

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

М.С. Былина, С.Ф. Глаголев

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

Рукопись

СПбГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017**

УДК 621.317.7 (075.8)

ББК 30.10я73

????

Рецензент

Былина М.С., Глаголев С.Ф.

????

Планирование эксперимента : методические указания к лабораторным работам / М.С. Былина, С.Ф. Глаголев. – СПб. : Издательство СПбГУТ, 2017. – ??? с.

В данном учебном пособии приведены методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Планирование эксперимента». Все лабораторные работы могут выполняться фронтальным методом.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по программам подготовки бакалавров по направлениям 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

УДК 621.317.7 (075.8)

ББК 30.10я73

© Былина М.С., Глаголев С.Ф., 2017

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017

Введение

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Планирование эксперимента» предназначены для студентов, обучающихся по программам подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Обработка результатов прямых многократных измерений. Точечные оценки результатов измерения, содержащих случайные погрешности. Определение закона распределения случайных погрешностей

Цель работы

Ознакомление с методами обработки результатов прямых многократных измерений. Освоение методик определения точечных оценок результатов измерения и наиболее вероятного закона распределения случайных погрешностей.

Подготовка к работе

При подготовке к работе изучить следующие вопросы:

- точечные оценки случайных величин: математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение (СКО) измеряемой величины, СКО среднего значения, асимметрия, эксцесс, контрэксцесс;
- параметры числового ряда случайных величин: медиана, максимальное и минимальное значения;
- законы распределения случайных величин: равномерный, треугольный, нормальный, арксинусоидальный;
- определение законов распределения случайной погрешности измерений с помощью гистограмм и критерия Пирсона.

Выполнение работы

1. Получите у преподавателя номер варианта.
2. Исходными данными к лабораторной работе являются число измерений случайной величины N и ее значения U_i , полученные при каждом измерении. Эти данные находятся в файлах **sizfi10XX.dat** (число измерений) и **filst10XX.dat** (значения случайной величины), где **XX** – двузначный номер варианта, заданный преподавателем (01-20).

3. Рассчитайте следующие точечные оценки случайной величины U :

- Среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$U_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N U_i \quad (1.1)$$

- Дисперсию D и СКО σ результатов измерений:

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_0)^2, \quad \sigma = \sqrt{D} \quad (1.2)$$

- СКО среднего:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1.3)$$

- Асимметрию As , эксцесс Eks и контрэксцесс $KEks$:

$$As = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (U_i - U_0)^3, \quad Eks = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} \cdot \sum_{i=1}^N (U_i - U_0)^4, \quad KEks = \frac{1}{\sqrt{Eks}} \quad (1.4)$$

4. Сопоставьте полученные значения асимметрии, эксцесса и контрэксцесса с значениями, приведенными в табл. 1.1 для четырех типов распределения случайной величины. Сделайте вывод о наиболее вероятном типе распределения.

Таблица 1.1

Тип распределения	Асимметрия	Эксцесс	Контрэксцесс
Равномерное	0	1.8	0.745
Треугольное	0	2.4	0.645
Нормальное	0	3	0.577
Арсинусоидальное	0	1.5	0.816

5. Рассчитайте следующие параметры числового ряда U :

- Медиану U_m
- Минимальное U_{min} и максимальное значения U_{max} результатов измерений

6. Постройте гистограмму. Для этого значения U_i необходимо разбить на несколько интервалов. Число интервалов M выбирается по табл. 1.2. Рассчитайте ширину интервала ΔU , полагая, что все интервалы имеют одинаковую протяженность:

$$\Delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{M} \quad (1.5)$$

Разбейте данные по интервалам следующим образом. В первый интервал включаются все значения от U_{min} до $U_{min} + \Delta U$, во второй интервал – все значения от $U_{min} + \Delta U$ до $U_{min} + 2 \cdot \Delta U$, в третий интервал – все значения от $U_{min} + 2 \cdot \Delta U$ до $U_{min} + 3 \cdot \Delta U$ и т.д. В последний интервал должно войти значение U_{max} .

Рассчитайте число результатов измерений NU , которые попали в каждый из интервалов, и постройте гистограмму.

Таблица 1.2

Число измерений N	40-100	100-500	500-1000	1000-10000
Число интервалов M	7-9	8-12	10-16	12-22

Оцените оптимальность выбора числа интервалов на гистограмме. Рекомендуется, чтобы, с одной стороны, число интервалов было как можно больше, а с другой, в одном интервале было бы не менее 5 значений.

7. Сопоставьте полученную гистограмму с гистограммами четырех возможных типов распределений (рис. 1.1). Сделайте вывод о наиболее вероятном типе распределения исходных данных.

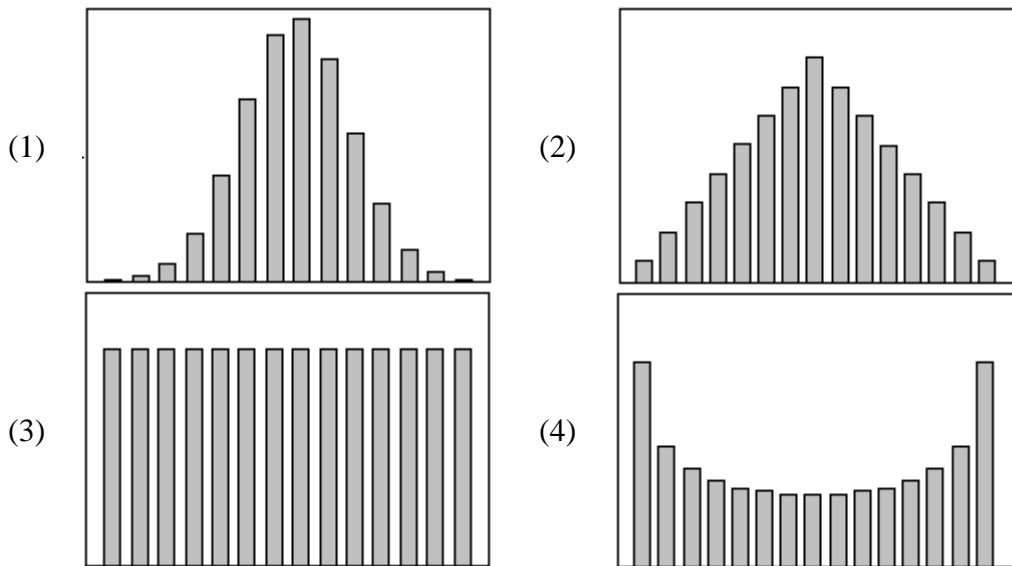


Рис. 1.1. Гистограммы для нормального (1), треугольного (2), равномерного (3) и арксинусоидального (4) распределений

8. Проверьте свою гипотезу о законе распределения случайной величины по критерию Пирсона. Для этого:

8.1. Рассчитайте значения случайной величины, соответствующие середине каждого интервала:

$$U_{s_i} = U_{\min} + (i-1) \cdot \Delta U + \frac{\Delta U}{2}, \quad (1.6)$$

где i – номер интервала (от 0 до $M-1$).

8.2. Для каждого интервала рассчитайте плотность вероятности предполагаемого распределения с параметрами, соответствующими статистическим оценкам экспериментальных данных:

- если предполагаемое распределение нормальное:

$$p_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(U_{s_i} - U_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.7)$$

- если предполагаемое распределение треугольное:

$$p_i = \begin{cases} \frac{\sqrt{6} \cdot \sigma - |U_0 - U_{s_{\text{int}}}|}{6\sigma^2} & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| \leq \sqrt{6}\sigma \\ 0 & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| > \sqrt{6}\sigma \end{cases} \quad (1.8)$$

- если предполагаемое распределение равномерное:

$$p_i = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma} & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| \leq \sqrt{3}\sigma \\ 0 & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| > \sqrt{3}\sigma \end{cases}. \quad (1.9)$$

- если предполагаемое распределение арксинусоидальное:

$$p_i = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{2\sigma^2 - (U_0 - U_{s_i})^2}} & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| \leq \sqrt{2}\sigma \\ 0 & \text{при } |U_0 - U_{s_i}| > \sqrt{2}\sigma \end{cases} \quad (1.10)$$

8.3. Для каждого интервала рассчитайте теоретическое число значений случайной величины, которое должно попасть в него при предполагаемом распределении:

$$Nu_i = p_i \cdot \Delta U \cdot N \quad (1.11)$$

8.4. Рассчитайте значение критерия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{M-1} \frac{(NU_i - Nu_i)^2}{Nu_i}, \quad (1.12)$$

где NU_i – число значений U_i , попавших в интервал с номером i . Эти величины были определены в п. 6.

8.5. Рассчитайте количество степеней свободы:

$$Ns = M - s - 1, \quad (1.13)$$

где s – число параметров распределения, оцененных по исходным данным. Для рассматриваемых распределений $s = 2$.

8.6. Выберите уровень значимости критерия $q = 1 - \alpha$ из интервала 0.05–0.2 и найдите по таблице 1.3 критическую точку правосторонней критической области $\chi_{Ns,q}^2$. Сделайте вывод о том, подтверждается ли Ваша гипотеза о распределении случайной величины U . Если рассчитанная по (1.12) величина критерия $\chi^2 < \chi_{Ns,q}^2$, то гипотеза о предполагаемом законе распределении результатов наблюдений принимается. В противном случае гипотеза должна быть отвергнута.

При выборе уровня значимости критерия учтите, что он определяет вероятность $\alpha = 1 - q$ ошибки 1 рода, то есть ошибки, при которой отвергается верная гипотеза. Вероятность ошибки 2 рода, то есть принятие неверной гипотезы, вычислить невозможно, так как для этого необходимо рассмотреть все прочие возможные альтернативные гипотезы. Можно лишь утверждать, что при уменьшении ошибки 1 рода ошибка 2 рода растет. Поэтому не имеет смысла брать слишком высокие значения доверительных вероятностей α .

9. Если в п. 8 первоначальная гипотеза о законе распределения была отвергнута, проверьте по критерию Пирсона гипотезу о распределении исходных данных по закону, наиболее близкому к первоначальному. Например, если гипотеза о том, что данные распределены по треугольному закону не подтвердилась, проверьте гипотезу о нормальности их распределения. Сделайте окончательные выводы о законе распределения исходных данных.

Таблица 1.3

<i>k</i>	Уровень значимости α								
	0.01	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2
1	0.00015	0.00097	0.0039	0.0089	0.016	0.025	0.036	0.049	0.064
2	0.020	0.051	0.103	0.156	0.211	0.267	0.325	0.385	0.446
3	0.115	0.216	0.352	0.472	0.584	0.692	0.798	0.902	1.005
4	0.297	0.484	0.711	0.897	1.064	1.219	1.366	1.509	1.649
5	0.554	0.831	1.145	1.394	1.610	1.808	1.993	2.171	2.343
6	0.872	1.237	1.635	1.941	2.204	2.441	2.661	2.870	3.070
7	1.239	1.690	2.167	2.528	2.833	3.106	3.358	3.596	3.822
8	1.647	2.180	2.733	3.144	3.489	3.797	4.078	4.342	4.594
9	2.088	2.700	3.325	3.785	4.168	4.507	4.817	5.106	5.380
10	2.559	3.247	3.940	4.446	4.865	5.234	5.570	5.833	6.179
11	3.053	3.816	4.575	5.124	5.578	5.975	6.336	6.672	6.989
12	3.571	4.404	5.226	5.818	6.304	6.729	7.114	7.471	7.807
13	4.107	5.009	5.892	6.524	7.042	7.493	7.901	8.278	8.634
14	4.661	5.629	6.571	7.242	7.790	8.266	8.696	9.094	9.467
15	5.229	6.262	7.261	7.969	8.547	9.048	9.499	9.916	10.307
16	5.812	6.908	7.962	8.707	9.312	9.837	10.309	10.744	11.152
17	6.407	7.564	8.762	9.452	10.085	10.633	11.125	11.578	12.002
18	7.015	8.231	9.390	10.205	10.865	11.435	11.946	12.417	12.857
19	7.633	8.907	10.117	10.965	11.651	12.242	12.773	13.260	13.716
20	8.260	9.591	10.851	11.732	12.443	13.055	13.604	14.108	14.578
21	8.897	10.283	11.591	12.504	13.240	13.873	14.439	14.959	15.445
22	9.543	10.982	12.338	13.282	14.041	14.695	15.279	15.814	16.314
23	10.196	11.689	13.091	14.065	14.848	15.521	16.122	16.673	17.187
24	10.856	12.401	13.848	14.853	15.659	16.351	16.969	17.534	18.062
25	11.524	13.120	14.611	15.645	16.473	17.184	17.818	18.399	18.940
26	12.198	13.844	15.379	16.440	17.292	18.022	18.671	19.266	19.820
27	12.879	14.573	16.151	17.241	18.114	18.861	19.571	20.136	20.703
28	13.565	15.308	16.928	18.045	18.939	19.704	20.386	21.008	21.588
29	14.256	16.047	17.708	18.853	19.768	20.550	21.247	21.833	22.475
30	14.953	16.791	18.493	19.664	20.599	21.399	22.110	22.760	23.364

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Обработка результатов прямых многократных измерений. Оценка погрешности результатов прямых многократных измерений с помощью интервалов. Отбрасывание результатов измерения, содержащих промахи или грубые погрешности

Цель работы

Ознакомление с методами обработки результатов прямых многократных измерений. Освоение методики оценки погрешности результата измерений с помощью интервалов. Ознакомление с методиками обнаружения и отбрасывания результатов измерений, содержащих промахи или грубые погрешности.

Подготовка к работе

При подготовке к работе изучить следующие вопросы:

- доверительная вероятность, доверительный интервал, доверительная граница погрешности результата измерения;
- распределение Стьюдента, число степеней свободы;
- нормальный закон распределения случайных величин;
- причины возникновения промахов или грубых погрешностей измерения;
- критерий Шовене отбрасывания аномальных результатов измерения;
- методика отбрасывания аномальных результатов измерения, рекомендуемая Госстандартом.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Оценка случайной погрешности результата измерений с помощью интервалов

1.1. Получите у преподавателя номер варианта.

1.2. Исходными данными к первой части работы являются число измерений случайной величины N и ее значения U_i , полученные при каждом измерении. Эти данные находятся в файлах **sizfi11XX.dat** (число измерений) и **filst11XX.dat** (значения случайной величины), где **XX** – двузначный номер варианта, заданный преподавателем (01-20).

1.3. Рассчитайте точечные оценки случайной величины U : среднее арифметическое значение результатов измерений U_0 по выражению (1.1), дисперсию D и СКО σ результатов измерений по выражению (1.2) и СКО среднего σ_0 по выражению (1.3).

1.4. Определите доверительный интервал для среднего арифметического значения измеряемой величины с помощью интеграла Стьюдента. Для этого выберите доверительную вероятность α в пределах 0.75-0.99. Ис-

комый доверительный интервал будет иметь вид:
 $U_0 - T_p \cdot \sigma_0 < \bar{U} < U_0 + T_p \cdot \sigma_0$, где T_p – корень уравнения:

$$\alpha = F_{st}(k, T_p). \quad (2.1)$$

В (2.1) $F_{st}(k, T_p)$ – интеграл (функция распределения) Стьюдента, которая определяется выражением:

$$F_{st}(k, T_p) = p\{|U_0 - \bar{U}| < T_p \cdot \sigma_0\} = 2 \cdot \int_0^{T_p} St(t, k) \cdot dt, \quad (2.2)$$

$k = N - 1$ – число степеней свободы, $St(t, k)$ – плотность распределения Стьюдента:

$$St(t, k) = \sqrt{\frac{k(k+2)}{17.8} \left(\frac{k+3}{k+2}\right)^k} \frac{6k+19}{(k+1)(6k+13)} \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}}. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.1) не имеет аналитического решения и должно быть решено численным методом.

1.5. При выбранной в п. 1.4 доверительной вероятности определите доверительный интервал для среднего арифметического значения измеряемой величины с помощью интеграла вероятности. В этом случае доверительный интервал будет иметь вид: $U_0 - T_p \cdot \sigma < \bar{U} < U_0 + T_p \cdot \sigma$, T_p – корень уравнения:

$$\alpha = \Phi(k, T_p), \quad (2.4)$$

где $\Phi(k, T_p)$ – интеграл вероятности (функция нормального распределения):

$$\Phi(k, T_p) = p\{|U_0 - \bar{U}| < t_p \cdot \sigma\} = 2 \cdot \int_0^{T_p} p(t) \cdot dt. \quad (2.5)$$

В (2.5) $p(t)$ – плотность вероятности нормального распределения:

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right]. \quad (2.6)$$

1.6. Сравните результаты, полученные в п. 1.4 и п. 1.5. Сделайте выводы.

1.7. Повторите все ранее проведенные расчеты по пунктам 1.3–1.6 для меньшего количества измерений n , выбранных из того же массива исходных данных. Число M следует выбрать из диапазона $0.25N$ – $0.5N$. Сравните результаты обработки измерений одной и той же величины для двух различных количеств измерений.

2. Обнаружение и отбрасывание в случае необходимости аномальных результатов измерения

2.1. Исходными данными к этой части работы являются значения U_{1i} и U_{2i} , полученные при двух сериях измерений случайной величины U . Чис-

ло измерений в каждой серии равно M . два массива одинаковой размерности результатов измерений одной и той же величины. Предполагается, что результаты измерений распределены по нормальному закону. Данные находятся в файлах **sizfi12XX.dat** (число измерений в каждой серии), **filst12XX.dat** (значения случайной величины U_{1i}) и **filst13XX.dat** (значения случайной величины U_{2i}), где **XX** – двузначный номер варианта, заданный преподавателем (01-20).

2.2. Рассчитайте для двух серий измерений средние арифметические значения результатов U_{10} и U_{20} по выражению (1.1), дисперсии D_1 и D_2 и СКО σ_1 и σ_2 по выражению (1.2) и СКО среднего σ_{10} и σ_{20} по выражению (1.3), максимальные $U_{1\max}$ и $U_{2\max}$ и минимальные $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$ значения и медианы U_{1m} и U_{2m} .

2.3. Рассчитайте относительные отклонения результатов отдельных измерений от среднего значения:

$$t_{1i} := \frac{U_{1i} - U_{10}}{\sigma_1}, \quad t_{2i} := \frac{U_{2i} - U_{20}}{\sigma_2} \quad (2.7)$$

2.4. Выявите в исходных данных anomальные результаты измерений в соответствии с рекомендациями Госстандарта. Для этого задайтесь доверительной вероятностью α и по табл. 2.1 определите максимально допустимое для нормального распределения значение относительного отклонения результата отдельного измерения t_{\max} . Сравните рассчитанные по выражению (2.7) относительные отклонения t_{1i} и t_{2i} с t_{\max} . Сделайте вывод о необходимости отбрасывания anomальных результатов измерений.

Таблица 2.1

Значения t_{\max} при различных числах измерений M

M	$q = 1 - \alpha$				M	$q = 1 - \alpha$			
	0.1	0.05	0.025	0.01		0.1	0.05	0.025	0.01
3	1.406	1.412	1.414	1.414	14	2.297	2.461	2.602	2.759
4	1.645	1.689	1.710	1.723	15	2.326	2.493	2.683	2.808
5	1.731	1.869	1.917	1.955	16	2.354	2.523	2.670	2.837
6	1.894	1.996	2.067	2.130	17	2.380	2.551	2.701	2.871
7	1.974	2.093	2.182	2.265	18	2.404	2.557	2.728	2.903
8	2.041	2.172	2.273	2.374	19	2.426	2.600	2.754	2.932
9	2.097	2.237	2.349	2.464	20	2.447	2.623	2.778	2.959
10	2.146	2.294	2.414	2.540	21	2.467	2.644	2.801	2.984
11	2.190	2.383	2.470	2.606	22	2.486	2.664	2.823	3.008
12	2.229	2.387	2.519	2.663	23	2.504	2.683	2.843	3.030
13	2.264	2.426	2.562	2.714	24	2.520	2.701	2.862	3.051

2.5. Выявите в исходных данных anomальные результаты измерений, пользуясь критерием Шовене. Для рассчитанных по выражению (2.7) относительных отклонений t_{1i} и t_{2i} вычислите величину критерия Шовене K_{1i} и K_{2i} :

$$K_{1i} = M \cdot p_{1i}, \quad K_{2i} = M \cdot p_{2i}, \quad (2.8)$$

где p_{1i} и p_{2i} – вероятности того, что результаты измерения t_{1i} и t_{2i} аномальны:

$$p_{1i} = 1 - 2 \cdot \int_0^{t_{1i}} p(t) \cdot dt, \quad p_{2i} = 1 - 2 \cdot \int_0^{t_{2i}} p(t) \cdot dt \quad (2.9)$$

В (2.9) $p(t)$ – плотность вероятности нормального распределения (2.6). В соответствии с критерием Шовене мы должны отбросить подозрительные результаты, для которых величина критерия меньше 0.5.

Сделайте вывод о необходимости отбрасывания аномальных результатов измерений. Сравните выводы по пунктам 2.4 и 2.5.

2.6. Исключив из результатов измерения аномальные, повторите для оставшихся значений расчеты п. 2.2. Сравните результаты обработки полных и усеченных массивов исходных данных. Сделайте выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение характера повреждений кабельных цепей и измерение расстояний до них кабельным прибором ПКП-5

Цель работы:

Спланировать и провести экспериментальное исследование поврежденной кабельной цепи, целью которого является определение характера повреждений и измерение расстояния до них.

Подготовка к работе

При подготовке к работе изучить следующие вопросы:

- виды и причины повреждений кабелей связи;
- методика определения характера повреждения при использовании прибора ПКП-5, последовательность измерений;
- методы и схемы измерения емкости кабельных цепей;
- методы и схемы измерения сопротивления изоляции кабельных цепей;
- методы и схемы измерения сопротивления шлейфа кабельных цепей;
- методы и схемы измерения расстояния до места обрыва;
- методы и схемы измерения расстояния до места короткого замыкания;
- методы и схемы измерения расстояния до места понижения сопротивления изоляции.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с использованием виртуальной лабораторной установки «Кабельный прибор ПКП-5». Внешний вид установки представлен на рис. 3.1.

Подключение прибора к исследуемой линии происходит на вкладке **Подключение**. Для этого щелкните левой кнопкой мыши по нужной клемме прибора. При этом на ней появится изображение наконечника (рис. 3.2а). Затем щелкните мышью по нужной клемме на правом плинте. При этом появится соединительный провод между клеммой прибора и клеммой на плинте (рис. 3.2б). Также можно подключить остальные клеммы прибора.

Для удаления соединения щелкните левой кнопкой мыши по изображению наконечника на клемме прибора.

При необходимости на противоположном конце линии можно установить перемычки. Для этого последовательно щелкните мышью по нужным клеммам на левом плинте. При этом выбранные клеммы будут соединены перемычкой (рис. 3.3).

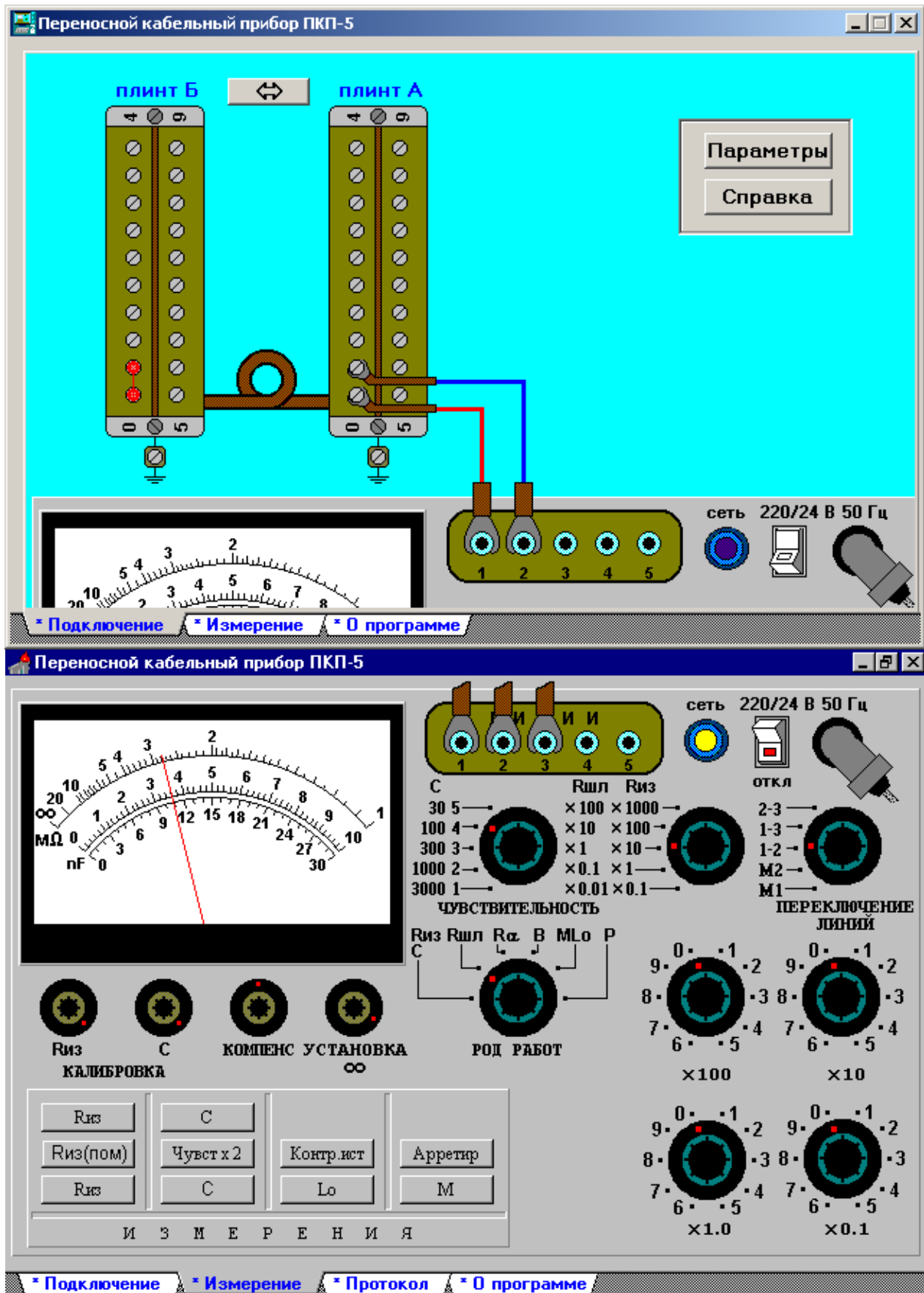


Рис. 3.1. Внешний вид основных окон виртуальной лабораторной установки

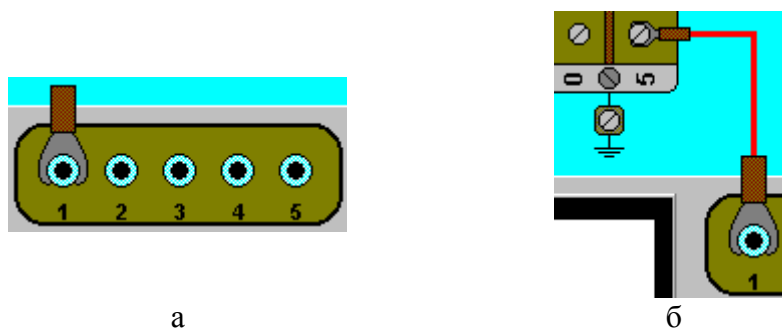


Рис. 3.2. Подключение прибора к линии

Для установки следующей перемычки щелкните по плинту правой кнопкой мыши и в появившемся контекстном меню выберите пункт *Новая перемычка* (рис. 3.3). Возможна установка до 5 перемычек. Для удаления всех перемычек выберите пункт *Удалить перемычки*.

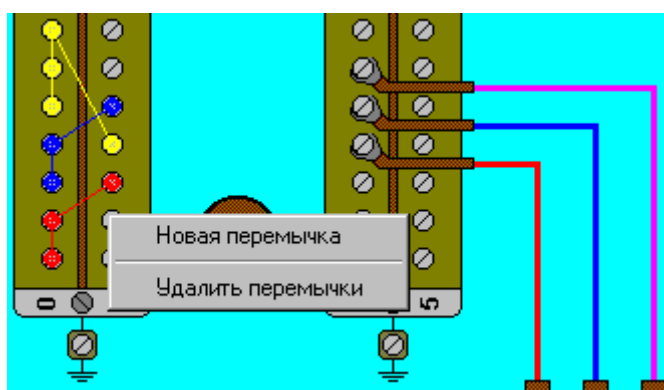



Рис. 3.3. Установка и удаление перемычек

При необходимости осуществить измерения с противоположного конца поменяйте плинты местами. Для этого нажмите кнопку .

Для проведения измерений перейдите на вкладку *Измерение*, на которой изображена передняя панель прибора.

Для начала измерений прибор необходимо включить. Для этого щелкните мышью по изображению выключателя в верхнем правом углу передней панели. (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Включение виртуального прибора

Калибровка прибора производится ручками плавной регулировки, расположенными под индикатором (рис. 3.5). Для поворота ручки по часовой стрелке нажмите левой кнопкой мыши на правую половину изображения ручки и, удерживая кнопку, добейтесь правильного положения. Для поворота против часовой стрелки нажмите левой кнопкой мыши на левую

половину изображения ручки и, удерживая кнопку, добейтесь правильного положения.



Рис. 3.5. Калибровка виртуального прибора

Для поворота переключателей *Род работ* и магазина сопротивлений по часовой стрелке на одно деление щелкните левой кнопкой мыши по правой половине изображения переключателя. Для поворота переключателей против часовой стрелки на одно деление щелкните левой кнопкой мыши по левой половине изображения переключателя.

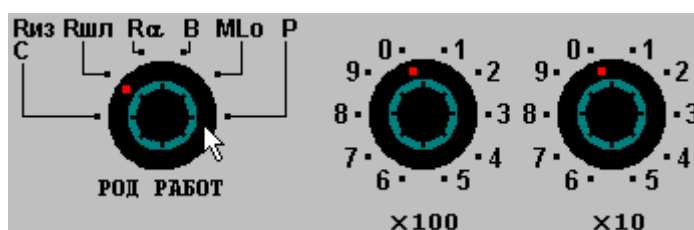


Рис. 3.6. Управление переключателями *Род работ* и магазина сопротивлений

Для поворота переключателей диапазонов измерения и переключателя линий по часовой стрелке на одно деление щелкните левой кнопкой мыши по верхней половине изображения переключателя (рис. 3.7). Для поворота этих переключателей против часовой стрелки на одно деление щелкните левой кнопкой мыши по нижней половине изображения переключателя.

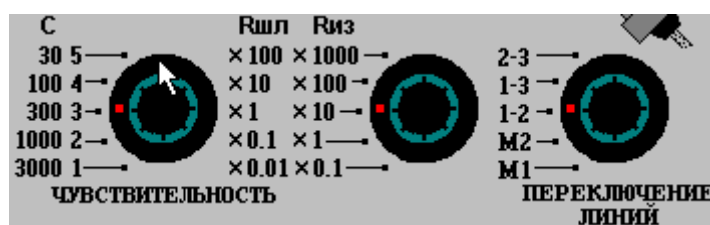


Рис. 3.7. Управление переключателями диапазонов измерения и переключателя линий

Для нажатия одной из кнопок, расположенных на передней панели прибора, щелкните по ней левой кнопкой мыши. При необходимости осуществить манипуляцию с ручками и переключателями при нажатой кнопке удерживайте ее в нажатом состоянии клавишей “пробел”.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Выявление простых повреждений (обрыв, короткое замыкание, понижение сопротивления изоляции) и определение расстояний до них

1.1. Изучите содержание раздела «Описание лабораторной установки», практически ознакомьтесь с виртуальной установкой, моделирующей прибор ПКП-5 и кабельные цепи десятипарного кабеля ГТС. Научитесь работать с органами управления прибора, подключать и отключать кабельные цепи, устанавливать переключки.

1.2. Пользуясь справкой, встроенной в программу «Кабельный прибор ПКП-5», ознакомьтесь с методиками измерения перечисленных выше параметров кабельных цепей. Обратите внимание, что измерения могут проводиться с двух сторон кабельного участка.

1.3. По табл. 3.1 определите свой первый номер варианта и исходные данные к нему. Для измерений используйте 0, 1, 2 и 3 пары и экран.

Таблица 3.1

Варианты заданий

Номер рабочего места	Вариант	Диаметр жилы d_c , мм	Температура кабеля t , °С
1	70	0.32	5
	40	0.5	20
2	73	0.5	10
	41	0.32	10
3	74	0.4	15
	42	0.32	15
4	77	0.32	8
	43	0.4	17
5	78	0.7	7
	44	0.4	20
6	81	0.5	12
	45	0.5	24
7	82	0.7	18
	46	0.5	18
8	85	0.32	9
	47	0.5	23
9	86	0.5	19
	48		

1.4. Проведите измерения сопротивлений изоляции R_{ins} между жилами указанных пар и экраном со стороны плинтвов А и Б. Результаты измерений занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Номер пары	0		1		2		3	
Номер жилы	0	1	2	3	4	5	6	7
Сопротивление изоляции $R_{ins A}$, ГОм								
Сопротивление изоляции $R_{ins B}$, ГОм								

Определите номера жил, имеющих пониженное по отношению к экрану сопротивление изоляции. Нормы на сопротивление изоляции указаны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры симметричных кабелей ГТС

Диаметр жил d_0 , мм	0.32	0.4	0.5	0.64	0.7	f , кГц
Погонное сопротивление шлейфа R_0 , Ом/км	432±26	278±18	180±12	108±8	92±6	0.000
Коэффициент затухания α , дБ/км	1.92	1.54	1.23	0.61	0.56	0.800
Рабочая емкость C_w для кабелей без гидрофобной изоляции, нФ/км	45 ± 5					0.025
Рабочая емкость C_w для кабелей с гидрофобной изоляцией, нФ/км	50 ± 5					0.025
Сопротивление изоляции R_{ins} , МОм км	1000					0.000
Сопротивление асимметрии R_{as} , Ом/км	0.05 R_{loop}					0

1.5. Измерьте рабочие емкости C_w указанных пар, а также их сопротивления шлейфа R_{loop} со стороны плинтов А и Б. Результаты измерений поместите в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Номер пары	0	1	2	3
$R_{loop A}$, Ом				
$R_{loop B}$, Ом				
$C_w A$, нФ				
$C_w B$, нФ				
Возможный характер неисправности				

Определите номера исправных (условно исправных) и неисправных пар, сделайте выводы о характере неисправности (обрыв и короткое замыкание).

1.6. Определите длину кабеля по результату измерения сопротивления шлейфа R_{loop} исправной (условно исправной) пары:

$$L = \frac{R_{loop} \pi d_c^2}{8\rho(1 + \alpha(t - 20))}, \quad (3.1)$$

где d_c – диаметр жилы кабеля, $\rho = 17.24$ нОм·м – удельное сопротивление меди при температуре 20°C , $\alpha = 3.96 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления для меди, t – температура кабеля в $^\circ\text{C}$. Результат расчета занесите в табл. 3.5.

1.7. Определите расстояние до места обрыва жил двумя способами.

1.7.1. *Способ сравнения емкостей исправной и оборванной пар* используется при наличии исправной (условно исправной) пары. В этом случае при известной длине кабеля L расстояние до места обрыва от плинта А можно рассчитать по выражению:

$$L_b = L \cdot \frac{C_{wbA}}{C_w}, \quad (3.2)$$

C_{wbA} – рабочая емкость оборванной пары, измеренная со стороны плинта А, C_w – рабочая емкость исправной пары. Результат расчета занесите в табл. 3.5.

При неизвестной длине кабеля расстояние до места обрыва можно рассчитать по выражению:

$$L_b = L \cdot \frac{C_{wbA}}{C_0}, \quad (3.3)$$

где C_0 – значение погонной рабочей емкости, указанное в табл. 3.3 для данного кабеля. Результат расчета занесите в табл. 3.5.

1.7.2. *Двухсторонний метод измерения рабочих емкостей* используется при отсутствии исправной (условно исправной) пары и известной длине кабеля L . В этом случае расстояние до места обрыва можно рассчитать по выражению:

$$L_b = L \cdot \frac{C_{wbA}}{C_{wbA} + C_{wbB}}, \quad (3.4)$$

где C_{wbB} – рабочая емкость оборванной пары со стороны плинта Б. Результат расчета занесите в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Номер оборванной пары	Длина исправной линии L , км	Погонная емкость C_0 , нФ/км	Расстояние до обрыва $L_{об}$, км, рассчитанное по выражению		
			(3.2)	(3.3)	(3.4)

1.8. Определите номер оборванной жилы в паре. Для этого проведите измерение емкостей каждой жилы оборванной пары по отношению к экра-

ну. Имейте в виду, что возможен обрыв как одной, так и обеих жил. Результаты занесите в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Номер жилы в оборванной паре	Емкость по отношению к экрану, нФ	Наличие обрыва, да/нет

1.9. Определите расстояние до места короткого замыкания тремя способами.

1.9.1. *Способ сравнения сопротивлений шлейфа исправной и неисправной пар* используется при наличии исправной (условно исправной) пары. В этом случае при известной длине кабеля L расстояние до короткого замыкания со стороны планта А можно рассчитать по выражению:

$$L_s = L \cdot \frac{R_{loop\ s\ A}}{R_{loop}}, \quad (3.5)$$

где $R_{loop\ s\ A}$ – сопротивление шлейфа неисправной пары, измеренное со стороны планта А, R_{loop} – сопротивление шлейфа исправной (условно исправной) пары. Результат расчета занесите в табл. 3.7.

При неизвестной длине линии расстояние до короткого замыкания со стороны планта А можно рассчитать по выражению:

$$L_s = L \cdot \frac{R_{loop\ s\ A}}{R_0}, \quad (3.6)$$

где R_0 – значение погонного сопротивления шлейфа, указанное в табл. 3.3 для данного кабеля. Результат расчета занесите в табл. 3.7.

1.9.2. *Двухсторонний метод измерения сопротивлений шлейфа* используется при отсутствии исправной (условно исправной) пары и известной длине кабеля L . В этом случае расстояние до короткого замыкания со стороны планта А можно рассчитать по выражению:

$$L_s = L \cdot \frac{R_{loop\ s\ A}}{R_{loop\ s\ A} + R_{loop\ s\ B}}, \quad (3.7)$$

где $R_{loop\ s\ B}$ – сопротивление шлейфа неисправной пары, измеренное со стороны планта Б.

1.9.3. *Мостовой метод Варлея* используется при наличии исправной (условно исправной) пары и известной длине кабеля L . Для определения расстояния до короткого замыкания соберите схему, показанную на рис. 3.8. Уравнесите мост магазином сопротивлений. Определите сопротивление магазина R_{rb} , при котором достигнуто равновесие моста. Рассчитайте расстояние до короткого замыкания по выражению:

$$L_s = L \cdot \left(1 - \frac{R_{rb}}{R_{loop}} \right), \quad (3.8)$$

где R_{loop} – сопротивление шлейфа исправной (условно исправной) пары. Результат расчета занесите в табл. 3.7.

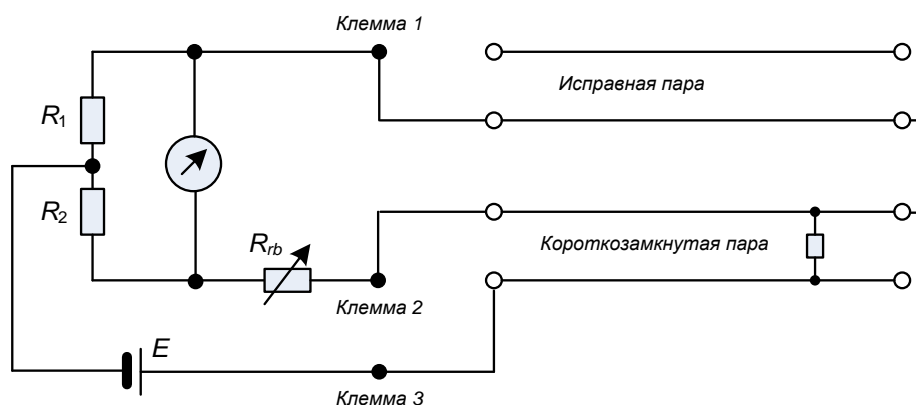


Рис. 3.8. Схема измерения расстояния до короткого замыкания мостом Варлея.

Таблица 3.7

Номер короткозамкнутой пары	Длина исправной линии L , км	Погонное сопротивление шлейфа R_0 , Ом	Сопротивление магазина при равновесии моста Варлея R_{rb} , Ом	Расстояние до короткого замыкания L_s , км, рассчитанное по выражению			
				(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.8)

1.10. Определите расстояние до места понижения сопротивления изоляции мостовым методом Муррея. Соберите схему, показанную на рис. 3.9. Уравновесьте мост магазином сопротивлений. Определите сопротивление магазина R_{rb} , при котором достигнуто равновесие моста.

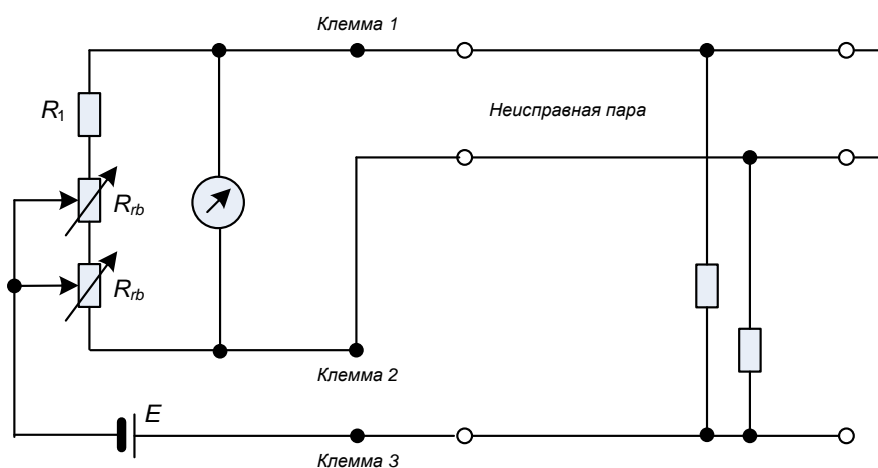


Рис. 3.9. Схема измерения расстояния до места понижения сопротивления изоляции мостом Муррея.

Рассчитайте расстояние до места понижения сопротивления изоляции по выражению:

$$L_{ins} = L \cdot \frac{R_{rb}}{R_1}, \quad (3.9)$$

где $R_1 = 1000$ Ом. Результаты измерения и расчета занесите в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Номер пары, имеющей пониженное сопротивление изоляции	Длина кабеля L , км	Сопротивление магазина при равновесии моста Муррея R_{rb} , Ом	Расстояние до места понижения сопротивления изоляции L_{ins} , км

2. Выявление комплексных повреждений и определение расстояний до них

2.1. По табл. 3.1 определите свой второй номер варианта и исходные данные к нему. Для измерений используйте 0 и 1 пары и экран кабеля.

2.2. С помощью прибора ПКП-5 определите общую длину кабельного участка, характер повреждений и измерьте расстояния до них. Объем и характер измерений определите самостоятельно. Разработайте форму протокола для фиксации необходимых результатов измерений.

В табл. 3.3 приведены справочные данные о параметрах симметричных кабелей ГТС, которые можно использовать для определения длины кабельной цепи и расстояния для некоторых видов повреждений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема повреждений кабельных цепей по варианту задания 1.
2. Схемы проведенных при выполнении задания 1 измерений.
3. Заполненные таблицы 3.2, 3.4-3.8 измеренных и рассчитанных при выполнении задания 1 величин.
4. Схема повреждений кабельных цепей по варианту задания 2.
5. Схемы проведенных при выполнении задания 2 измерений.
6. Протокол измерений и расчетов, разработанный и заполненный при выполнении задания 2.
7. Выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«Планирование эксперимента по исследованию характеристик многомодовых градиентных оптических волокон»

Цель работы:

Спланировать и провести экспериментальное исследование затухания и дисперсии многомодового оптического волокна с усеченным степенным профилем показателя преломления, выявить источники погрешностей, предложить способы их компенсации или уменьшения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Многомодовые оптические волокна с усеченным степенным профилем показателя преломления

Оптические волокна (ОВ) с изменяющимся в пределах сердцевины показателем преломления называют волокнами с градиентным профилем показателя преломления. Наибольшее распространение ОВ с усеченным степенным профилем показателя преломления, в которых n_1 показатель преломления сердцевины с радиусом a уменьшается с увеличением расстояния r от оси ОВ по закону близкому к параболическому

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2(r) = n_{10}^2 \left[1 - 2 \cdot \Delta \cdot (r/a)^q \right] & \text{при } 0 < r < a \\ n_2^2 = n_{10}^2 (1 - 2 \cdot \Delta) & \text{при } r > a \end{cases}, \quad (1)$$

где n_{10} , n_2 – показатели преломления на оси ОВ (при $r = 0$) и в оболочке (при $r > a$), соответственно; q – показатель степенного профиля; $2\Delta = (n_{10}^2 - n_2^2) / n_{10}^2$ – относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ.

Радиальные изменения показателя преломления в сердцевине ВС приводят к искривлениям траекторий лучей (рис. 1). На рис. 2а показаны траектории меридиональных, а на рис. 2б - косых лучей.

Меридиональные лучи имеют определенный период и отличаются друг от друга радиусом внешней каустики r_{ce} (цилиндрической поверхности, на которой лежат все точки поворота луча).

Косые лучи в градиентных многомодовых ВС распространяются по спиралевидным траекториям между двумя цилиндрическими поверхностями внешней и внутренней (цилиндрическая поверхность, которую косой луч никогда не пересекает) каустиками (рис. 2б). Радиус внутренней каустики для меридиональных лучей равен $r_{ci} = 0$.

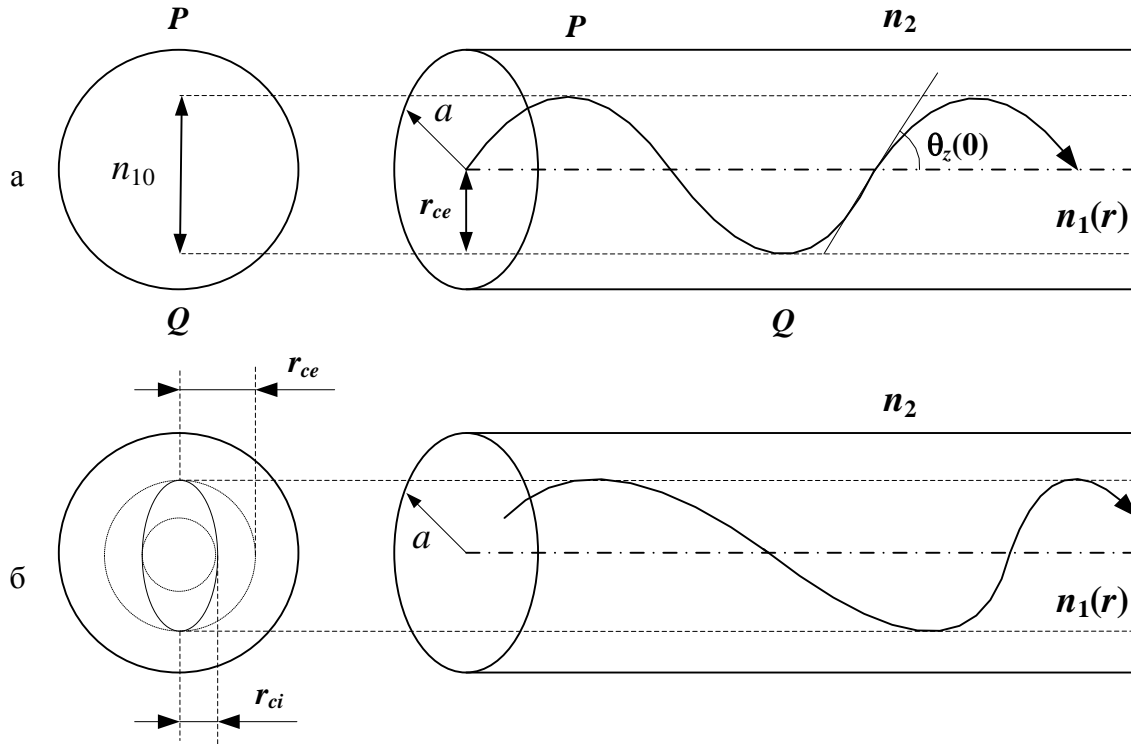


Рис. 2. Траектории лучей (а – меридиональных, б - косых) в многомодовых градиентных ВС с усеченным степенным профилем показателя преломления.

Лучевые инварианты. Условие направляемости лучей.

Различные типы лучей (мод) можно характеризовать, так называемыми лучевыми инвариантами B и E , которые представляют собой постоянные для любой точки данного луча скалярные величины, которые характеризуют его направление в любой точке поперечного сечения сердцевины.

$$B = n_1(r) \cos \theta_z(r)$$

$$E = (r/a) n_1(r) \sin \theta_z(r) \cos \theta_f(r) \quad (3)$$

В формулах (3): $\theta_z(r)$ - угол, образующийся между касательной к траектории луча и осью ВС; $\theta_f(r)$ - угол между направлением проекции траектории луча и азимутальным направлением. Для меридиональных лучей $\theta_f(r) = \pi/2$ и $E=0$.

Используя величину B , можно определить угол наклона $\theta_z(0)$ меридионального луча пересекающего ось ВС по отношению к этой оси и радиус внешней каустики

$$\cos \theta_z(0) = \frac{B}{n_{10}}, \quad r_{ce} = a \left(\left(1 - B^2 / n_{10}^2 \right) / 2\Delta \right)^{1/q}. \quad (4)$$

Для направляемых лучей величина первого инварианта должна удовлетворять условию:

$$n_2(\lambda) < B \leq n_{10}(\lambda), \quad (5)$$

где λ – длина волны.

Межмодовая дисперсия в ВС с усеченным степенным профилем.

Известно, что удельное время распространения луча на единичное расстояние в ВС с усеченным степенным профилем зависит только от лучевого инварианта B и от параметра p внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС:

$$t(B) = \frac{1}{c} \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \frac{B}{n_{10}} \right] \quad (6)$$

где $n_{10g}(\lambda) = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}(\lambda)}{d\lambda}$ – групповой показатель преломления на оси

ВС; $c = 3 \cdot 10^5$ км/с – скорость света в вакууме; $p = \frac{n_{10}(\lambda)}{n_{10g}(\lambda)} \frac{\lambda}{\Delta(\lambda)} \frac{d\Delta(\lambda)}{d\lambda}$.

На рис. 5 показана зависимость удельного времени распространения для различных значений первого инварианта B для ВС с $n_{10}=1.5$, $n_2=1.485$, $p=0.1$ и $q=1.79$. Из рис. 5 видно, что для определенного значения первого инварианта удельное время распространения принимает минимальное значение.

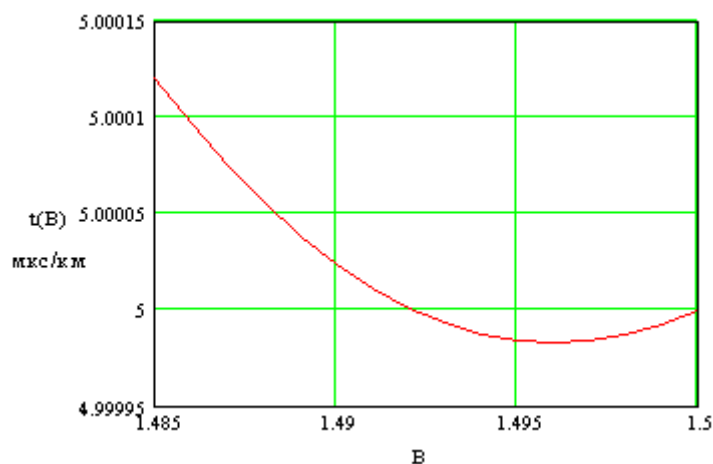


Рис. 5. Зависимость удельного времени задержки от величины первого инварианта.

Значение первого инварианта B_m и соответствующее ему минимальное удельное время распространения $t(B_m)$, можно получить из (6):

$$B_m = n_{10} \sqrt{\frac{q+p}{2-p}} \quad (7)$$

$$t(B_m) = \frac{1}{c} \frac{2n_{10g}}{q+2} \sqrt{(p+q)(2-p)} \quad (8)$$

Если рассчитанное значение B_m не удовлетворяет условию направляемых лучей (5), то расчет минимального удельного времени распространения не имеет смысла.

В качестве верхней оценки межмодовой дисперсии D_m принимается разность максимального t_{\max} и минимального t_{\min} удельных времен распространения из трех значений $t(n_{10})$, $t(n_2)$ и $t(B_m)$, если B_m удовлетворяет условию (5), или из двух значений $t(n_{10})$ и $t(n_2)$, если B_m не удовлетворяет условию (5):

$$D_m = t_{\max} - t_{\min}. \quad (9)$$

Минимальной межмодовой дисперсии D_m соответствует равенство удельных времен распространения для минимального и максимального значения первых инвариантов

$$t(n_{10}) = t(n_2) = n_{10g}/c, \quad (10)$$

На рис. 6 для этого случая показана зависимость удельного времени распространения от значений первого инварианта B для ВС с теми же параметрами, что и на предыдущем рис. 6, но с другим значением $q=1.781$.

Решение уравнения (10) позволяет получить оптимальное значение параметра степенного профиля

$$q_{opt} = 2 \cdot \frac{n_2}{n_{10}} - p \cdot \frac{n_{10} + n_2}{n_{10}}. \quad (11)$$

Минимально достижимую межмодовую дисперсию при $q = q_{opt}$ можно рассчитать преобразовав выражение (9) к следующему виду

$$D_{min} = t(n_{10}) - t(B_m) = \frac{n_{10g}}{c} \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\sqrt{n_{10} \cdot n_2}}{n_{10} + n_2} \right] \quad (12)$$

Для приведенных выше параметров $B_m = 1.492$, $q_{opt} = 1.781$, $D_{min} = 63$ пс/км.

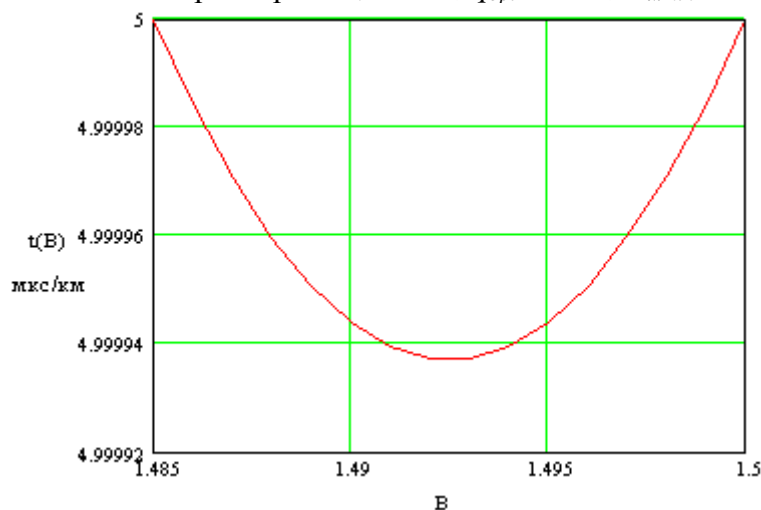


Рис. 6. Зависимость удельного времени задержки от величины первого инварианта для оптимального показателя степенного профиля

Зависимость межмодовой дисперсии от показателя профиля q имеет резкий минимум, который также зависит от длины волны (рис. 7).

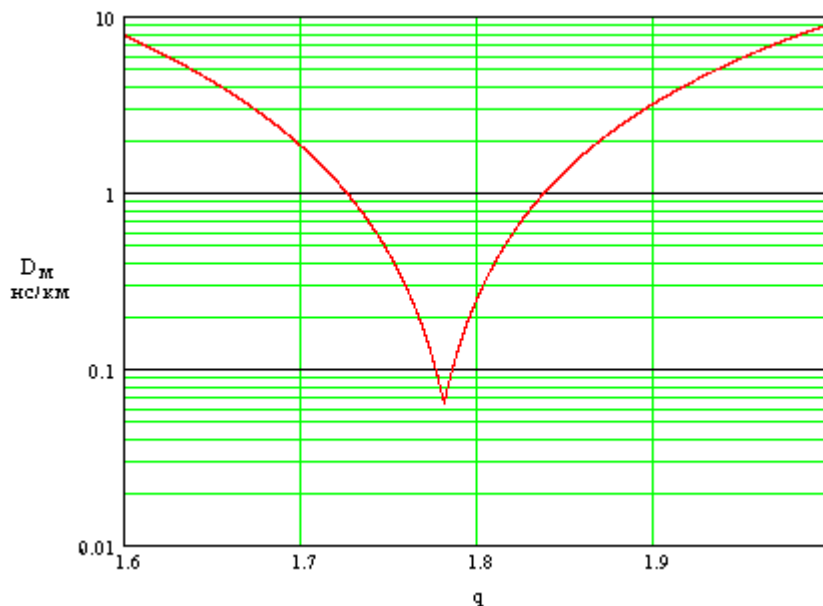


Рис. 7. Зависимость межмодовой дисперсии от показателя степенного профиля

Межмодовая дисперсия в реальных градиентных ВС с профилем близким к оптимальному значительно меньше, чем у ступенчатых ВС и составляет 0.2-2 нс/км.

Затухание в кварцевых ВС.

Затухание a характеризует ослабление сигнала и измеряется обычно в логарифмических единицах децибелах. При оптических измерениях затухание измеряют в соответствии со следующими выражением:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{P_1}, \quad (13)$$

где P_0 , P_1 - мощности сигнала на входе и выходе ВС. Для однородного ВС можно считать коэффициент затухания α - величину затухания на единицу длины, дБ/км:

$$\alpha = \frac{a}{L}, \quad (14)$$

где a – затухание ВС, дБ; L - длина ВС, км.

Для коэффициента затухания кварцевого ВС характерна нелинейная зависимость от длины волны (рис. 9).

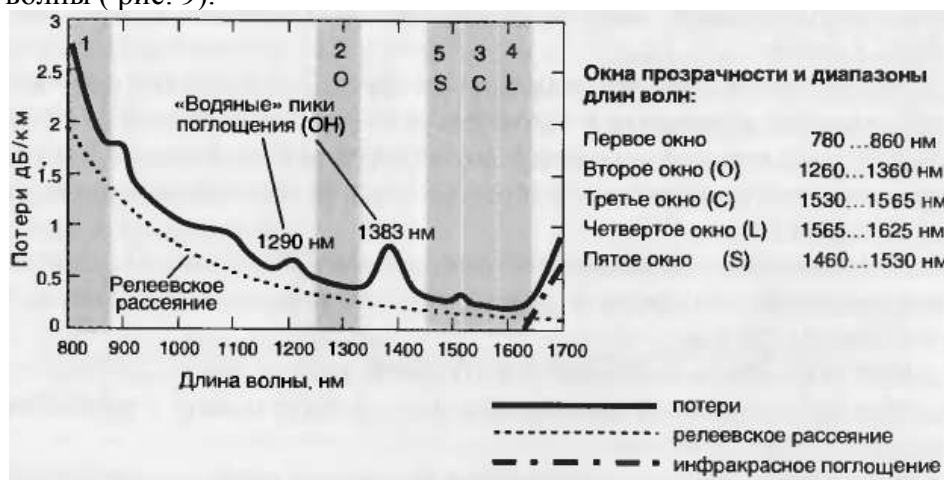


Рис. 8. Зависимость коэффициента затухания ВС от длины волны

Коэффициент затухания α ВС складывается из собственного α_c и дополнительного α_d , возникающего в процессе производства оптического волокна, при изготовлении оптического кабеля из оптического волокна, а также при прокладке кабеля и монтаже регенерационных участков волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

Собственные потери в ВС в основном обусловлены двумя причинами:

- ◆ поглощением, которое определяется свойствами кварца, являющегося основным материалом для изготовления высококачественных ВС, легирующих (полезных) добавок и вредных примесей;
- ◆ рассеянием, которое сильно зависит от длины волны и технологии изготовления ВС.

Поглощение Поглощение возникает в процессе распространения света в веществе. Оно обусловлено потерями в основном материале ВС - кварце и в примесях, как полезных, так и вредных. Поглощение носит резонансный характер и дает для кварца пики затухания в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. В используемом для связи диапазоне длин волн 0.80-1.6 мкм всплески поглощения у кварца отсутствуют, остаточные потери, обусловленные сильным поглощением в ультрафиолетовой и инфракрасной областях, могут быть рассчитаны по выражениям:

$$\alpha_{\text{нк}} = 7.81 \cdot 10^{11} \exp\left(\frac{-48.5}{\lambda}\right) \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{уф}} = 2.55 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{4.63}{\lambda}\right) \quad (16)$$

В используемом для связи диапазоне длин волн возникают также всплески затухания за счет поглощения в различных примесях (OH^- , Fe^{2+} , Cu^{2+} , C_2^{3+}). При современных технологиях изготовления ВС наибольший вклад в поглощение вносят гидроксильные группы OH^- (вода). Они дают ряд всплесков поглощения, наиболее мощный из которых на длине волны 1.39 мкм, которая очень близка к длине волны нулевой материальной дисперсии кварца (≈ 1.27 мкм). Эти потери трудно поддаются расчету и могут быть приняты равными:

$$\alpha_{\text{рп}} = 0.10 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda = 0.85 \text{ мкм};$$

$$\alpha_{\text{рп}} = 0.05 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda = 1.30 \text{ мкм}.$$

Рассеяние В ВС, изготовленных из плавленного кварца (SiO_2), происходит линейное рассеяние проходящего света. Оно является фундаментальной (технологически неустранимой) причиной затухания в ВС и носит название рэлеевское рассеяние. Его особенностью является сильная зависимость коэффициента рассеяния $\alpha_{\text{рр}}$ от длины волны λ проходящего излучения.

$$\alpha_{\text{рр}} = \chi_{\text{рр}} \lambda^{-4}, \quad (17)$$

где $\chi_{\text{рр}}$ - коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ВС равен 0.7-0.9 дБ·мкм⁴/км.

Дополнительные потери α_d складываются из потерь на микроизгибы и макроизгибы, потерь в оболочке, потерь из-за термомеханических напряжений, из-за случайно расположенных структурных дефектов ВС. Их точный учет затруднен, поэтому можно ориентировочно принять $\alpha_d = 0.1 - 0.3$ дБ/км.

Общий (суммарный) коэффициент затухания α :

$$\alpha = \alpha_{\text{нк}} + \alpha_{\text{уф}} + \alpha_{\text{рр}} + \alpha_{\text{рп}} + \alpha_d. \quad (18)$$

Другие параметры ВС с усеченным степенным профилем.

С величиной межмодовой дисперсии связано понятие **широкополосности** волокна или **удельной полосы пропускания** B [МГц км]. Этот параметр может быть определен экспериментально по срезу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на уровне 3 дБ (рис. 9). Источник излучения должен генерировать синусоидальное изменение мощности на пьедестале.

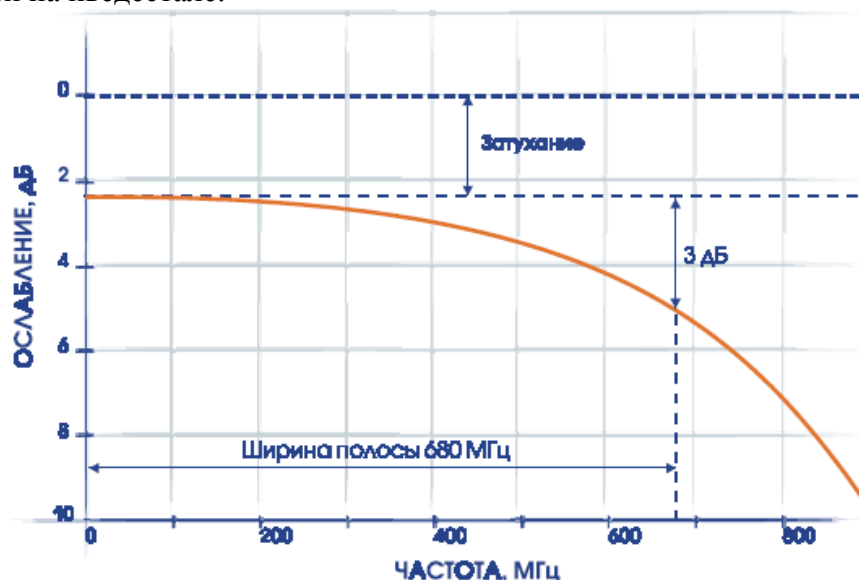


Рис. 9. Определение широкополосности.

Между величиной широкополосности и дисперсией D_m [нс/км] существует зависимость

$$B = 440/D_m. \quad (19)$$

Для градиентных многомодовых ВС широкополосность лежит в пределах 200 – 2000 МГц км.

С увеличением длины ВС L полоса пропускания ВС уменьшается

$$\Delta F = \frac{B}{L}. \quad (20)$$

Для градиентных ОВ вводится понятие **локальной числовой апертуры**, которая показывает, что максимальный угол ввода оптического излучения в этом случае определяется тем, в какой точке сердцевины волокна находится вершина конуса, иными словами, захват волокном вводимого луча света зависит от того, в какой точке сердцевины он вводится в градиентное волокно. Для ВС с градиентным профилем показателя преломления числовая апертура зависит от расстояния r до оси ВС

$$NA(r) = \sin \varphi_{i0}(r) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} \quad (21)$$

Число мод в ВС с усеченным степенным профилем может быть рассчитано по выражению:

$$N = \frac{v^2}{2(1 + 2/q)}, \quad (22)$$

где $V = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ - нормированная частота.

Структурная схема лабораторной установки.

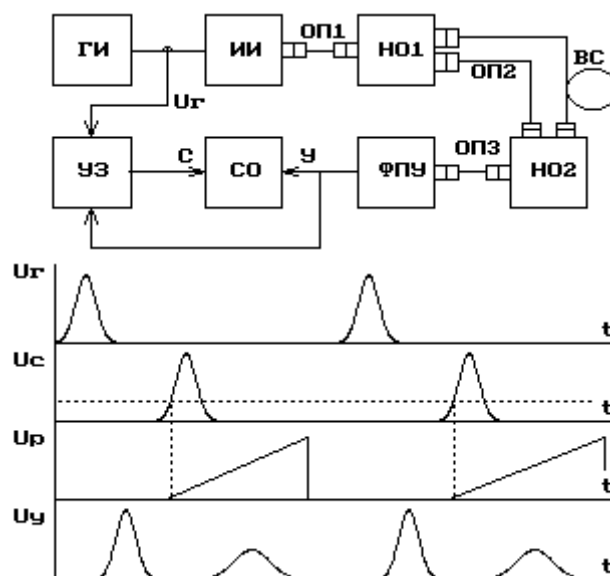


Рис. 10. Структурная схема лабораторной установки и временные диаграммы ее работы.

Структурная схема лабораторной установки (рис. 10) по исследованию процессов прохождения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам включает:

генератор импульсов (ГИ);

- источник излучения - полупроводниковый лазер (ИИ);
- два направленных ответвителя (НО1 и НО2);
- устройство временной задержки электрического импульса (УЗ);
- фотоприемное устройство (ФПУ);
- стробоскопический осциллограф (СО);
- три коротких оптических поводка (ОП1, ОП2, ОП3);
- исследуемый волоконный световод (ВС).

Работа лабораторной установки иллюстрируется временными диаграммами, которые показывают импульсы U_G на выходе ГИ, импульсы U_c , задержанные на время t_3 в УЗ, пилообразное напряжение развертки U_p и напряжение U_y , с выхода ФПУ. Импульсы U_G поступают на ИИ, где преобразуются в оптические импульсы мощностью P , которые в НО1 разделяются по мощности на два примерно одинаковых импульса. Один из них, мощностью P_1 , проходит через ОП1, ОП2, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{31} и поступает на ФПУ. Второй, мощностью P_2 , проходит через ОП1, ВС, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{32} и ослабленный за счет затухания в ВС также поступает на ФПУ. ФПУ преобразует оптические импульсы в электрические, которые можно наблюдать на экране СО, если электрический импульс совпадает по времени с пилообразным напряжением развертки. Момент запуска развертки определяется установленной в УЗ задержкой, которую можно изменять вручную или автоматически. В автоматическом режиме поиска выходного импульса задержка возрастает от 0 до максимального значения. Процесс останавливается при превышении сигналом определенного уровня (в данной лабораторной установке он выбран равным 2 мВ).

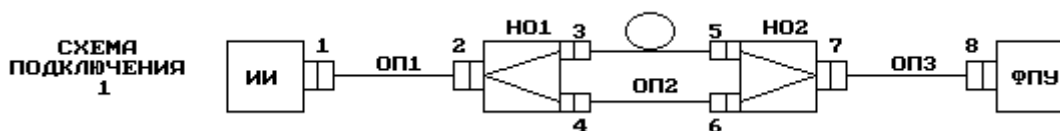
Лабораторная установка позволяет определять времена задержки t_{31} и t_{32} , амплитуды U_{m1} и U_{m2} и длительности t_1 и t_2 входного и выходного импульсов. По измеренным величинам можно рассчитать: длину ВС L , вносимое затухание a_{bc} и средний коэффициент затухания α , дисперсионное уширение выходного импульса.

Анализ оптической схемы. Экспериментальное определение параметров ВС.

В лабораторной работе предполагается проведение измерений для трех вариантов включения исследуемого ВС и оптических поволоков в схему лабораторной установки. Это позволяет исключить погрешности, обусловленные временными задержками и затуханиями в оптических элементах лабораторной установки.

Полагаем, что для изготовления поволоков и направленных ответвителей использовались идентичные ВС.

Схема подключения 1.



Для времени задержки входного импульса в схеме подключения 1 справедливо:

$$t_{311} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}}, \quad (23)$$

где L_1, L_2, L_3 - длины соответствующих поволоков, км; L_{24}, L_{67} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; V_{g1} - скорость распространения света в поволоках и направленных ответвителях.

Для затухания входного импульса справедливо:

$$a_{11} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24}, \quad (24)$$

где α_1 - коэффициент затухания для ВС, используемых в ОП1 - ОП3, НО1 и НО2, дБ; a_{pi} - потери в i -том разъеме, дБ; a_{24} - потери разделения в НО1.

Для времени задержки выходного импульса в данной оптической схеме справедливо:

$$t_{321} = \frac{L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (25)$$

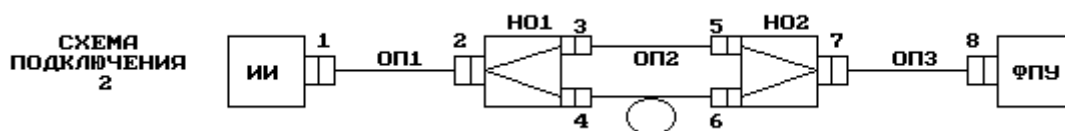
где L и V_g - длина исследуемого ВС (км) и скорость распространения света в нем (км/с), L_{23}, L_{57} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км.

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} + \alpha L, \quad (26)$$

где α - коэффициент затухания исследуемого ВС, дБ/км; α_{23} - потери разделения в НО1.

Схема подключения 2.



Для времени задержки входного импульса можно записать:

$$t_{312} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}}. \quad (27)$$

Затухание входного импульса в данной схеме определяется формулой:

$$a_{12} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23}. \quad (28)$$

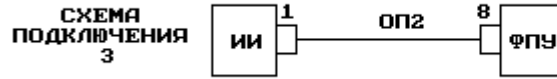
Время задержки выходного импульса в данной схеме можно определить по формуле:

$$t_{322} = \frac{L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}. \quad (29)$$

Затухание выходного импульса в данной схеме определяется формулой:

$$a_{22} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} + \alpha L. \quad (30)$$

Схема подключения 3.



Для времени задержки импульса в третьей схеме справедливо

$$t_{313} = \frac{L_2}{V_{g1}}. \quad (31)$$

Затухание импульса можно определить по формуле:

$$a_{13} = \alpha_1 L_2 + a_{p1} + a_{p8}. \quad (32)$$

Определение длины ВС.

Рассмотрим разность $t_{321} - t_{312}$. Из (18) и (20) с учетом (24) получим:

$$t_{321} - t_{312} = \frac{L}{V_g} - \frac{L_2}{V_{g1}} = \frac{L}{V_g} - t_{313} \quad (33)$$

Отсюда путем очевидных преобразований получаем:

$$L = (t_{321} - t_{312} + t_{313}) \cdot V_g \quad (34)$$

Определение затухания ВС.

В лабораторной работе Вы измеряете амплитуды входного и выходного импульсов в двух оптических схемах, т. е. величины:

$$\begin{aligned} U_{m1}^{1cx} &= U_{m0} 10^{-\frac{a_{11}}{10}} & U_{m2}^{1cx} &= U_{m0} 10^{-\frac{a_{21}}{10}} \\ U_{m1}^{2cx} &= U_{m0} 10^{-\frac{a_{12}}{10}} & U_{m1}^{2cx} &= U_{m0} 10^{-\frac{a_{22}}{10}} \end{aligned} \quad (35)$$

где U_{m0} - амплитуда импульса, формируемого на выходе источника излучения.

Эти величины следует пересчитать в затухание:

$$a_1 = 10 \lg \frac{U_{m1}^{1cx}}{U_{m2}^{1cx}} \quad a_2 = 10 \lg \frac{U_{m1}^{2cx}}{U_{m2}^{2cx}}. \quad (36)$$

С учетом выражений (26), (28), (30), (32) получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_{21} - a_{11} = (a_{p3} - a_{p4}) + (a_{p5} - a_{p6}) + \alpha_1 L_2 + \alpha L + \alpha_1 (L_{23} - L_{24}) + \alpha_1 (L_{57} - L_{67}) + (a_{23} - a_{24}) + (a_{57} - a_{67}) \\ a_2 &= a_{22} - a_{12} = (a_{p4} - a_{p3}) + (a_{p6} - a_{p5}) - \alpha_1 L_2 + \alpha L + \alpha_1 (L_{24} - L_{23}) + \alpha_1 (L_{67} - L_{57}) + (a_{24} - a_{23}) + (a_{67} - a_{57}) \end{aligned}$$

Складывая полученные таким образом величины, получаем:

$$a_1 + a_2 = 2\alpha L = 2a_{BC} \quad (37)$$

или, что то же самое:

$$a_{BC} = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (38)$$

Определение уширения импульса и межмодовой дисперсии ВС.

В лабораторной работе Вы измеряете длительности оптического импульса на входе t_1 и выходе t_2 ВС в двух оптических схемах. Уширение импульса можно определить по выражению:

$$\Delta t = \frac{(t_2 - t_1)_{1\text{сх}} + (t_2 - t_1)_{2\text{сх}}}{2}. \quad (39)$$

Межмодовая дисперсия определяется как уширение импульса на 1 км ВС, то есть может быть рассчитана по выражению:

$$D_M = \frac{\Delta t}{L}. \quad (40)$$

Выполнение работы.

1. Изучите материал разделов «Теоретические сведения», «Структурная схема лабораторной установки» и «Анализ оптической схемы. Экспериментальное определение длины ВС».

2. Заполните те ячейки таблицы 1 в столбце Исходные данные, которые соответствуют номеру Вашего варианта. Для получения этих данных нажмите клавишу F2. Остальные ячейки таблицы 1 будут заполнены позже в п. 5.

3. Вернитесь в методические указания (клавиша Del).

Таблица 1

Исходные данные							Результаты расчета				
Процент GeO ₂ в сердцеви-не ВС	λ , мкм	n_{10}	n_2	$dn_{10} / d\lambda$	$d\Delta / d\lambda$	q	n_{10g}	V_g , км/с	p	$q_{\text{опт}}$	$D_M \text{ min, пс/км}$
8.1	0.85										
	1.3										
11.0	0.85										
	1.3										
13.1	0.85										
	1.3										

3. Перейдите в программе на страницу «Экран осциллографа» (клавиша F4). Для входного и выходного импульсов измерьте по экрану осциллографа время задержки. Для проведения этих измерений необходимо установить начало переднего фронта импульса на середину экрана осциллографа. Измерения провести на длинах волн 0.85 и 1.3 мкм в трех оптических схемах при длительности импульса $t_{\text{и}} = 1$ нс. Результаты занесите в таблицу 2.

Рассчитайте по данным измерений длину ВС L и занесите ее в соответствующую графу таблицы 2

Таблица 2

Длительность импульса, нс	λ , мкм	Номер схемы	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс	L , км
1	0.85	1	-		
		2		-	
		3		-	
	1.3	1	-		
		2		-	
		3		-	

		3		-	
--	--	---	--	---	--

4. Проведите экспериментальное исследование зависимости затухания и дисперсии ВС от длительности импульса. Для указанных в таблице 3 длительностей импульса измерьте по экрану осциллографа амплитуды и длительности (по «подошве») входного и выходного импульсов. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Рассчитайте по результатам измерений уширение импульса Δt , межмодовую дисперсию D_m , затухание a_{bc} и коэффициент затухания α_{bc} . Результаты расчета занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Длительность импульса, нс	λ , мкм	№ схемы	Эксперимент				Расчет			
			U_{m1} , В	U_{m2} , В	t_1 , нс	t_2 , нс	Δt , нс	D_m , нс/км	$a_{ВС}$, дБ	$\alpha_{ВС}$, дБ/км
1	0.85	1								
		2								
3	0.85	1								
		2								
10	0.85	1								
		2								
30	0.85	1								
		2								
1	1.3	1								
		2								
3	1.3	1								
		2								
10	1.3	1								
		2								
30	1.3	1								
		2								

5. Проведите экспериментальное исследование зависимости затухания и дисперсии ВС от показателя степенного профиля. Для указанных в таблице значений показателя профиля q измерьте по экрану осциллографа амплитуду U_{m2} и длительность t_2 выходного импульса. Занесите результаты измерений в таблицу 4. В графу «форма» таблицы 4 занесите упрощенное изображение выходного импульса.

Все измерения проводятся в схеме 1 при длительности импульса 1 нс для двух источников излучения, работающих на длинах волн 1.3 и 0.85 мкм и трех вариантов химического состава сердцевины ВС. При изменении химического состава необходимо вернуться на страницу исходных данных и заполнить соответствующие строки таблицы 1.

6. Для каждого из химических составов сердцевины ВС на двух длинах волн определите оптимальное значение показателя степенного профиля $q_{\text{опт}}$. Для этого проанализируйте полученные значения t_2 и U_{m2} . $q_{\text{опт}}$ следует искать вблизи тех значений показателя степенного профиля, при которых получена минимальная длительность выходного импульса t_2 . Экспериментально определенное значение $q_{\text{опт}}$ занесите в последнюю графу таблицы 4. Для этого значения показателя степенного профиля измерьте амплитуду U_{m2} и длительность t_2 выходного импульса. Результаты измерений занесите в графу $q_{\text{опт}}$ таблицы 4.

Поскольку зависимость межмодовой дисперсии от показателя степенного профиля имеет острый минимум при $q = q_{\text{опт}}$ (рис. 8), установите несколько значений q , вблизи оптимального, и проведите для них измерения амплитуды U_{m2} и длительности t_2 выходного импульса. Результаты занесите в пустые графы таблицы 4.

7. Для каждого значения показателя степенного профиля в таблице 4 по результатам измерений рассчитайте межмодовую дисперсию и коэффициент затухания ВС. Необходимую для расчета длительность входного импульса возьмите из таблицы 3. Результаты расчетов занесите в таблицу 4.

8. По исходным данным из таблицы 1 рассчитайте групповой показатель преломления n_{10g} , групповую скорость V_g , параметр внеосевой дисперсии p , оптимальный показатель

степенного профиля $q_{\text{опт}}$ и минимально достижимую межмодовую дисперсию $D_{\text{м. min}}$. Сравните последние два параметра с экспериментально определенными в п. 6-7.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Теоретический расчет по п. 8 раздела «Выполнение работы» с указанием всех использованных формул и комментариями.
2. Заполненную таблицу 1.
3. Таблицу 2 с результатами измерений и расчета длины ВС.
4. Таблицу 3 с результатами измерений и расчетов.
5. Графики зависимостей $D_m(t_i)$ и $\alpha_{вс}(t_i)$ для двух источников излучения с длинами волн 0.85 и 1.3 мкм, построенные по таблице 3.
6. Таблицу 4 с результатами измерений и расчетов.
7. Графики зависимостей $D_m(q)$ и $\alpha_{вс}(q)$ для двух источников излучения с длинами волн 0.85 и 1.3 мкм при трех вариантах химического состава сердцевины ВС, построенные по таблице 4.
8. Формулы и комментарии, относящиеся к обработке результатов измерений в таблицах 2-4.
9. Выводы.

**Былина Мария Сергеевна
Глаголев Сергей Федорович**

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методические указания к лабораторным работам

Редактор

План 2017 г., п. ???

Подписано к печати 12.03.2012
Объем 7,75 усл.-печ. л. Тираж 105 экз. Заказ 145

Издательство СПбГУТ. 191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в