}.$$

Экспериментальные значения $K_{\text{н}}$ для исследуемой зависимости нанести на расчётный график.

2. Измерить напряжения наводки и определить $K_{\text{н}}$ на всех заданных частотах для одной пары проводников заданной системы (см. п. 2 подраздела 4.3.1).

Экспериментальные значения $K_{\text{н}}$ отобразить на расчётном графике.

3. Оценить эффективность использования среднего проводника заданной системы в качестве электростатического экрана на средней частоте.

Формула для расчёта коэффициента ослабления наводки $N_{\text{осл.н}}$ (4.10) в данном случае имеет вид

$$N_{\text{осл.н}} = 20 \lg \frac{U_{\text{н хх}}}{U_{\text{н кз}}},$$

где $U_{\text{нхх}}$, $U_{\text{нкз}}$ — напряжения наводки между крайними проводниками при холостом ходе и коротком замыкании среднего проводника, соответственно.

4. Экспериментально оценить эффективность применения симметричных сигналов для подавления емкостной наводки в заданной системе проводников (п. 3 подраздела 4.3.1).

Для этого выполнить необходимые измерения по методике, описанной в подразделе 4.2.2 и расчёты по формулам (4.11). Результаты эксперимента и расчёта свести в таблицу по типу таблицы 4.6, рассчитав отклонения δ экспериментальных значений коэффициента подавления от расчётных в децибелах.

Таблица 4.6 — Данные к оценке эффективности подавления емкостной наводки при симметричных сигналах (*пример оформления*)

Плата № 327, $f = \dots$ кГц, $E_{\text{ин}} = 10$ В, система проводников 1–2–3

$E_{\text{ин}}$ подкл. к пров.	$U_{\text{А}},$ мВ	$U_{\text{Б}},$ мВ	$U_{\text{А-Б}},$ мВ	$N_{\text{осл.н}}$ эксперимент, дБ	$N_{\text{осл.н}}$ расчёт, дБ	$\delta,$ дБ
1	10	8	2	14	16	2
2	10	9	1	20	23	3

Примечание. Экспериментальное значение $N_{\text{осл.н}}$ можно рассчитать по формуле

$$N_{\text{осл.н}} = 20 \lg \frac{U_A}{U_{A-B}},$$

где U_A — измеренное напряжение наводки в режиме усиления «Вход А»;
 U_B — измеренное напряжение наводки в режиме усиления «Вход Б»;
 U_{A-B} — измеренное напряжение наводки в режиме усиления «А–Б».

5. Выполнить измерения напряжения взаимоиндуктивной наводки для условий расчёта по п.4 подраздела 4.3.1. Обработку данных произвести так же, как и для емкостной связи (см. п. 1 данного подраздела).

6. Измерить напряжения наводки и определить экспериментальные значения $K_{\text{нз}}$ на всех заданных частотах для одной пары проводников заданной системы (п. 5 подраздела 4.3.1). Эти значения отобразить на расчётном графике.

7. Оценить эффективность гальванической развязки для подавления взаимоиндуктивной наводки на средней частоте.

Формула (4.10) для расчёта коэффициента ослабления наводки $N_{\text{осл.н}}$ в данном случае она имеет вид

$$N_{\text{осл.н}} = 20 \lg \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{нр}}},$$

где $U_{\text{н}}$, $U_{\text{нр}}$ — напряжения наводки без развязки и с развязкой, соответственно.

8. Экспериментально оценить эффективность применения симметричных сигналов для подавления взаимоиндуктивной наводки. Обработку данных произвести так же, как и для емкостной связи (см. п. 4 данного подраздела).

4.4. Контрольные вопросы и задачи

- 1) При каких условиях может оказаться существенной емкостная паразитная связь?
- 2) При каких условиях проявляется связь через паразитную взаимную индуктивность?
- 3) На основании формулы (4.1) для напряжения емкостной наводки в эквивалентной схеме на рис. 4.1, вывести формулу для отношения напряжения сигнала U_c к напряжению наводки U_n на входе приемника сигнала и наводки.
- 4) На основании формулы (4.2) для напряжения взаимоиндуктивной наводки в эквивалентной схеме на рис. 4.3, вывести соотношение для отношения напряжения сигнала U_c к напряжению наводки U_n на входе приемника сигнала и наводки.

- 5) Как зависит напряжение емкостной наводки от внутреннего сопротивления источника сигнала?
- 6) Как зависит напряжение взаимоиндуктивной наводки от внутреннего сопротивления источника сигнала при ненулевом и при нулевом значении контурного сопротивления Z_k ?
- 7) За счет чего достигается подавление наводки в схемах с симметричными сигналами?
- 8) Для какой цели применяется гальваническая развязка между различными устройствами (показать с привлечением эквивалентных схем) и какими средствами её можно технически реализовать?
- 9) Какие практические рекомендации при использовании метода симметризации сигналов можно предложить для конструирования узлов на печатном монтаже?
- 10) Может ли паразитная емкость $C_{\text{пар}АЭБ}$ в системе из трёх проводников (А, Б, Э) превысить величину $C_{\text{пар}АБ}$ — емкость связи между А и Б в случае, когда проводник Э отсутствует, а расстояние между проводниками А и Б сохраняется (рис. 4.11)?

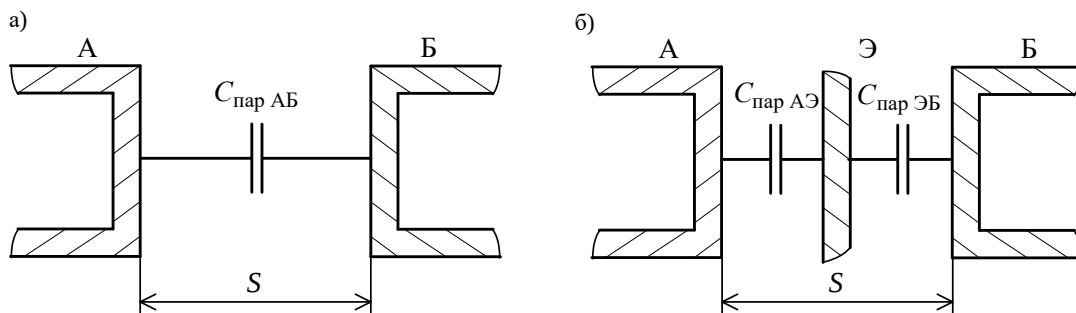


Рис. 4.11 — Схемы к задаче 10

- 11) Какие конструктивные требования накладываются на форму, размеры и способ соединения экранного проводника с корпусом? Возможно ли соединение с корпусом через конденсатор? Возможно ли соединение с корпусом через индуктивность?
- 12) Как влияют на точность измерений резисторы $R1$ и $R2$ номиналами по 50 Ом в переходных устройствах к усилителю?
- 13) При каких условиях возможно уточнение результатов измерения путем вычитания из измеренного напряжения наводки уровня «собственного» паразитного сигнала макета?

Приложение А.4.
Данные об объектах исследования

Платы размерами 140x150 мм выполнены на стеклотекстолитовой основе толщиной 1,5 мм. Нумерация плат: 121Э-[№], где № — заводской номер платы.

Таблица А.1 — Параметры печатных проводников

№ платы	№ пров.	№ конт.		t, мм	Связь с проводником				Примечания
		нач.	кон.		№ пров.	l _{св} , мм	S, мм	конфиг.	
327-1	1	Б1	Б5	0,3	1—2	357	0,95	Рис. 4.2 а	1. Проводники на одной стороне платы. 2. Зависимость от отношения S/t
	2	А1	А4	0,3					
	3	Б2	Б4	0,3	2—3	353	0,95		
	4	Б7	Б11	0,45	4—5	360	0,8		
	5	А7	А10	0,45					
	6	Б8	Б10	0,45	5—6	355	0,8		
	7	Б12	Б16	0,8	7—8	357	0,45		
	8	А12	А15	0,8					
	9	Б13	Б15	0,8	8—9	353	0,45		
	10	А14	А8	0,8	10—11	354	0,23		
	11	Б14	Б9	1,25					
	12	А13	А9	0,8	11—12	347	0,23		
	13	А6	А2	1,0	13—14	344	0,25		
	14	Б6	Б3	1,0					
	15	А5	А3	1,0	14—15	338	0,25		
327-2	1	Б16	Б12	0,3	1—2	332	0,95	Рис. 4.2 а	1. Проводники на одной стороне платы. 2. Зависимость от отношения S/t
	2	А15	А12	0,3					
	3	Б15	Б13	0,3	2—3	324	0,95		
	4	Б10	Б6	0,45	4—5	319	0,8		
	5	А9	А6	0,45					
	6	Б9	Б7	0,45	5—6	311	0,8		
	7	Б5	Б1	0,8	7—8	313	0,45		
	8	А4	А1	0,8					
	9	Б4	Б2	0,8	8—9	303	0,45		
	10	А2	А8	0,8	10—11	325	0,23		
	11	Б3	Б8	1,25					
	12	А3	А7	0,8	11—12	317	0,23		
	13	А10	А14	1,0	13—14	325	0,25		
	14	Б11	Б14	1,0					
	15	А11	А13	1,0	14—15	317	0,25		

№ платы	№ пров.	№ конт.		t, мм	Связь с проводником				Примечания
		нач.	кон.		№ пров.	l _{св} , мм	S, мм	конфиг.	
328-1	1	Б1	Б2	0,3	1 – 2	340	1,5	Рис. 4.2 в	1. Проводни- ки по разные стороны пла- ты. 2.Зависимость от ширины проводника. 2.Зависимость от ширины проводника.
	2	А1	А2	0,3					
	3	Б3	Б4	0,45	3 – 4	317	1,5		
	4	А3	А4	0,45					
	5	А5	А6	0,6	5 – 6	293	1,5		
	6	Б5	Б6	0,6					
	7	А7	А8	0,8	7 – 8	284	1,5		
8	Б7	Б8	0,8						
328-1	9	Б11	Б12	1,25	9 – 10	304	1,5		
	10	А10	А11	1,25					
	11	Б13	Б14	2,5	11 – 12	329	1,5		
	12	А12	А13	2,5					
	13	Б15	Б16	0,3	13 – 14	340	1,5		
	14	А14	А15	0,3					
	328-2	1	Б15	Б16	0,3	1 – 2	315		
2		А15	А14	0,3					
3		Б13	Б14	0,45	3 – 4	312	1,5		
4		А12	А13	0,45					
5		Б11	Б12	0,6	5 – 6	317	1,5		
6		А10	А11	0,6					
7		Б9	Б10	0,8	7 – 8	305	1,5		
8	А8	А9	0,8						
328-2	9	Б5	Б6	1,25	9 – 10	330	1,5		
	10	А4	А5	1,25					
	11	Б3	Б4	0,3	11 – 12	310	1,5		
	12	А2	А3	0,3					

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ОТ ВИБРАЦИОННЫХ УСКОРЕНИЙ

Цель работы: освоить методики выбора параметров и экспериментального анализа системы амортизации радиоэлектронного блока.

5.1. Теоретические сведения

5.1.1. Постановка задач

Вибрацией называют длительные, периодические механические воздействия, которые возникают на объектах-носителях РЭС при работе механизмов, двигателей и других машин.

Действие вибрации состоит в возникновении сил инерции, пропорциональных, согласно второму закону Ньютона, ускорениям. Эти силы действуют на отдельные элементы конструкции РЭС и могут привести:

- непосредственно к поломкам;
- к накоплению усталостных напряжений, снижающих механическую прочность и приводящих к поломкам в результате длительной эксплуатации;
- к электромагнитным эффектам, вызывающим помехи и искажения сигналов.

Обеспечить **механическую прочность** РЭС — это значит создать такую конструкцию, чтобы изделие не разрушалось под действием вибрации на протяжении всего срока службы. Задача обеспечения РЭС **устойчивости к механическим воздействиям** связана с возможностью для РЭС выполнять свои функции во время действия вибрации.

Параметрами вибрации являются:

- частота или спектр частот, если форма колебаний не синусоидальна;
- амплитуда виброперемещения A ;
- амплитуда виброускорения a .

В первом приближении рассматривают **основную частоту** вибрации — частоту первой гармоники f_1 . При более точном анализе учитывают действие вибрации на каждой из высших частот спектра $f_i (i = 2, 3 \dots m)$

$$f_i = i f_1.$$

Количество гармоник m выбирают с учётом требуемой точности расчётов. На каждой частоте оценивают амплитуды виброперемещений A_i и амплитуды виброускорений a_i .

Изготовитель электрорадиоизделий (ЭРИ) устанавливает допуск на виброускорение ЭРИ данного типа. Конструктор РЭС должен определить максимально допустимое виброускорение для данного изделия $a_{\text{доп}}$ с учетом прочности (допуска на ускорение) наименее прочного ЭРИ и способа его закрепления. Данная задача решается путем как теоретических, так и экспериментальных исследований.

В данной лабораторной работе рассматривается задача проектирования системы амортизации для РЭС в виде моноблока, которая ставится следующим образом.

1) Закрепление элементов внутри блока предполагается достаточно жестким: блок рассматривается как тело массой M , сосредоточенной в центре масс (Ц. М.), причем расположение Ц. М. известно.

2) Масса основания, на котором закреплен блок, много больше массы блока M .

3) Известны частоты гармоник вибрации f_i и амплитуды виброперемещений основания на этих частотах $A_{\text{осн},i}$.

4) Известны условия эксплуатации изделия: диапазон рабочих температур $T_{\min}, T_{\max}$; количество и места расположения амортизаторов.

Для наиболее неблагоприятного сочетания факторов необходимо обеспечить выполнение условия

$$a_6 \leq a_{\text{доп}},$$

где a_6 — амплитуда ускорения, действующего на блок.

Данная задача технически решается путем применения специальных элементов — **амортизаторов**, обеспечивающих упругую связь блока с основанием. Эффект снижения величины a_6 относительно ускорения основания $a_{\text{осн}}$ достигается динамически, благодаря ограниченной полосе пропускания механической колебательной системы. Методика проектирования сводится к предварительному выбору амортизаторов на основе расчётов и справочных данных [9, 10] и экспериментальной проверке достигнутого результата.

5.1.2. Анализ механической колебательной системы

Механическую колебательную систему составляют:

- основание — источник колебаний;
- блок;
- упругий элемент с вязким трением.

Масса основания много больше массы блока M , поэтому источником возникающих динамических сил являются синусоидальные колебания основания на частоте f с амплитудой $A_{\text{осн}}$. Блок имеет одну степень свободы для поступательных перемещений, то есть одну координату z , вдоль которой возможны колебания с амплитудой A_6 (рис. 5.1).

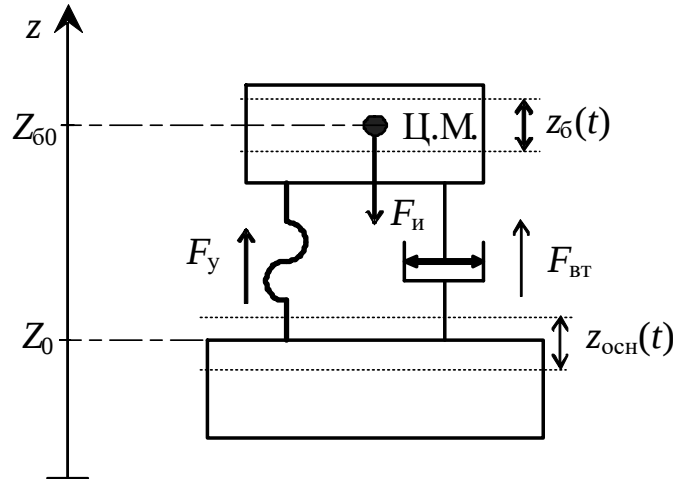


Рис. 5.1 — Механическая схема замещения системы амортизации

Среднее положение основания Z_0 несущественно. Среднее положение Ц. М. Z_{60} определяется размерами тела, высотой и статическим прогибом амортизаторов, обусловленным весом тела G

$$G = Mg ,$$

где $g=9,8 \approx 10$ м/с² — ускорение свободного падения.

Значения Z_{60} и G при анализе колебаний также несущественны. Рассматриваются (см. рис. 5.1):

- перемещения основания $z_{очн}(t)$ и блока $z_б(t)$ относительно их средних положений, причём

$$z_{очн}(t) = A_{очн} \sin \omega t = A_{очн} \sin 2\pi f t;$$

- динамическая сила упругости $F_y(t)$

$$F_y(t) = k_z [z_{очн}(t) - z_б(t)],$$

где k_z — коэффициент жесткости, Н/м;

- сила вязкого трения $F_{вт}(t)$:

$$F_{вт}(t) = \beta \left[\frac{dz_{очн}(t)}{dt} - \frac{dz_б(t)}{dt} \right],$$

где β — коэффициент вязкого трения, Н·с/м;

- сила инерции $F_и(t)$:

$$F_и(t) = -m \frac{dz_б^2(t)}{dt^2}.$$

Уравнение колебаний получаем из условия баланса сил

$$F_и(t) + F_y(t) + F_{вт}(t) = 0,$$

откуда

$$m \frac{dz_б^2(t)}{dt^2} + \beta \left[\frac{dz_{очн}(t)}{dt} - \frac{dz_б(t)}{dt} \right] + k_z [z_{очн}(t) - z_б(t)] = 0. \quad (5.1)$$

Решение уравнения (5.1) для установившихся колебаний имеет вид

$$\eta_v = \frac{A_{\bar{v}}}{A_{\text{осн}}} = \sqrt{\frac{1 + 4D^2 v^2}{(1 - v^2)^2 + 4D^2 v^2}}, \quad (5.2)$$

где $v = \omega/\omega_0 = f/f_0$ — относительная частота;

f_0 — собственная частота механической колебательной системы;

$D = \beta/\beta_{\text{кр}}$ — коэффициент демпфирования;

$\beta_{\text{кр}}$ — критическое значение коэффициента трения, при котором переходной процесс становится аperiodическим.

Величина η_v называется **коэффициентом динамичности** системы, а для значений, меньших единицы, её принято называть **коэффициентом виброизоляции**. Выражение (5.2) аналогично амплитудно-частотной характеристике фильтра нижних частот второго порядка с одним полюсом (рис. 5.2).

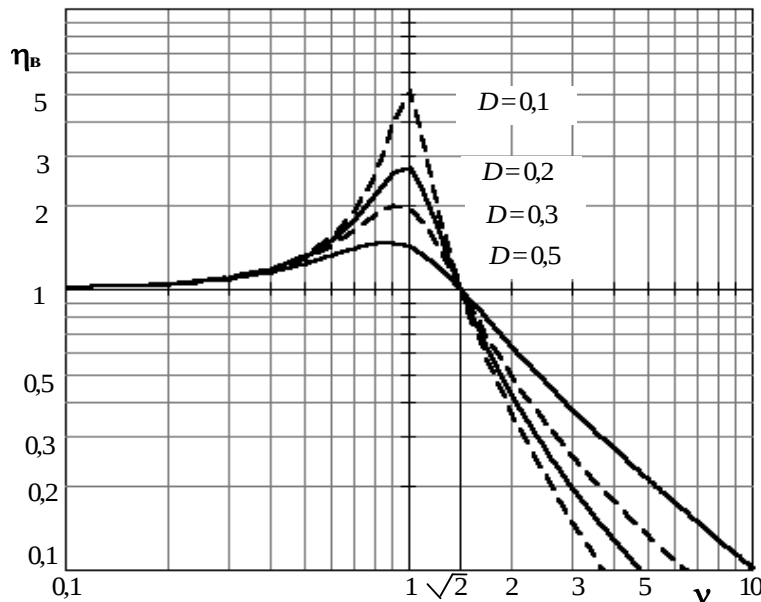


Рис.5.2 — Зависимости коэффициента динамичности от частоты вибрации при различных значениях коэффициента демпфирования

5.1.3. Методика выбора системы амортизации

1) Определяем амплитуды виброускорения основания для частоты первой гармоники и для характерных частот (для синусоидальной вибрации — только основной частоты)

$$a_{\text{осн},i} = (2\pi f_i)^2 A_{\text{осн},i}.$$

Для дальнейшего расчёта выбираем одно значение $a_{\text{осн}}$, соответствующее наихудшему случаю.

2) Определяем требуемое значение коэффициента виброизоляции η_v

$$\eta_v \leq \frac{a_{\text{доп}}}{a_{\text{осн}}}.$$

3) Исходя из условий эксплуатации, предварительно выбираем тип амортизатора ([1], см. также приложение А.5).

Тип амортизатора определяет его основные конструктивные характеристики, например, АД — «Амортизатор демпфированный». Выбрать конкретный типоразмер, то есть конкретную строку в справочной таблице, на данном этапе невозможно.

Наиболее неблагоприятными температурными условиями являются низкие температуры, так как с уменьшением температуры растет коэффициент демпфирования D , а качество амортизации снижается. Если в справочных данных нет значений D при требуемой минимальной температуре T_{min} , то нужное значение можно определить по имеющимся данным линейной интерполяцией: графически или по формуле

$$D = D_1 - \frac{D_1 - D_2}{T_2 - T_1} (T_{min} - T_1),$$

где D_1, D_2 — справочные значения коэффициентов демпфирования для низшей температуры T_1 и высшей температуры T_2 соответственно.

4) Решаем уравнение (5.2) для требуемого значения η_v относительно v численно или графически (см. рис. 5.2), используя «наихудшее» для выбранного типа амортизаторов значение D .

5) Определяем необходимое значение собственной частоты f_0 системы амортизации

$$f_0 = \frac{f}{v}.$$

Проверяем, соответствует ли это значение усредненным паспортным данным. При несоответствии подбираем другой тип амортизатора, заново выполняем п. 4,5.

6) Определяем статическую нагрузку на каждый амортизатор P_j ($j = 1, 2 \dots N_a$, где N_a — число амортизаторов).

В общем случае вес блока G складывается из веса корпуса G_k , который распределен между амортизаторами равномерно, и веса тяжелого элемента конструкции G_3 , центр масс которого смещен относительно центра симметрии:

$$G = G_k + G_3 = gM_k + gM_3,$$

где M_k — масса корпуса;

M_3 — масса тяжелого элемента;

g — ускорение свободного падения.

Нагрузки на амортизаторы также будут иметь по две составляющие

$$P_j = P_{jk} + P_{j3},$$

где P_{jk} — часть нагрузки, обусловленная весом корпуса;

P_{j3} — составляющая нагрузки, связанная с весом элемента.

В силу симметрии нагрузки P_{jk} будут одинаковыми

$$P_{jk} = \frac{G_k}{N_a}, \quad (5.3)$$

Центр масс (Ц. М.) тяжелого элемента смещен относительно центра симметрии (Ц. С.), как показано на рис. 5.3.

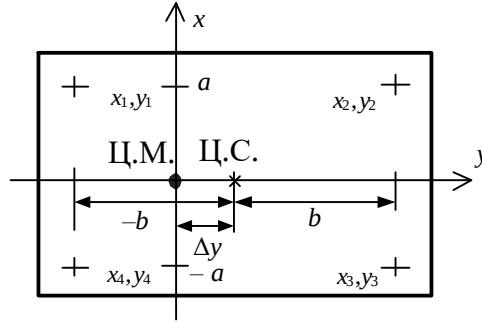


Рис. 5.3 — Схема расположения амортизаторов и центра масс при смещении по одной оси

Составляющие P_{jy} распределяются согласно «правилу рычага» — условию баланса моментов сил

$$\begin{aligned} P_{1y} + P_{2y} + P_{3y} + P_{4y} &= G_y; \\ P_{1y} x_1 + P_{2y} x_2 + P_{3y} x_3 + P_{4y} x_4 &= 0; \\ P_{1y} y_1 + P_{2y} y_2 + P_{3y} y_3 + P_{4y} y_4 &= 0, \end{aligned} \quad (5.4)$$

где x_j, y_j — координаты точек расположения амортизаторов относительно положения центра масс.

При сохранении частичной симметрии относительно оси y ($x_1 = x_2 = a$, $x_3 = x_4 = -a$), второе уравнение системы (5.4) становится тривиальным. Достаточно решить упрощенную систему уравнений

$$\begin{aligned} 2P_I + 2P_{II} &= G_y; \\ P_I y_I + P_{II} y_{II} &= 0, \end{aligned} \quad (5.5)$$

где $P_I = P_{1y} = P_{4y}$;

$P_{II} = P_{2y} = P_{3y}$;

$y_I = y_1 = y_4 = -(b - \Delta y)$;

$y_{II} = y_2 = y_3 = b + \Delta y$.

7) По справочным данным (приложение А.5) на выбранный тип амортизатора подбираем конкретные типоразмеры: расчётные нагрузки должны находиться примерно посередине допустимого диапазона.

8) Определяем статические прогибы амортизаторов $z_{j\text{ст}}$ (в миллиметрах):

$$z_{j\text{ст}} = \frac{P_j}{k_z},$$

где k_z — коэффициент жесткости амортизаторов данного типоразмера, Н/мм.

9) Определяем достигнутое значение собственной частоты системы амортизации $f_{0ам}$.

Для этого находим собственные частоты для отдельных амортизаторов f_{0j}

$$f_{0j} = 15,75 \sqrt{\frac{1}{z_{jст}}}.$$

В качестве $f_{0ам}$ принимаем среднее арифметическое значение этих частот.

10) Проверяем, обеспечивает ли выбранная система амортизации требуемую виброзащиту. Для этого подставляем найденное значение $f_{0ам}$ в формулу (5.2) или определяем достигнутое значение коэффициента виброизоляции $\eta_{ам}$ по графику (см. рис. 5.1).

Если достигнутое значение $\eta_{ам}$ меньше требуемого η_v или превышает требуемое значение не более чем на 30 %, то выбор считаем удовлетворительным. В противном случае, по возможности, подбираем другие типоразмеры амортизаторов и повторяем действия по п.7—10.

11) Сравниваем статические прогибы амортизаторов $z_{jст}$: если они различаются более, чем на 0,2 мм, то вводим в систему амортизации выравнивающие прокладки для предотвращения поперечных колебаний. При этом толщину прокладок выбираем равной разности статических прогибов.

5.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает:

- вибростенд типа СВ-2М;
- сменные шасси с амортизаторами и имитаторами нагрузок;
- электронный блок;
- два вольтметра переменного напряжения.

Схема расположения амортизаторов приведена на рис. 5.3.

Для всех шасси: $a = 45$ мм; $b = 70$ мм.

Остальные данные приводятся ниже.

Шасси № 1. Масса шасси $M_k = 0,15$ кг. Масса тяжелого элемента $M_3 = 0,92$ кг; смещение центра масс относительно центра симметрии $\Delta y = 10$ мм.

Шасси № 2. Масса шасси $M_k = 0,18$ кг. Масса тяжелого элемента $M_3 = 1,64$ кг; смещение центра масс относительно центра симметрии $\Delta y = 8$ мм.

Шасси № 3. $M_k = 1,15$ кг. Для крепления грузов предусмотрено 6 стоек, схема расположения которых приведена на рисунке 5.4. На каждую из стоек может быть надето до 3 грузов массой по 0,1 кг каждый. Грузы на стойке фиксируются гайкой.

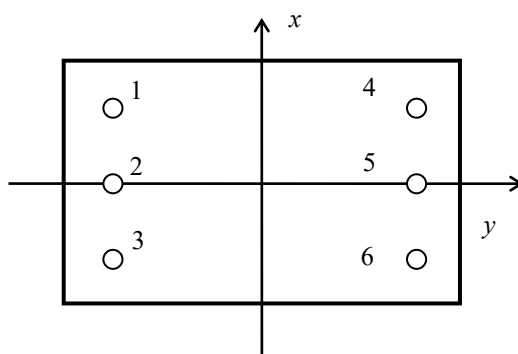


Рис. 5.4 — Расположение стоек для грузов на шасси № 3

Частота колебаний устанавливается с помощью потенциометра «Частота» вибростенда и контролируется встроенным измерителем на панели управления.

Для контроля амплитуды колебаний основания и объекта магнитные датчики. Амплитуда виброперемещений основания $A_{осн}$ и амплитуда колебаний объекта $A_{об}$ фиксируются по показаниям вольтметров:

100 мВ измеренного напряжения соответствуют 1 мм амплитуды.

5.3. Задание на лабораторную работу

5.3.1. Задание к предварительным расчётам

1. Для варианта задания, номер которого соответствует номеру бригады (таблица 5.1), выполнить выбор системы амортизации по методике, изложенной в п.5.1.3.

Таблица 5.1 — Исходные данные к выбору системы амортизации

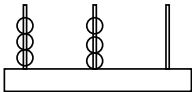
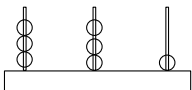
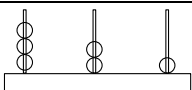
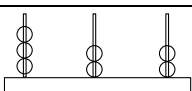
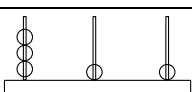
№ зад.	№ шасси	$T_{min},$ °C	$f,$ Гц	$A_{осн},$ мм	$a_{доп},$ м/с ²
1	2	0	16	1,2	3,4
2	2	–20	20	1,1	3,1
3	2	0	24	1	3,5
4	2	–20	28	0,8	3,2
5	2	0	22	1	3,6

Построить в логарифмическом масштабе **два графика** зависимости коэффициента виброизоляции η_v от относительной частоты $\nu = \frac{f}{f_0}$ (варьировать величину ν в пределах от 0 до 5):

- при минимальной (по заданию) температуре окружающей среды;
- при температуре окружающей среды 20 °C.

2. Для шасси № 3, системы амортизации из 4 амортизаторов типа АПН-1 и заданного числа грузов (таблица 5.2), найти собственную частоту системы при равномерном распределении нагрузки.

Таблица 5.2 — Данные к размещению нагрузок на шасси № 3

№ зад.	Число грузов	Схема нагрузок	Примечание
1	12		Остальные грузы размещать симметрично относительно второй оси.
2	14		
3	12		
4	14		
5	10		

Построить в логарифмическом масштабе график зависимости коэффициента виброизоляции η_v от относительной частоты $\nu = f/f_0$ (варьировать величину ν в пределах от 0 до 5) для лабораторных условий.

5.3.2. Задание к экспериментальным исследованиям

1. Выполнить экспериментальное исследование системы амортизации, выбранной в п.1 расчётного задания (подраздел 5.3.1).

Для этого измерить амплитуды виброперемещений основания и объекта в пяти-шести точках:

- на резонансной частоте;
- в одной-двух точках на частотах ниже резонансной;
- на такой частоте, для которой достигается равенство амплитуд виброперемещений основания и объекта;
- в двух-трёх точках на частотах выше резонансной, до 35 Гц.

Результаты занести в таблицу по типу таблицы 5.3 и нанести на расчётные графики.

Таблица 5.3 — Результаты эксперимента для шасси № 2 (пример оформления)

Частота, Гц	$A_{\text{осн}},$ мм	$A_{\text{б}},$ мм	ν	η_v	Примечания
8	1	1,5	0,8	1,5	
10	1	3	1	3	Резонанс
14	1	1	1,4	1	
...					

2. Выполнить экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициента виброизоляции для шасси № 3 при равномерном и неравномерном распределении нагрузок на амортизаторы (см. табл. 5.2).

Результаты занести в таблицу по типу таблицы 5.3 и нанести на расчётные графики.

5.4. Контрольные вопросы и задачи

- 1) Какие механические воздействия относятся к вибрационным?
- 2) Какие свойства РЭС называются «механической прочностью» и «устойчивостью к механическим воздействиям»?
- 3) Какими параметрами характеризуют вибрационные воздействия? Для какого сочетания параметров ведется расчёт механической прочности?
- 4) Каков механизм действия вибрации на работоспособность РЭС?
- 5) Как устанавливают допуски на механическую прочность РЭС?
- 6) Как связаны амплитуда колебаний и амплитуда виброускорения при синусоидальной вибрации (привести формулу)?
- 7) Пусть вибрация имеет форму колебаний «меандр» (прямоугольные импульсы со скважностью, равной двум) с частотой $f = 100$ Гц, амплитудой $A = 1$ мм. Используя графики зависимости $\eta_v(f)$ для значений коэффициента демпфирования 0,1 и 0,5, обосновать выбор значения частоты, для которого условия выбора амортизаторов являются наиболее жесткими.

Примечание. Спектр колебаний типа «меандр» содержит только нечётные гармоники.

- 8) Предложите возможные варианты монтажа электролитического конденсатора с длинными выводами на плату при различной интенсивности вибрации.
- 9) Сравните эффективность системы амортизации при минимальной рабочей температуре (коэффициент демпфирования $D = 0,5$) и при нормальной температуре ($D = 0,1$). Чем будут отличаться стационарный режим вибрации и переходной режим (разгон объекта-носителя)?
- 10) Изобразите качественно зависимости коэффициента виброизоляции от частоты вибрации для случаев равномерного нагружения амортизаторов и неравномерного нагружения при одной и той же массе (рис. 5.5).

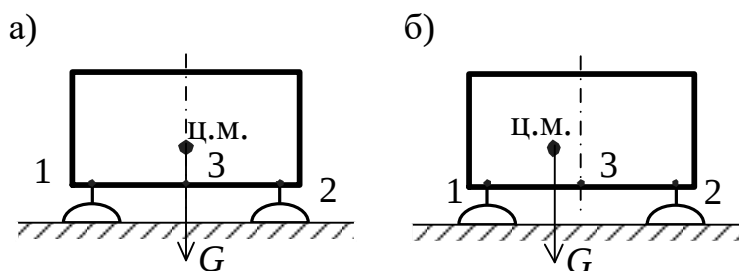


Рис. 5.5 — Схемы расположения амортизаторов и центра масс к задаче 10

Приложение А.5. Справочные данные амортизаторов

Ниже (табл. А.1) приведены данные следующих амортизаторов:

а) АП — резинометаллические, пластинчатые (допускают нагрузку только вдоль оси);

б) АД — пружинные с воздушным демпфированием (допускают нагрузку в продольном и поперечном направлениях);

в) АПН — пружинные с фрикционным демпфированием (допускают нагрузку в продольном и поперечном направлениях).

Таблица А.1 — Технические характеристики некоторых амортизаторов

Тип, типоразмер	Номинальная нагрузка, Н	Коэффициент жесткости, Н/мм	Коэффициент демпфирования	Среднее значение собств. частоты ¹⁾ , Гц	Диапазон рабочих температур, °C
АП-1-0,45	4,5	2,5	0,05	13	–60, +100
АП-1-1,8	18	11,5	при 20 °C;	13	
АП-2-2,7	27	17,2	0,1 при	13	
АП-2-4,5	45	28,6	–60 °C	12,5	
АП-3-9	90	28,6		12,5	
АД-1	3—6	1,2	0,1	10	–60, +70
АД-2	10—15	4	при 20 °C;	10	
АД-3	15—30	6,4	0,5 при	9	
АД-4	30—51	13	–60 °C	8	
АПН-1	5—10	6,8	0,5 ²⁾	16	–60, +150
АПН-2	10—25	13,7		16	
АПН-3	20—50	22,5		14	
АПН-4	40—70	32,5		14	
АПН-5	60—100	49		12	

Примечания.

1. Значения собственных частот даны для средних значений нагрузок из указанных пределов. Реализуемые в системах амортизации значения определяются степенью нагружения амортизаторов: соотношением между коэффициентами жесткости и значениями нагрузок.
2. Для амортизаторов типа АПН не может быть определен коэффициент демпфирования, так как в них потери возникают из-за сухого трения. Приведенное значение является эффективной величиной, справедливой только для средних значений амплитуд колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Учебно-методическое пособие по оформлению текстовых работ преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» [Электронный ресурс] / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2020. — 26 с.
2. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА / Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный.— М.: Сов. Радио, 1976.— 230 с.
3. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев.— М.: Высш. шк., 1984.— 248 с.
4. Зайдель, А. Н. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель.— Л.: Наука, 1985.— 112 с.
5. Яншин, А. А. Теоретические вопросы конструирования, технологии и надежности ЭВА / А. А. Яншин.— М.: Радио и связь, 1983.— 312 с.
6. Львович, Я. Е. Теоретические вопросы конструирования, технологии и надежности РЭА / Я. Е. Львович, В. Н. Фролов.— М.: Радио и связь, 1986.— 192 с.
7. Волин, М. Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М. Л. Волин.— М.: Радио и связь, 1981.— 296 с.
8. Горобец, А. И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры: печатные узлы / А. И. Горобец, А. И. Степаненко, В. М. Коронкевич.— Киев: Техника, 1985.— 312 с.
9. Гелль, П. П. Конструирование и микроминиатюризация РЭА / П. П. Гелль, Н. К. Иванов-Есипович.— Л.: Энергоатомиздат, 1984.— 536 с.
10. Токарев, М. Ф. Механические воздействия и защита РЭА / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов.— М.: Радио и связь, 1984.— 224 с.
11. Каленкович, Н. И. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования : учебно-метод. пособие / Н. И. Каленкович [и др.]. — Минск: БГУИР, 2008. — 200 с.
12. Кофанов, Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств: учебник для вузов / Ю. Н. Кофанов.— М. : Радио и связь, 1991. — 360 с.
13. Баканов, Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ю. Суходольский.— М. : Академия, 2007. — 368 с.

В авторской редакции