Министерство общего и профессионального
образования Российской Федерации

Российский государственный гидрометеорологический
университет

И. А. Степанюк

Информационно-измерительные системы в океанологии

Руководство к лабораторным работам

Утверждено ученым советом института
в качестве учебного пособия

Санкт-Петербург
1998

УДК 551.46

Степанюк И. А. Информационно-измерительные системы в океанологии. Руководство к лабораторным работам. Учебное пособие. — СПб: Изд. РГГМУ, 1998 — 90 с.

Приводятся описания методик выполнения лабораторных работ по курсу “Информационно-измерительные системы в океанологии”. В первой части рассматриваются работы по темам, включающим общие вопросы измерений и метрологические свойства океанологических измерительных систем, во второй — по темам, относящимся к информационным и техническим особенностям океанологических измерительных преобразователей.

Предназначено для студентов океанологических и экологических специальностей институтов и университетов.

Илл. 13, табл. 22.

Рецензенты: каф. океанологии ЛГУ;

Ковчин И. С. , д.т.н. (ААНИИ).

Оглавление

Предисловие

Учебный курс "Информационно-измерительные системы в океанологии" является весьма объемным, читается в настоящее время в течение трех семестров и разбит на соответствующие семестровые разделы. В первом разделе рассматриваются общие вопросы измерений и метрологические свойства океанологических измерительных систем, а также информационные и технические особенности океанологических измерительных преобразователей. Лабораторное сопровождение лекционных занятий включает как расчетные, так и экспериментальные работы в различных сочетаниях. Причем расчетные работы в качестве исходных данных, как правило, содержат экспериментальные результаты, особенно в тех случаях, когда получение таких результатов является весьма трудоемким делом и не может быть обеспечено в рамках лабораторных занятий.

Данное учебное пособие — это руководство к лабораторным работам первого раздела. В соответствии с тематикой раздела в пособии выделены две части. В первой части рассматриваются работы, связанные с изучением общих (работы № 1 и 2) и специфических (работы № 3 — 5) метрологических свойств океанологических измерительных систем. Во второй части дано описание работ по расчету и макетированию ряда океанологических преобразователей. Естественно, что лабораторными работами не могут сопровождаться все темы лекционного курса. В связи с этим в качестве тем лабораторных работ выбраны только такие, которые, по мнению автора, являются наиболее характерными и которым свойственна как бы некоторая преемственность (например, работы № 2 — 4 в первой части, работы № 1 — 3 во второй). Поскольку в рамках учебного курса невозможно обучить всему, что потенциально входит в данный курс, то подобный подход позволяет сместить акценты от решения конкретных задач (а приемы таких решений быстро меняются) в сторону обобщенных методик решения задач, что представляется автору значительно более важным.

Подавляющее большинство включенных в пособие работ являются весьма объемными. Выполнение всех 10 работ в течение одного семестра зависит от конкретного объема часов, выделяемых в рабочем учебном плане, и, как правило, является довольно проблематичным. Тем не менее, подобное "расширенное" пособие получается очень удобным в использовании, так как позволяет не только осуществлять выбор наиболее целесообразных, по мнению преподавателя, работ, но и рекомендовать для разных групп студентов разные сочетания работ.

Кроме того, некоторые работы (№ 5 в первой части) либо сочетания работ (например, № 3 и № 4 в первой части) с существенно расширенными объемами расчета и соответственно анализа могут быть предложены в качестве стандартных тем курсовых проектов. При этом исходные данные формируются в виде отдельного пакета и являются индивидуальными для каждого проекта.

Структура описания каждой лабораторной работы традиционная. Особенностью является лишь то, что часть расчетных формул дается без вывода, сами же выводы предлагается сделать студентам самостоятельно. Это представляется весьма важным, поскольку вынуждает студентов активно усваивать сущность изучаемых методик. Той же цели служит предлагаемая в некоторых работах обязательная проверка размерностей использованных формул.

Число вариантов исходных данных в каждой работе ограничено, поскольку они предназначены для студентов ФЗО, а также для тех студентов очной формы обучения, которые по каким-либо причинам остались вне сетки учебных занятий.

Отчеты по лабораторным работам оформляются так же, как и в других учебных курсах, и обязательно содержат физический анализ полученных результатов.

Кроме сказанного, следует еще отметить, что в учебном пособии части 1 и 2 являются полностью самостоятельными и по- этому содержат самостоятельную нумерацию формул и рисунков. Это не может создавать каких-либо неудобств при использовании, ибо в тексте применяются ссылки на формулы и рисунки только из своей части. Но подобное разделение оказалось весьма удобным при подготовке рукописи, и автор счел возможным его оставить при окончательном редактировании.

Часть 1. Метрологические свойства океанологических средств и методов измерений

Лабораторная работа № 1

Оценка основной погрешности средств измерений по результатам испытаний

Литература

1. *Степанюк И. А.* Океанологические измерительные преобразователи. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 7—8.

2. *Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф.* Качество измерений. Метрологическая справочная книга. — Л.: Лениздат, 1987, с. 194 — 215.

Общие пояснения

При нормировании метрологических характеристик средств измерений по результатам испытаний действующий ГОСТ регламентирует два вида моделей погрешности:

— **модель 1**

$$(\Delta_{м1})_1 = \Delta_{os} * \overset{0}{\Delta}_o * \overset{0}{\Delta}_{он} * \sum_{i=1}^{l} \Delta c_i * \Delta_{gн} \qquad (1.1)$$

где Δ_{os} — систематическая составляющая основной погрешности;

$\overset{0}{\Delta}_o$ — случайная составляющая основной погрешности;

$\overset{0}{\Delta}_{он}$ — случайная составляющая основной погрешности, обусловленная гистерезисом; $\sum_{i=1}^{l} \Delta c_i$ — объединение дополнительных погрешностей, обусловленных действием влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала; l — число дополнительных погрешностей; $\Delta_{gн}$ — динамическая погрешность;

— модель 2

$$(\Delta_{м1})_2 = \Delta_o * \sum_{i=1}^{l} \Delta c_i * \Delta_{gн} \qquad (1.2)$$

где Δ_o — основная погрешность средства измерений без разделения на составляющие. Символ <<*>> в приведенных выражениях означает объединение погрешностей.

При выборе модели учитывается большое число факторов (технических, экономических и т. д.) и здесь невозможно их проанализировать. При метрологических испытаниях океанологических средств измерений часто приходится пользоваться второй моделью. В частности, это характерно для внутриведомственных испытаний, проводимых в натурных условиях. В качестве примера можно сослаться на методику проведения испытаний гидрозонда, в соответствии с которой по результатам вертикального зондирования выявляется однородный слой, а затем в этом слое выполняются совместные измерения с помощью эталонных приборов и испытываемого гидрозонда. Несомненно, что проведение подобных экспериментов является технически не простым и довольно дорогим делом. Поэтому разделение получаемой основной погрешности на составляющие с помощью дополнительных технических приемов оказывается непозволительной "роскошью". При этом выбор глубинного однородного слоя позволяет пренебречь, во-первых, $\Delta_{gн}$, поскольку режим измерений оказывается статическим, а во-вторых — пренебречь объединением дополнительных погрешностей $\sum_{i=1}^{l} \Delta c_i$ в силу того, что при испытаниях выдерживаются *нормальные условия.*

Целью работы является изучение методики оценивания основной погрешности по данным результатов испытаний гидрозонда.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

В соответствии с ГОСТом при оценивании погрешностей принято использовать семь стандартных видов аппроксимации закона распределения: нормальный, равномерный, трапециевидный, Релея, треугольный (Симпсона), антимодальный 1 и антимодальный 2.

Для "чисто" случайных погрешностей характерен, как правило, нормальный закон распределения. Все остальные законы как бы отражают различные "искажения случайности". Например, подобные искажения вносит нелинейность функции преобразования ОИП, способная преобразовать нормальный закон в закон Релея.

Наиболее хорошо отработаны методы статистических оценок в предположении нормальности распределения погрешностей. Поэтому, чтобы ими воспользоваться, сначала необходимо определить соответствие экспериментального распределения нормальному закону.

В ряду экспериментальных данных x_i выделяют x_{max} и x_{min}. Выбирают число интервалов и ширину интервала. При числе экспериментальных данных от 40 до 100 рекомендуемое число интервалов $r = 7 \div 9$. Ширину интервала h задают по формуле:

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{r}$$

и вычисленное значение округляют.

Установив границы интервалов, подсчитывают количество экспериментальных данных, попавших в каждый интервал. Для предварительной оценки вида распределения строят гистограмму (в виде прямоугольников) и на ее основе — полигон распределения, соединяя середины интервалов отрезками прямых линий (рис.1.1).

По гистограмме и полигону возможна лишь качественная оценка вида распределения. Более строгая проверка гипотезы о соответствии экспериментального распределения теоретическому проводится с помощью специальных критериев. Наиболее эффективными считаются критерий Колмогорова, ω – критерий и χ^2 - критерий (критерий Пирсона).

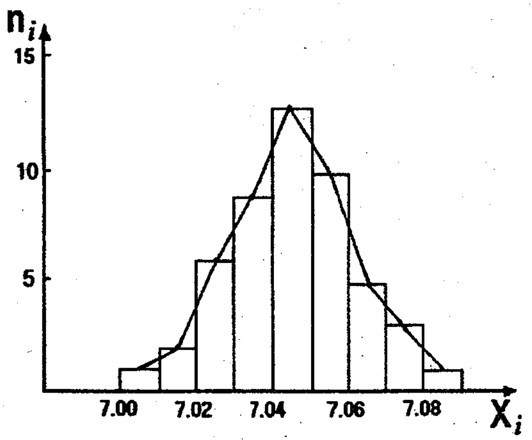


Рис.1.1 Вид гистограммы и полигона распределения

Для метрологических оценок обычно используют критерий Пирсона при числе экспериментальных данных $n \geq 50$ и так называемый *составной критерий* (при $10 \leq n \leq 50$). Рассмотрим применение критерия Пирсона.

По рассчитанной гистограмме определяют так называемые эмпирические частоты $n_э$, соотносимые к середине z_{io} каждого интервала. Величина $n_э$ равна тому числу значений исходного ряда x_i, которое попало в данный интервал. Определяют также среднее арифметическое $\overline{A}$ исходного ряда, а также среднее квадратическое отклонение S.

Затем для каждого интервала рассчитывают значения теоретических частот

$$n_i = \frac{nh}{S}\varphi(z_i), \tag{1.3}$$

где $\varphi(z_i)$ — теоретическая функция плотности распределения.

При оценках погрешностей наиболее характерным считается их распределение по нормальному закону. Для этого случая можно использовать табулированные значения $\varphi(z_i)$ из справочников либо рассчитать их по формуле

$$\varphi(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{z_i^2}{2}). \qquad (1.4)$$

Параметр z_i определяют по выражению

$$z_i = \frac{x_{io} - \bar{A}}{S}, \qquad (1.5)$$

где x_{io} — середина интервала.

Результаты всех вычислений наиболее целесообразно свести в таблицу (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Номер интервала i	Середина интервала x_{io}	Число данных в интервале $n_э$	$x_{io} - \bar{A}$	$z_i = \frac{x_{io} - \bar{A}}{S}$	n_i	χ_i^2
1 2 3						
:	:	:	:	:	:	:
Сумма		....	0.0	0.0	....	....
$\bar{A}$ = ... S=						

Значение χ_i^2 для каждого интервала определяют по формуле

$$\chi_i^2 = \frac{(n_э - n_i)^2}{n_i}. \qquad (1.6)$$

Просуммировав χ_i^2 по всем r интервалам, получают результирующее значение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{r}[\frac{(n_э - n_i)^2}{n_i}] \qquad (1.7)$$

с определенным числом степеней свободы f.

Для нормального распределения

$$f = r - 3. \qquad (1.8)$$

Выбрав уровень значимости q, по таблице распределения χ^2 (табл. 1.2) находят нижнюю $\chi_н^2$ и верхнюю $\chi_в^2$ границы. Гипотеза о соответствии экспериментального распределения теоретическому подтверждается, если рассчитанное по (1.7) значение χ^2 попадает в интервал от $\chi_н^2$ до $\chi_в^2$, т. е. $\chi_н^2 < \chi^2 < \chi_в^2$

Таблица 1.2

Уровень значимости		Число степеней свободы f					
		4	6	8	10	12	14
$1 - q/2$	0.99	0.30	0.87	1.65	2.56	3.57	4.66
	0.95	0.71	1.64	2.73	3.94	5.23	6.57
	0.90	1.06	2.20	3.49	4.86	6.30	7.79
$q/2$	0.10	7.78	10.64	13.36	15.99	18.55	21.06
	0.05	9.49	12.59	15.51	18.31	21.03	23.68
	0.01	13.28	16.81	20.09	23.21	26.22	29.14

В качестве примера зададимся уровнем значимости $q = 0.1$ при $f = 6$. Соответственно $\chi_н^2 = 1.64$, $\chi_в^2 = 12.59$.

При числе измерений $n < 10$ проверка гипотезы о виде экспериментального распределения считается невозможной. В реальных условиях может получиться, например из-за высокой стоимости проводимых метрологических испытаний, что необходимо ограничиваться малым n. В таком случае хотя бы в одном эксперименте из серии испытаний получают увеличенное число данных и выявляют вид распределения, а в остальных экспериментах этой серии, где $n<10$, считают вид распределения таким же. Несомненно, что это правомочно только тогда, когда все эксперименты проводятся в одних и тех же условиях.

При числе данных $10 \le n \le 50$ проверка соответствия теоретическому распределению осуществляется с помощью так называемого *составного критерия*, состоящего из двух отдельных частных критериев. Если гипотеза о нормальности отвергается хотя бы по одному из частных критериев, то ее отвергают полностью, и экспериментальное распределение считают отличным от нормального.

Критерий 1. Вычисляют значение d по формуле

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \left(x_i - \overline{A} \right) \right|}{nS^*} \qquad (1.9)$$

где S^* — смещенное среднее квадратическое отклонение. Его определяют по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{A})^2}{n}}. \qquad (1.10)$$

Гипотеза о нормальности может быть подтверждена, если

$$d_н < d < d_в, \qquad (1.11)$$

где $d_н$ — нижнее значение d — распределения; $d_в$ — его верхнее значение.

Значения $d_н$ и $d_в$ находят из табл. 1.3, задаваясь требуемым уровнем значимости q. При этом $d_н$ находят из верхней части таблицы ($1 - q/2$), а $d_в$ — из нижней части ($q/2$).

Таблица 1.3

Уровень значимости		Число степеней свободы f								
		11	16	21	26	31	36	41	46	51
$1-q/2$	0.99	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.72	0.72	0.73
	0.95	0.72	0.72	0.73	0.74	0.74	0.74	0.75	0.75	0.75
	0.90	0.74	0.74	0.75	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
$q/2$	0.10	0.89	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84
	0.05	0.91	0.89	0.88	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85
	0.01	0.94	0.91	0.90	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86

Критерий 2. Гипотеза о соответствии нормальному распределению подтверждается, если не более m разностей $(x_i - \overline{A})$ превысили значение $(S \cdot z_{p/2})$. Значение S вычисляют по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{A})^2}{n-1}}. \qquad (1.12)$$

Величина $z_{p/2}$ — это верхняя P — процентная точка нормированной функции Лапласа. Она определяется по табл. 1.5. Однако, чтобы ее определить, сначала необходимо найти значение доверительной вероятности P. Его находят в табл. 1.4 по входным аргументам: числу данных n и уровню значимости q.

Таблица 1.4

$q/2$	n								
	10	11-14	15-20	21,22	23	24-27	28-32	33-35	36-49
	$m=1$			$m=2$					
0.01	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
0.02	0.98	0.98	0.99	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.99
0.05	0.96	0.97	0.98	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98

Параметр m может принимать два значения $m = 1$ и 2. Значение $m = 1$ используют при $10 \le n \le 20$, а $m = 2$ — при $20 < n < 50$. Например, при уровне значимости $q = 1$, и $n = 20$ значение доверительной вероятности $P = 0.98$.

Таблица. 1.5

P	0.90	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
$z_{p/2}$	1.65	1.96	2.06	2.17	2.33	2.58

Пример применения критерия. Имеем ряд с числом данных n=20 и несмещенной оценкой среднего квадратического отклонения $S = 3.245$. Зададим уровень значимости $q = 0.1$, тогда $P = = 0.98$, а $z_{p/2} = 2.33$. Произведение $S \times z_{p/2} = 3.245 \times 2.33 = 7.561$. По условию для подтверждения нормальности необходимо, чтобы не более одной разности $(x_i - \overline{A})$ превзошло значение 7.561.

Результирующий уровень значимости составного критерия $q_\Sigma \le (q_1 + q_2)$, где q_1 и q_2 — уровни значимости использованные при расчете критерия 1 (q_1) и критерия 2 (q_2).

Кроме проверки нормальности, а в более общем случае — соответствия экспериментального распределения теоретическому, первичная обработка данных содержит анализ и исключение грубых погрешностей.

Резко выделяющиеся значения $x_{\max}$ из анализируемого ряда содержит грубую погрешность, если выполняется условие

$$z_{\max} > z_T, \tag{1.13}$$

где

$$z_{\max} = \frac{\left| x_{\max} - \overline{A} \right|}{S}. \tag{1.14}$$

Критерий z_T при числе данных $n \geq 50$ может быть определен по формуле

$$z_T = z_{p/2}\sqrt{1 - \frac{1}{n}}. \qquad (1.15)$$

Значение $z_{p/2}$ находят из табл. 1.5, задаваясь значением доверительной вероятности P.

При $n<50$ значение z_T находят по таблице нормированного выборочного отклонения, имеющейся в рекомендованной литературе. Здесь эта таблица не воспроизводится, поскольку для выполнения лабораторной работы она не требуется.

После описанной первичной обработки данных производится окончательная оценка основной погрешности. При этом используются вычисленные для экспериментального ряда значения S и $\overline{A}$.

Полученную разность между $\overline{A}$ и аналогичным значением по эталонному прибору ($t_э$) учитывают при построении градуировочной кривой и соответственно при обработке результатов всех последующих измерений, выполняемых с помощью аттестуемого прибора. Если ее не корректировать, например путем введения поправки, то она должна рассматриваться как систематическая погрешность. Наоборот, при ее коррекции преобладающей составляющей основной погрешности становится случайная погрешность. Дело в том, что в таком случае соотношение этих составляющих, как правило, соответствует неравенству

$$\frac{\Delta_{os}}{0} < 0.8, \qquad (1.16)$$

$$\Delta_o$$

при котором неисключенными остатками систематической составляющей Δ_{os} можно пренебречь.

При пренебрежении Δ_{os} оценка доверительных границ основной погрешности при соответствии экспериментальных данных нормальному закону может быть сделана по формуле

t_s = 2,[illegible]

$$\overset{0}{\Delta}_o = \Delta_o = \pm t_s \cdot S, \tag{1.17}$$

S = 0,27416

где t_s — коэффициент Стьюдента; S — оценка среднего квадратического отклонения.

Коэффициент t_s определяется по табл. 1.6 по требуемой доверительной вероятности P и числу степеней свободы $f = n - 1$.

Таблица 1.6

Доверительная вероятность P	Число степеней свободы $f = n - 1$								
	6	8	10	12	18	22	30	40	60
0.90	1.94	1.86	1.81	1.78	1.73	1.72	1.70	1.68	1.67
0.95	2.45	2.31	2.23	2.18	2.10	2.07	2.04	2.02	2.00
0.99	3.71	3.36	3.17	3.06	2.88	2.82	2.75	2.70	2.66

Если экспериментальные данные соответствуют закону распределения, отличающемуся от нормального, то оценки производятся по другим правилам. Эти правила рассмотрены в рекомендованной литературе.

В задачи лабораторной работы входит :

— изучение методики первичной обработки экспериментальных данных, полученных при метрологическом исследовании канала температуры гидрофизического зонда; проверка соответствия данных нормальному закону распределения с помощью критерия χ^2 (Пирсона);

— изучение методики исключения грубых погрешностей из экспериментального ряда;

— изучение методики проверки соответствия нормальному закону "усеченного" экспериментального ряда с использованием составного критерия;

— определение доверительных границ основной погрешности для полного и “усеченного” рядов;

— анализ полученных результатов.

Исходные данные

В качестве исходных данных в табл. 1.7 приведены ряды отсчетов по каналу температуры гидрофизического зонда x_i при различных значениях температуры по эталонному прибору $t_э$.

Студенты ФЗО из приведенных 10 вариантов используют вариант, номер которого совпадает с последней цифрой номера их зачетной книжки.

При всех расчетах необходимо задавать уровень значимости q = 0.10. При расчете основной погрешности задавать доверительную вероятность $P = 0.95$.

Таблица 1.7

	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_э$	8.06	7.27	8.55	7.14	8.45	7.38	7.97	6.84	9.66	7.75
x_1	8.07	7.24	8.53	7.17	8.48	7.34	7.93	6.83	9.71	7.74
x_2	8.09	7.25	8.54	7.13	8.50	7.31	7.91	6.88	9.62	7.75
x_3	8.07	7.22	8.57	7.19	8.48	7.40	7.99	6.86	9.65	7.80
x_4	8.04	7.26	8.59	7.14	8.45	7.35	7.94	6.82	9.68	7.71
x_5	8.11	7.28	8.53	7.17	8.52	7.32	7.97	6.85	9.70	7.78
x_6	8.02	7.23	8.58	7.07	8.43	7.38	7.97	6.84	9.61	7.75
x_7	8.05	7.29	8.66	7.14	8.46	7.35	7.94	6.83	9.64	7.72
x_8	8.08	7.27	8.52	7.19	8.49	7.36	7.99	6.84	9.97	7.81
x_9	8.10	7.24	8.55	7.21	8.51	7.38	7.93	6.87	9.69	7.74
x_{10}	8.01	7.23	8.54	7.13	8.42	7.32	8.01	6.89	9.67	7.77
x_{11}	8.03	7.21	8.57	7.12	8.44	7.41	7.92	6.81	9.63	7.79
x_{12}	8.04	7.30	8.59	7.18	8.45	7.33	7.98	6.90	9.68	7.77

	0	1	2	3	4	5	6	7		
x_{13}	8.07	7.28	8.57	7.16	8.48	7.39	7.96	6.98	9.66	7.73
x_{14}	8.09	7.45	8.54	7.15	8.50	7.34	7.95	6.88	9.62	7.74
x_{15}	8.03	7.22	8.61	7.18	8.44	7.37	7.98	6.85	9.65	7.77
x_{16}	8.08	7.31	8.52	7.12	8.49	7.37	7.92	6.82	9.64	7.79
x_{17}	8.06	7.24	8.55	7.15	8.47	7.34	7.95	6.91	9.63	7.73
x_{18}	8.02	7.27	8.58	7.20	8.43	7.39	8.00	6.84	9.64	7.78
x_{19}	8.05	7.29	8.60	7.11	8.46	7.37	7.91	6.87	9.67	7.76
x_{20}	8.04	7.27	8.41	7.14	8.45	7.33	7.94	6.89	9.69	7.72
x_{21}	8.11	7.23	8.54	7.17	8.42	7.33	7.94	6.87	9.61	7.75
x_{22}	8.02	7.24	8.60	7.19	8.51	7.34	7.95	6.83	9.70	7.74
x_{23}	8.05	7.27	8.55	7.17	8.49	7.37	7.92	6.84	9.68	7.81
x_{24}	8.08	7.29	8.58	7.14	8.46	7.39	7.96	6.87	9.65	7.72
x_{25}	8.10	7.23	8.52	7.21	8.43	7.33	7.98	6.89	9.62	7.75
x_{26}	8.01	7.28	8.56	7.12	8.52	7.38	7.93	6.83	9.71	7.78
x_{27}	8.07	7.26	8.55	7.15	8.45	7.36	7.99	6.88	9.67	7.80
x_{28}	8.09	7.22	8.52	7.18	8.48	7.32	7.97	6.86	9.69	7.71
x_{29}	8.07	7.25	8.58	7.20	8.50	7.35	7.94	6.82	9.67	7.74
x_{30}	8.04	7.24	8.53	7.11	8.48	7.34	7.93	6.85	9.64	7.77
x_{31}	8.03	7.27	8.61	7.13	8.44	7.31	7.97	6.84	9.63	7.77
x_{32}	8.04	7.29	8.54	7.14	8.45	7.40	7.99	6.87	9.94	7.79
x_{33}	8.07	7.27	8.59	7.17	8.45	7.38	7.97	6.89	9.67	7.73
x_{34}	8.04	7.24	8.57	7.19	8.46	7.35	7.94	6.87	9.69	7.79
x_{35}	8.04	7.31	8.57	7.13	8.43	7.32	8.01	6.84	9.63	7.78
x_{36}	8.05	7.22	8.59	7.18	8.47	7.41	8.15	6.91	9.68	7.77
x_{37}	8.02	7.25	8.54	7.16	8.49	7.34	7.92	6.82	9.66	7.74
x_{38}	8.06	7.28	8.53	7.12	8.44	7.37	7.95	6.85	9.62	7.73
x_{39}	8.08	7.30	8.57	7.15	8.50	7.39	7.98	6.88	9.65	7.78
x_{40}	8.03	7.21	8.51	7.14	8.48	7.37	8.00	6.90	9.64	7.76

0 1 2 3 4 5 6 7

x_{41}	8.09	7.27	8.60	7.17	8.46	7.33	7.91	6.81	9.62	7.72
x_{42}	8.20	7.23	8.55	7.13	8.50	7.34	7.93	6.84	9.91	7.75
x_{43}	8.07	729	8.54	7.19	8.44	7.35	7.94	6.85	9.64	7.55
x_{44}	8.04	7.24	8.52	7.14	8.43	7.34	7.97	6.82	9.67	7.74
x_{45}	8.03	7.27	8.56	7.15	8.15	7.32	7.99	6.86	9.69	7.75
x_{46}	8.07	7.27	8.58	7.16	8.44	7.36	7.93	6.88	9.67	7.72
x_{47}	8.09	7.24	8.53	7.20	8.51	7.38	7.98	6.63	9.63	7.81
x_{48}	8.04	7.29	8.59	7.15	8.47	7.33	7.96	6.89	9.64	7.74
x_{49}	8.11	7.31	8.54	7.14	8.47	7.39	7.92	6.83	9.67	7.78
x_{50}	8.02	7.28	8.57	7.15	8.42	7.37	7.95	6.84	9.69	7.80
x_{51}	8.05	7.26	8.54	7.11	8.40	7.34	7.94	6.87	9.66	7.71

Порядок выполнения работы

1. В ряду экспериментальных данных выделить x_{max} и x_{min} и рассчитать ширину интервала h.
2. Установить границы интервалов и определить экспериментальные частоты $n_э$ — число данных, попадающих в каждый из интервалов.
3. Построить гистограмму и полигон распределения.
4. Рассчитать среднее арифметическое значение $\overline{A}$ и среднее квадратическое отклонение S (формула 1.12).
5. Расчитать значения теоретических частот n_i и значения χ_i^2 для каждого интервала. Расчеты свести в таблицу вида табл. 1.1.
6. Определить результирующее значение χ^2 по формуле (1.7) и по табл. 1.2 найти верхнюю $\chi_в^2$ и нижнюю $\chi_н^2$ границы распределения. Уровень значимости задать q = 0.10.
7. Сократить исходный ряд до 20 первых значений (от x_1 до x_{20}). Рассчитать для этого усеченного ряда новое значение $\overline{A}$.

8.Применить критерий 1 для оценки соответствия “усеченного” ряда нормальному распределению. Для этого воспользоваться выражениями (1.9), (1.10), (1.11) и табл. 1.3. Задать уровень значимости q = 0.05.

9.Применить критерий 2 для оценки соответствия нормальному закону. Для этого воспользоваться выражением (1.12) и табл. 1.4, 1.5. Задать уровень значимости q = 0.05.

10.Сравнить результаты проверки соответствия нормальному закону полного и “усеченного” рядов.

11.Выявить в данных полного ряда значения, возможно, содержащие грубую погрешность. Проверить эти значения по критерию (1.13) с использованием выражений (1.14) и (1.15) и табл. 1.5. Если гипотеза подтверждается, то исключить эти значения из ряда.

12.Определить разность между $\overline{A}$ для полного ряда и $t_э$ и отразить в анализе результатов.

13.Определить основную погрешность Δ_o по выражению (1.17) с использованием табл.1.6. Задать доверительную вероятность 0.95.

14. Проанализировать полученные результаты.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) гистограмма и полигон распределения (на одном графике);
2) таблица расчетов по форме табл. 1.1;
3) таблицы расчетов в соответствии с пунктом “Порядок выполнения работы”;
4) анализ полученных результатов; наиболее целесообразно выполнять анализ одновременно с расчетами и представлять их в отчете совместно (расчет — выводы, новые расчеты — снова выводы и т. д.) .

Примечание: Поскольку в исходных данных указана разрешающая способность до второго знака после запятой, т. е. до 0.01К, то все расчеты, т. е. $\overline{A}$, S , S^* и т. д. также ведутся с такой же разрешающей способностью.

Лабораторная работа № 2

Метрологическая оценка динамических свойств океанологических измерительных преобразователей (ОИП)

Литература

Степанюк И. А. Океанологические измерительные преобразователи. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 8 — 12.

Общие пояснения

Динамические свойства ОИП включают понятия: *полная динамическая характеристика* (ДХ) и *частная динамическая характеристика.* Под полной ДХ обычно понимают *передаточную функцию* $F(i\omega)$, которая в свою очередь разделяется на *амплитудно-частотную характеристику* (АЧХ), являющуюся модулем передаточной функции ($|F(i\omega)|$), и *фазо-частотную характеристику* (ФЧХ).

Под частной ДХ обычно понимают конкретные величины, например значение *постоянной времени* τ_e либо значение частоты среза $f_{ср} = \dfrac{1}{2\pi\tau_e}$ (для ОИП с динамическими свойствами 1-го порядка); значения *всех* постоянных времени τ_{e1}, τ_{e2} и т. д. (для ОИП со свойствами 2-го порядка и выше) и другие величины в зависимости от вида ОИП и особенностей динамических свойств.

При метрологических исследованиях динамических свойств ОИП, как правило, определяют частную ДХ. Для каждого вида ОИП определение ДХ производится с помощью специальных измерительных установок. В этих установках реализуются два основных принципа:

1) измерения постоянной времени τ_e путем создания скачкообразного входного сигнала с последующей регистрацией выходного сигнала;

2) измерения значений АЧХ в диапазоне искусственно задаваемых дискретных частот изменчивости входного сигнала.

Несомненно, что основная трудность при реализации этих принципов состоит в формировании требуемого по условиям входного сигнала.

Скачкообразный сигнал в простейшем случае формируют перемещением ОИП из объема воды со значением измеряемой величины X_1 в объем, где значение соответствует X_2. Несомненно, что подобное перемещение не может быть мгновенным. Для практических целей достаточно, если длительность $\Delta\tau'$ процесса перемещения существенно меньше ожидаемого значения τ_e, например $\Delta\tau' \approx 0.1\,\tau_e$.

При прямых измерениях значений АЧХ необходимо формирование гармонических входных сигналов в широком диапазоне частот. Для многих ОИП техническая реализация этого требования является очень сложной. Причем единых решений нет. В каждом конкретном случае применяют способ, специфический для данного вида ОИП.

В лабораторной работе изучается методика метрологических оценок АЧХ при прямых измерениях постоянной времени τ_e. В качестве примера аттестуемого ОИП взят первичный преобразователь температуры морской воды.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Динамические свойства ОИП описываются с помощью линейных (в некоторых сравнительно редких случаях — нелинейных) дифференциальных уравнений. Свойства преобразователя температуры, взятого здесь в качестве примера, обычно описываются уравнением вида

$$\frac{dY(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\tau_e}\left[X(\tau) - Y(\tau)\right], \qquad (2.1)$$

где $Y(\tau)$ — сигнал на выходе ОИП; $X(\tau)$ — сигнал (температура морской воды) на входе ОИП; τ_e — постоянная времени ОИП.

При этом предполагается, что в статическом режиме $X = Y$, т. е. сигнал на выходе ОИП, какой бы он ни был — напряжение, сопротивление и т. д., — переведен в единицы величины X, в данном случае температуры.

Вид передаточной функции можно получить, решая уравнение (2.1) для гармонического входного сигнала:

$$X(\tau) = X_m \exp(i\omega\tau). \tag{2.2}$$

Решение ищем в виде

$$Y(\tau) = F(i\omega)X(\tau), \tag{2.3}$$

где $F(i\omega)$ — передаточная функция.

Поскольку

$$\frac{dY(\tau)}{d\tau} = (i\omega)\left[F(i\omega)X(\tau)\right], \tag{2.4}$$

то, подставив (2.2 — 2.4) в уравнение (2.1), получим

$$F(i\omega) = \frac{1}{1 + i\omega\tau_e}. \tag{2.5}$$

При этом амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) будет следующей:

$$\text{АЧХ} = |F(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau_e^2}} \tag{2.6}$$

(Выражения (2.5) и (2.6) студенты должны получить самостоятельно).

При скачкообразном входном сигнале ставятся следующие условия:

$$X(\tau)\Big|_{\tau<\tau_o} = Y(\tau)\Big|_{\tau<\tau_o} = X_1;$$

$$X(\tau)\Big|_{\tau\geq\tau_o} = X_2. \qquad (2.7)$$

Решение уравнения (2.1) для $\tau > \tau_o$ получается следующим:

$$Y(\tau) = X_2 + (X_1 - X_2)\exp(-\frac{\tau-\tau_o}{\tau_e}). \qquad (2.8)$$

Отсюда следует, что при $(\tau-\tau_o) = \tau_e$

$$Y(\tau) - X_2 = \frac{X_1 - X_2}{e}. \qquad (2.9)$$

В соответствии с выражением (2.9) формулируется определение понятия “постоянная времени”.

Постоянная времени — это такой интервал времени, за который при скачкообразном изменении входного сигнала исходная разность между выходным сигналом ОИП и изменившимся значением входного сигнала уменьшится в “e” раз.

При измерении постоянной времени ОИП производится непрерывная (либо дискретная через интервал, существенно меньший, чем τ_e) регистрация выходного сигнала ОИП, т.е. $Y(\tau)$. При этом, как следует из выражений (2.8) и (2.9), для случая скачкообразного сигнала не имеет никакого значения — пересчитываются ли значения

$Y(\tau)$ в единицы входного сигнала X или не пересчитываются. Ведь в соответствии с (2.8) выходной сигнал $Y(\tau)$ *асимптотически* приближается к *своему* новому значению. В данном случае оно равно X_2, но может быть выражено также и в единицах Y .

Также нет необходимости контролировать значения X_1 и X_2 и задавать какую-либо конкретную величину "скачка" $(X_1 - X_2)$. Как следует из решений (2.8) и (2.9), определяемое значение τ_e не зависит от "скачка" и конкретных значений X_1 и X_2. Единственное, что следует иметь в виду, — с уменьшением разности $(X_1 - X_2)$ возрастает погрешность определения τ_e.

При реальных метрологических испытаниях ОИП производятся многократные определения τ_e с последующей статистической обработкой ряда полученных значений. Задача лабораторной работы существенно упрощена. Здесь предлагается всего лишь один ряд экспериментально полученных значений $Y(\tau)$, выраженных в виде напряжения постоянного тока. По этим данным необходимо определить значение τ_e.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 2.1, варианты 0÷9. Каждый ряд экспериментальных значений $Y(\tau)$ в мВ содержит отсчеты в моменты времени $(\tau - \tau_o)$ в секундах (с), при этом скачкообразный входной сигнал $X(\tau)$ сформирован, естественно, в момент $(\tau - \tau_o) = 0$.

Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Таблица 2.1

$\tau-\tau_o$	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—1	16.0	14.0	30.8	20.8	11.2	11.0	19.9	12.9	10.1	18.0
0	16.1	13.9	31.0	21.0	11.0	11.0	20.0	13.0	10.2	17.9
1	24.4	24.7	37.5	30.9	18.9	17.7	29.6	23.0	21.9	26.1
2	32.4	34.2	43.3	39.2	26.0	23.7	38.2	31.7	32.1	33.1
3	39.1	42.3	48.7	46.5	32.3	29.5	46.7	39.4	41.5	39.5
4	45.6	49.3	53.5	53.0	38.2	34.9	54.0	46.7	49.3	45.7
5	50.5	54.8	58.2	58.0	44.0	39.7	60.7	52.4	56.4	50.4
6	55.2	60.0	61.7	62.5	49.1	43.9	67.1	57.9	62.1	55.3
7	59.8	64.4	65.7	66.5	53.2	47.5	73.2	62.7	67.5	59.6
8	63.7	68.2	68.7	69.7	57.2	51.2	78.5	66.9	72.5	63.5
9	66.9	71.7	71.3	72.2	61.0	54.7	83.5	70.3	76.3	66.7
10	69.7	74.5	74.0	74.7	64.6	57.7	87.9	73.5	80.2	69.8
12	75.0	78.9	78.3	78.6	70.1	62.5	95.7	79.2	85.7	74.9
14	79.2	82.4	82.0	81.3	75.1	67.0	102.7	83.2	90.2	79.0
16	82.2	84.7	85.0	82.9	79.0	70.8	108.7	86.4	93.8	82.5
18	84.5	86.7	87.5	84.2	82.1	73.7	113.0	89.1	96.6	84.9
20	86.4	88.0	89.7	85.1	85.3	76.3	117.2	91.0	98.6	87.2
25	89.8	90.3	93.2	86.9	89.9	80.7	125.4	94.2	101.5	90.7
30	91.7	91.0	94.7	87.7	93.1	83.8	130.4	96.0	103.3	92.8
35	92.7	91.4	96.2	87.8	94.5	85.8	133.4	96.9	104.1	94.0
40	93.1	91.8	96.7	87.8	96.0	86.9	135.6	97.6	104.5	95.2
50	93.9	92.0	97.5	88.0	97.1	88.3	138.0	97.7	104.7	95.8
60	93.8	91.9	97.9	88.0	97.6	88.7	139.3	97.9	105.0	95.9
70	94.0	92.2	98.1	88.1	97.8	88.8	139.7	98.1	104.8	96.2
80	93.9	91.8	98.0	88.0	98.0	88.8	139.9	98.0	105.0	96.1
90	94.1	92.0	98.0	88.1	97.9	89.0	140.0	98.1	105.1	96.0
100	94.0	92.1	97.9	88.0	98.0	89.0	140.1	97.9	105.0	96.2

Порядок выполнения работы

1. Построить график изменчивости $Y(\tau)$ по исходным данным.

2. Определить на графике значение X_1 и X_2.

3. На основании выражения (2.9), используя график, определить значение постоянной времени τ_e. Это делается следующим образом. Сначала вычисляют значение

$$Y(\tau)\Big|_{(\tau-\tau_o)=\tau_e} = X_2 + \frac{X_1 - X_2}{e};$$

а затем находят по графику величину $(\tau-\tau_o)$, соответствующую данному значению $Y(\tau)$.

4. Используя полученное значение τ_e, рассчитать теоретическую изменчивость $Y(\tau)$. Расчеты вести по выражению (2.8).

5. Определить отклонения экспериментальной изменчивости $Y(\tau)$ от теоретической, получив ряд значений

$$\Delta_Y = Y_{эк} - Y_{теор}$$

для каждой точки $(\tau-\tau_o)$.

6. Определить оценку математического ожидания M_Δ ряда Δ_Y. При правильно выполненной работе значение M_Δ должно попасть в диапазон от — 0.1 мВ до 0.1 мВ.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) график зависимости $Y(\tau)$ от $(\tau-\tau_o)$;
2) таблица расчетов $Y_{теор}$ и Δ_Y;
3) анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 3

Оценка искажений спектра при дискретизации измерений

Литература

Степанюк И. А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 14 — 16.

Общие пояснения

Спектры измеряемых океанологических величин не являются конечными, т. е. не имеют некоторой верхней граничной частоты f_k, после которой значение спектральной плотности $S(f)\Big|_{f>f_k} = 0$.

Это чрезвычайно важная особенность. Дело в том, что в силу чисто практических причин океанологические измерения в преобладающем большинстве случаев являются дискретными. Даже если они в исходном варианте непрерывные, то в последующем все равно полученные данные подвергаются дискретизации. А спектры, полученные по дискретным данным, отражают истинные спектры с существенными искажениями. В литературе по теории океанологических измерений введен даже специфический термин: эффект "иллюзии дискретизации". Его сущность состоит в появлении ложных("иллюзорных") гармоник в спектре, обусловленных дискретизацией наблюдений. Все эти искажения и "иллюзии" появляются из-за того, что энергия гармоник на высоких частотах, которые как бы "обрезаются" при дискретизации, но тем не менее объективно существуют, не пропадает, а переносится в низкочастотную область.

Разделение на "высокие" и "низкие" частоты производится с помощью понятия "граничная частота" $f_к$, которая связана с дискретностью $\Delta\tau$ простым выражением

$$f_K = \frac{1}{2\Delta\tau}. \qquad (3.1)$$

Эта связь (строго говоря в обратном виде, т.е. $\Delta\tau = \frac{1}{2f_K}$) фигурирует в известной теореме Котельникова, в которой объективно устанавливается интервал между отсчетами $\Delta\tau$ для дискретного отображения непрерывных процессов с *ограниченным* спектром, у которых поставленное выше условие равенства нулю спектральной плотности на частотах $f > f_K$ *выполняется.*

Целью лабораторной работы является практическая оценка обусловленных дискретизацией искажений в исследуемой области спектра, т. е. при $0 < f \le f_K$, для типичного океанологического спектра степенного вида

$$S(\omega) = C\omega^{-n}, \qquad (3.2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; C — постоянный коэффициент.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Как было отмечено выше, при дискретизации измерений энергия гармоник на частотах $f > f_K$ переносится в исследуемую область частот $0 < f \le f_K$, создавая при каждом значении f из этой области некоторую "добавку" к значению спектральной плотности. Поскольку в реальной ситуации величина "добавки" всегда неизвестна (ибо неизвестен характер изменения спектральной плотности на частотах $f > f_K$), ее следует рассматривать как *погрешность*.

Теоретически погрешность дискретизации оценивается выражением

$$\Delta S_{\kappa}(f) = \sum_{\kappa=1}^{\infty} S(2\kappa f_{\kappa} \pm f). \tag{3.3}$$

Представляет интерес теоретическая оценка этой погрешности для граничной частоты $f = f_{\kappa}$ исследуемого диапазона. В этом случае

$$\Delta S_{\kappa}(f) = S(2f_{\kappa} - f_{\kappa}) + S(2f_{\kappa} + f_{\kappa}) + S(4f_{\kappa} - f_{\kappa}) + \\ + S(4f_{\kappa} + f_{\kappa}) + \ldots = S(f_{\kappa}) + 2S(3f_{\kappa}) + 2S(5f_{\kappa}) + \ldots \tag{3.4}$$

Таким образом получается, что погрешность определения спектральной плотности на граничной частоте больше, чем само значение этой спектральной плотности $S(f_{\kappa})$, т. е. в относительной форме погрешность превышает 100 %. Логика подсказывает, что и вблизи f_{κ} формируются близкие значения погрешности. Тем самым какой-либо физический анализ участка спектра вблизи f_{κ} оказывается бессмысленным.

В связи с этим целесообразно выяснить, до какой же частоты (явно меньшей f_{κ}) можно проводить анализ спектра и с какими ограничениями. Воспользуемся выражением (3.3) в следующем упрощенном виде:

$$\Delta S_{\kappa}(f) = S(2f_{\kappa} - f) + S(2f_{\kappa} + f) + \\ + S(4f_{\kappa} - f) + S(4f_{\kappa} + f). \tag{3.5}$$

По выражению (3.5) можно с достаточно хорошим приближением рассчитать погрешность дискретизации для теоретических спектров вида (3.2). Зная распределение погрешности, несложно определить граничную анализируемую частоту, задавшись допустимым для проводимого анализа значением погрешности.

Применяя для реальных спектров полученные расчетные оценки, не следует забывать, что реальные спектры отличаются от теоретических, причем, не только значениями C и n, но и возможным отсутствием монотонности на частотах выше f_K. Естественно, сложность не в самих отличиях, а в отсутствии информации о них. Тем самым, выполняемые оценки погрешности получаются весьма приближенными.

В задачи лабораторной работы входит:

— расчет функции спектральной плотности $S(\omega)$ вида (3.2) при заданных значениях C, n;

— расчет погрешностей дискретизации для диапазона $0 < f \le f_K$.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 3.1.

Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Таблица 3.1

Характеристика	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	25.5	18.5	21.4	28.6	30.2	19.8	25.0	24.5	22.2	32.5
n	1.5	2.1	5/3	1.6	1.3	1.9	2.0	2.2	5/3	1.8
$\Delta\tau$ с	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	30.0	60.0	20.0	10.0	5.0

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать по выражению (3.2) значения функции спектральной плотности $S(\omega)$ для диапазона частот f от 10^{-3} Гц до 5 f_K, где значение f_K соответствует выражению (3.1). Дискретные зна-

чения частот при расчете $S(\omega)$ студенты выбирают самостоятельно. При этом выборе необходимо учитывать выражение (3.5).

2. Для каждого дискретного значения частоты из области $10^{-3} \le f \le f_K$, Гц, рассчитать по выражению (3.5) погрешность дискретизации $\Delta S_K(f)$.
3. Рассчитать относительные значения погрешности дискретизации

$$\delta S_K(f) = \frac{\Delta S_K(f)}{S(\omega)} \cdot 100\,(\%)$$

для той же области частот $10^{-3} \le f \le f_K$.

4. Задаваясь значением максимальной погрешности 20 %, определить граничную частоту f_a диапазона $10^{-3} \le f \le f_a$, где физический анализ оказывается достаточно корректным .
5. Построить графики $S(\omega)$, $S_K(\omega)$, $\delta S_K(f)$, самостоятельно выбрав масштабы, причем выбираемые масштабы могут быть нелинейными.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) таблицы расчетов $S(\omega)$, $\Delta S_K(f)$, $S_K(\omega)$ и $\delta S_K(f)$;
2) графики $S(\omega)$, $S_K(\omega)$ и $\delta S_K(f)$;
3) анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 4

Коррекция погрешности дискретизации путем использования динамических свойств ОИП

Литература

Степанюк И. А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 14 — 16.

Общие пояснения

Как следует из оценок искажений спектра при дискретизации, погрешность $\Delta S_k(f)$ всегда положительна, т.е. спектр $S_k(f)$, построенный по данным дискретных измерений, всегда "завышен" по отношению к истинному спектру $S_x(f)$. В то же время известно, что динамические свойства ОИП при отсутствии резонансов приводят к "занижению" спектра. Из этого следует, что, по-видимому, существует такое сочетание динамических свойств и дискретности, при котором происходит как бы самокоррекция искажений. Соответственно результирующая погрешность получается существенно меньшей, чем отдельные погрешности: за счет динамических свойств и за счет дискретизации.

Целью лабораторной работы является практическое ознакомление с возможностями такой самокоррекции на примере дискретных измерений процесса с типичным спектром степенного вида (3.2).

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Рассмотрим ОИП как динамическую систему 1-го порядка с передаточной функцией вида

$$F(i\omega) = \frac{1}{1 + i\omega\,\tau_e} \qquad (4.1)$$

и амплитудно-частотной характеристикой

$$|F(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 \tau_e^2}}, \tag{4.2}$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

Искажения спектра, обусловленные динамическими свойствами ОИП, формируются в соответствии с зависимостью

$$S_y(f) = |F(i\omega)|^2 S_x(f), \tag{4.3}$$

где $S_x(f)$ — истинный спектр, $S_y(f)$ — спектр на выходе ОИП.

Спектр, полученный по дискретным измерениям, связан со спектром $S_y(f)$ следующим выражением:

$$S_{ky}(f) = S_y(f) + \Delta S_{ky}(f), \tag{4.4}$$

где $\Delta S_{ky}(f)$ — погрешность дискретизации, определяемая выражением:

$$\Delta S_{ky}(f) = \sum_{k=1}^{\infty} S_y(2kf_k \pm f). \tag{4.5}$$

Здесь, как и ранее (см. лабораторную работу № 3), граничная частота f_k связана с дискретностью $\Delta\tau$

$$f_k = \frac{1}{2\Delta\tau}. \tag{4.6}$$

Взаимосвязь (4.4) обусловлена тем очевидным фактом, что дискретизации подвергается не исходный сигнал со спектром $S_x(f)$, а сигнал, прошедший динамическое звено ОИП.

В соответствии с этим получим

$$S_{ky}(f) = \frac{S_x(f)}{1+4\pi^2 f^2 \tau_e^2} + \frac{S_x(2f_k+f)}{1+4\pi^2(2f_k+f)^2 \tau_e^2} + \frac{S_x(2f_k-f)}{1+4\pi^2(2f_k-f)^2 \tau_e^2} + \frac{S_x(4f_k-f)}{1+4\pi^2(4f_k-f)^2 \tau_e^2} + \frac{S_x(4f_k+f)}{1+4\pi^2(4f_k+f)^2 \tau_e^2} + \ldots \tag{4.7}$$

Как и в предыдущей лабораторной работе, проанализируем это выражение для $f = f_k$. При этом зададим частоту среза амплитудно-частотной характеристики ОИП

$$f_{cp} = \frac{\omega_{cp}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \tau_e}, \tag{4.8}$$

равной f_k. В этом случае получается следующее соотношение между τ_e и $\Delta\tau$:

$$\frac{\tau_e}{\Delta\tau} = \frac{1}{3.14}. \tag{4.9}$$

Для указанных условий

$$S_{ky}(f_k) = \frac{S_x(f_k)}{2} + \frac{S_x(3f_k)}{10} + \frac{S_x(f_k)}{2} + \frac{S_x(3f_k)}{10} + \frac{S_x(5f_k)}{26} + \ldots = S_x(f_k) + \frac{S_x(3f_k)}{5} + \frac{S_x(5f_k)}{26} + \ldots \tag{4.10}$$

Таким образом, получается, что основная часть погрешности дискретизации на частоте f_k компенсируется (сравни с выводами лабораторной работы № 3). Остается “прибавка” 20 % от значения спектральной плотности на частоте $3f_k$ плюс еще приблизительно 4 % от значения на частоте $5f_k$. Если сами значения S_x уменьшаются по закону вида (3.2), то эта “прибавка” оказывается вполне “терпимой” по отношению к значению $S_x(f_k)$.

Естественно, что эту “прибавку” можно еще уменьшить, изменив условие $f_{cp} = f_k$ на $f_{cp} < f_k$. А вот насколько f_{cp} должно быть меньше f_k, зависит от характера корректируемого спектра.

Кроме того, при коррекции необходимо учитывать, что во всем диапазоне частот от 0 до f_k “занижение” спектра за счет динамических свойств ОИП не получается полностью эквивалентным “завышению” за счет погрешности дискретизации даже при самом удачном подборе соотношения между f_{cp} и f_k. Поэтому всегда целесообразно выполнение оценок остаточной погрешности.

В задачи лабораторной работы входит:

— расчет амплитудно-частотной характеристики ОИП $|F(i\omega)|$;

— расчет спектра $S_y(f)$, искаженного динамическими свойствами ОИП;

— расчет скорректированного спектра $S_{ky}(f)$;

— сравнение спектров $S_x(f)$, $S_k(f)$ из лабораторной работы № 3 со спектрами $S_y(f)$ и $S_{ky}(f)$ и их совместный анализ.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 4.1 в виде значений τ_e ОИП с динамическими свойствами 1-го порядка.

Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Таблица 4.1

	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ_e с	0.2	0.3	0.7	2.0	3.5	10.0	20.0	7.5	3.0	2.5

Порядок выполнения работы

1. По формуле (4.2) рассчитать амплитудно-частотную характеристику ОИП для диапазона частот $10^{-3} \le f \le 5 f_к$ (Гц). Значение $f_к$ и дискретные значения частот f использовать те же, что и в лабораторной работе № 3.
2. Построить график АЧХ: масштаб по оси частот использовать тот же, что и в лабораторной работе № 3.
3. Рассчитать по формуле (4.3) спектр $S_y(f)$, искаженный динамическими свойствами ОИП; построить график спектра, используя масштаб по оси частот тот же, какой использован в графике АЧХ. В качестве спектра $S_x(f)$ использовать рассчитанный спектр $S(\omega)$ из лабораторной работы № 3.
4. Рассчитать по выражению (4.7) либо по сочетанию формул (4.4) и (4.5) скорректированный спектр $S_{ky}(f)$ для диапазона частот $10^{-3} \le f \le 5 f_к$ (Гц). Построить кривую спектра $S_{ky}(f)$ на графике $S_y(f)$.
5. Оценить качество коррекции. Для этого сначала рассчитать значения

$$\Delta S_{ky}(f) = S_{ky} - S_x(f);$$

$$\delta S_{ky}(f) = \frac{\Delta S_{ky}(f)}{S_x(f)} \cdot 100,\%$$

для диапазона $10^{-3} \le f \le f_K$. Как и ранее, в качестве спектра $S_x(f)$ использовать спектр $S(\omega)$ из лабораторной работы № 3.

Далее необходимо сравнить полученные значения $\delta S_{ky}(f)$ с соответствующими значениями $\delta S_k(f)$ из работы № 3 и сделать выводы о качестве коррекции.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) таблицы расчетов АЧХ, $S_y(f)$, $S_{ky}(f)$, $\Delta S_{ky}(f)$ и $\delta S_k(f)$;
2) графики АЧХ, $S_y(f)$, $S_{ky}(f)$;
3) анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 5

Оценка полосы методических погрешностей при тонкоструктурном зондировании в условиях качки судна

Литература: Нет.

Общие пояснения

Экспериментальное изучение тонкой термохалинной структуры верхнего слоя моря производится путем вертикального зондирования с судна, обычно находящегося в дрейфе. Применяемые при этом устройства (зонды), как правило, имеют измерительные преобразователи (ИП) с ненулевой постоянной времени, что приводит к динамическим искажениям, к тому же зонды эксплуатируются в условиях качки судна, что создает весьма специфические искажения тонкой структуры, которые анализируются ниже. Эту совокупность искажений целесообразно рассматривать как методические погрешности, оценивая их в виде некоторой полосы относительно кривой вертикального распределения изучаемой характеристики (температуры, концентрации растворенного кислорода и т. д.).

Целью лабораторной работы является практическое ознакомление с методикой оценки этих методических погрешностей для реальных ситуаций зондирования.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Рассмотрим тонкоструктурное зондирование применительно к измерениям температуры. При движении зонда с некоторой скоростью $V_з$ уравнение, учитывающее его динамические свойства, можно представить в виде

$$\tau_e V_з \frac{dT_u}{dz} + T_u = T_w, \tag{5.1}$$

где T_u — текущее измеренное значение температуры; T_w — действительное значение температуры воды; τ_e — постоянная времени ИП зонда; z — глубина.

Если ставится задача выявления на профиле прослоек с некоторым градиентом не меньше заданного $(\frac{dT_н}{dz})_з$, то при известном значении τ_e требуемая скорость зондирования легко определяется непосредственно из уравнения (5.1)

$$V_з = \frac{T_w - T_u}{\tau_e(\frac{dT_u}{dz})_з} \approx \frac{\delta T}{\tau_e(\frac{dT_u}{dz})_з}, \tag{5.2}$$

где δT — доверительные границы погрешностей измерений, выраженные в абсолютной форме.

Очевидно, что $V_з$ может задаваться дискретно-переменной по слою зондирования. В частности, в верхнем квазиоднородном слое она может быть большей, чем вблизи термоклина и в самом термоклине. Это уменьшает затраты времени на производство наблюдений.

При $V_з = \text{const}$ значение δT может быть задано как доверительные границы статической погрешности зонда.

Однако условие постоянства $V_з$ зонда выполняется, и то весьма приближенно, только при его свободном падении. В управляемом же режиме опускания, а также при подъеме, в связи с типичным наличием качки дрейфующего судна на среднее значение $V_з$ накладываются периодические вариации.

Будем считать, что результирующая скорость зонда при качке подчиняется выражению

$$V_p = V_з + V_o \exp(i\omega_k \tau), \qquad (5.3)$$

где $\omega_k = \dfrac{2\pi}{\tau_k}$ — круговая частота качки; τ_k — период качки.

Поскольку $V_p = \dfrac{dz}{d\tau}$, то изменения ординаты зонда во времени на каком-либо характерном участке составят

$$z - z_o = \int_{\tau_o}^{\tau} (V_з + V_o \exp(i\omega_k \tau)) d\tau = V_з(\tau - \tau_o) +$$

$$+ \frac{V_o}{i\omega_k} \exp(i\omega_k(\tau - \tau_o)) = V_з \tau' + \frac{V_o}{i\omega_k} \exp(i\omega_k \tau'), \qquad (5.4)$$

где τ_o — момент времени прохождения начала участка; z_o — ордината начала участка.

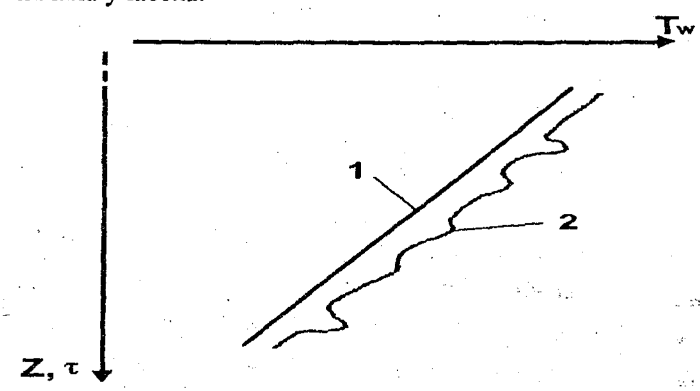


Рис. 5.1. Эффект появления ложной информации в результате качки судна при термозондировании /1 — истинный профиль; 2 — искаженный профиль/.

Возьмем участок с линейным изменением температуры по вертикали (рис. 5.1)

$$T_w = T_{w_0} + \alpha_o(z - z_o) \tag{5.5}$$

и воспользуемся выражением (5.1) с учетом (5.4) и (5.5)

$$\tau_e \frac{dT_u}{d\tau'} + T_u = T_{w_0} + \alpha_o V_з \tau' + \frac{\alpha_o V_o}{i\omega_k} \exp(i\omega_k \tau'). \tag{5.6}$$

Решение находим в виде

$$T_u = T_{w_0} + \alpha_o V_з (\tau' + \tau_e) + \frac{\alpha_o V_o}{\omega_k (i - \omega_k \tau_e)} \exp(i\omega_k \tau'). \tag{5.7}$$

Как следует из выражения (5.7), на задаваемую линейную изменчивость T_u по времени здесь накладывается осциллирующая изменчивость с периодом $\tau_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$ и модулем

$$A_k = \frac{\alpha_o V_o}{\omega_k \sqrt{1 + \omega_k^2 \tau_e^2}}. \tag{5.8}$$

Этот эффект приводит к появлению на зарегистрированном профиле $T_u(z)$ ложных прослоек (рис. 5.1), причем при $V_o > V_з$ — прослоек с градиентом, противоположным по знаку α_o. При $V_o = V_з$ получаются прослойки с нулевым вертикальным градиентом.

Технические приемы коррекции рассмотренного эффекта в настоящее время весьма ограничены. Действительно, очевидный прием, состоящий в синхронных измерениях глубины расположения зонда, к сожалению, мало эффективен из-за метрологических качеств применяемых ИП гидростатического давления (абсолютная погрешность эксплуатирующихся зондов достигает ±(5÷10)м), а также из-за несинхронности отсчетов по каналам давления и температуры. Вследствие этих же причин малоэффективен прием, состоящий в выявлении коррелируемых между собой прослоек при прямом ("вниз") и обратном ("вверх") движениях зонда.

Несомненно, что искажения, вносимые качкой, будут существенно меньше при зондировании в режиме свободного падения. Однако, такой режим является довольно рискованным. В условиях качки это приводит к образованию петель на несущем тросе (кабель-тросе) с опасностью последующего обрыва зонда.

Известно, что за счет τ_e происходит сглаживание изменчивости. Однако, искусственное увеличение τ_e для устранения искажений, обусловленных качкой, что следует из выражения (5.8), просто бессмысленно, поскольку одновременно со сглаживанием ложных прослоек происходит сглаживание и истинных прослоек, если они имеются на данном участке профиля.

Тот факт, что по выражению (5.7) осциллирующая изменчивость имеет фиксированный период τ_k, к сожалению, не может служить основанием для выявления ложных прослоек, поскольку в натурных условиях столь жесткая закономерность не наблюдается из-за случайного характера качки. Тем самым, появление ложных прослоек также имеет случайный характер.

В самом общем случае, когда не применяются какие-либо специальные приемы коррекции, наиболее целесообразно следующее. При анализе результатов зондирования в соответствии с выражениями (5.7) и (5.8) определяют суммарную погрешность на каждом элементарном участке профиля

$$\Delta_\Sigma = \left[\operatorname{sign}\left(\frac{dz}{d\tau}\right)\right]\alpha_o \tau_e V_з \pm \frac{\alpha_o V_o}{\omega_k \sqrt{1+\omega_k^2 \tau_e^2}}, \tag{5.9}$$

где $\text{sign}(\frac{dz}{d\tau}) = +1$ при $\frac{dz}{d\tau} > 0$ /спуск/ и $\text{sign}(\frac{dz}{d\tau}) = -1$ при $\frac{dz}{d\tau} < 0$ /подъем/.

В выражении (5.9) первый член может быть интерпретирован как систематическая составляющая, а второй — как случайная составляющая. Тем самым оценки Δ_Σ дают некоторую полосу значений вдоль полученного при зондировании профиля, при этом все прослойки "выступающие" за пределы полосы, могут рассматриваться как действительные и учитываться в дальнейшем физическом анализе.

При определении Δ_Σ на конкретной глубине z_i значение градиента $\alpha_o = \frac{dT_u}{dz}$ наиболее целесообразно определять как среднее значение в интервале $\pm\Delta z$ относительно глубины z_i, где $\Delta z = \frac{V_з \tau_{k\max}}{2}$, а $\tau_{k\max}$ — максимальное значение периода качки.

В задачи лабораторной работы входит:

— расчеты значений полосы погрешностей в зависимости от периода качки; эти расчеты выполняются для упрощенного случая, когда градиент α_o является постоянным и заданным (в реальных случаях, как указано выше, необходимо использовать рассчитанные текущие значения градиента);

— оценка применимости тонкоструктурного зондирования для использованного в расчетах диапазона параметров качки.

Исходные данные

Таблица 5.1

Характеристика	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ_e с	1.0	1.5	0.5	1.0	1.2	1.6	1.0	0.7	0.5	0.8
α_o К/м	0.15	0.22	0.25	0.30	0.42	0.50	0.31	0.25	0.35	0.40
H_k м	3.5	4.0	3.6	4.2	3.5	3.7	5.0	4.0	4.5	4.5

Общие данные:

— скорость зондирования $V_з$=1 м/с;

— период качки τ_k :

3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5

Высота качки H_k здесь указана так же, как обычно указывается высота волн, т.е. между подошвой и гребнем.

Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать амплитудное значение скорости перемещения при качке по формуле

$$V_o = \frac{\omega_k H_k}{2}.$$

2. Рассчитать по формуле (5.8) значения модуля знакопеременной погрешности для диапазона заданных периодов τ_k.
3. Результаты расчетов указать в таблице типа табл. 5.2.

Таблица 5.2

Вар № ...			τ_e=...			α_o=...		H_k =...		
τ_k										
V_o										
A_k										

4. Построить график зависимости $A_k(\tau_k)$.
5. Рассчитать значения модуля погрешности, обусловленной динамическими свойствами зонда (1-й член формулы(5.9)).
6. Проанализировать полученные результаты.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) таблицы расчетов по форме табл. 5.2;
2) график зависимости $A_k(\tau_k)$;
3) анализ полученных результатов.

Часть 2. **Конструктивные особенности океанологических измерительных преобразователей (ОИП)**

Лабораторная работа № 1

Расчет и макетирование резистивных ОИП температуры с линейной характеристикой

Литература

Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.:Гидрометеоиздат, 1986, с. 36—39.

Общие пояснения

Наиболее распространены океанологические измерительные преобразователи (ОИП) температуры, выполненные на основе проволочных (ПТР) либо полупроводниковых (ППТР) терморезисторов. Функция преобразования ПТР в диапазоне температур, характерных для морских вод (-2...35 $^\circ$C), с достаточным для практики приближением может считаться линейной:

$$R_t = R_0(1+\alpha t), \tag{1.1}$$

где t — температура в $^\circ C$; α — температурный коэффициент сопротивления (K^{-1}); R_0 — значение сопротивления при $t = 0^\circ$ C.

Значение коэффициента α у различных видов ПТР примерно составляет 0.004 K^{-1} (или 0.4 %/K). Получается, что для того, чтобы осуществлять измерения температуры с абсолютной погрешностью не хуже ±0.01 K, необходимо измерять сопротивление R_t с погрешностью порядка ±0.004%. Это чрезвычайно трудная задача, особенно, если такие измерения выполняются в натурных условиях.

Значительно больше температурный коэффициент сопротивления у полупроводниковых терморезисторов (ППТР). В среднем он составляет примерно 4 %/K. При той же задаче обеспечения погрешности не хуже ±0.01 K, очевидно, что метрологические требования к последующим (после ОИП) каскадам измерительного устройства при использовании ППТР снижаются на порядок.

Однако при таком очевидном преимуществе для ППТР характерен ряд сильных недостатков, неучет которых существенно ограничивает их применимость в конструкциях ОИП. Важнейшим из этих недостатков является нелинейность функции преобразования (ФП). Выражение для ФП обычно записывают в виде:

$$R_t = R_0 \exp(B/T) , \qquad (1.2)$$

где R_0 — константа (Ом); B — константа (K); $T = 273 + t$ — абсолютная температура (K).

Существует ряд аналоговых методов преобразования экспоненциальной зависимости (1.2) в зависимость, близкую к линейной. В лабораторной работе рассматривается простейший из этих методов.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Линеаризация зависимости вида (1.2) в простейшем случае осуществляется ее преобразованием в кривую с перегибом (рис.1.1.), т.е. преобразованием из формы 1 в форму 2. Перегиб задается в середине диапазона измерений, при значении температуры:

$$t_n = \frac{t_в + t_н}{2}, \qquad (1.3)$$

где $t_в$ — верхнее значение диапазона; $t_н$ — нижнее значение.

В окрестностях перегиба кривая 2 аппроксимируется прямой 3, проходящей через значения сопротивления при $t_н$, t_n и $t_в$. Это самый удобный, хотя и не самый точный способ, аппроксимации. Максимальные отклонения от прямой здесь будут наблюдаться при значениях температуры $0.5(t_н + t_п)$ и $0.5(t_п + t_в)$, т.е. посередине первой и второй “половинок” диапазона.

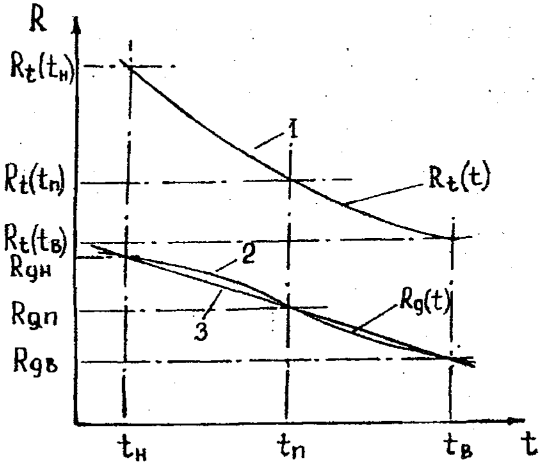


Рис. 1.1 Преобразование исходной зависимости сопротивления ППТР от температуры.

Преобразование в кривую с перегибом производится путем включения ППТР R_t в двухполюсник (рис. 1.2), где параллельно R_t включен постоянный резистор R_1.

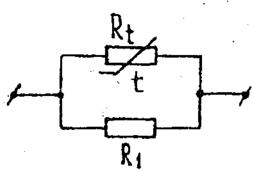


Рис. 1.2 Линеаризующий двухполюсник.

Сопротивление двухполюсника определяется выражением

$$R_g(t) = \frac{R_1 R_t}{R_t + R_1}. \quad (1.4)$$

Для получения перегиба необходимо задать условие

$$\left.\frac{d^2 R_g(t)}{dt^2}\right|_{t=t_n} = 0. \quad (1.5)$$

Решение уравнения (1.5) с использованием выражений (1.2) и (1.4) приводит к соотношению (студенты делают вывод самостоятельно)

$$R_1 = \frac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_t(t_n); \quad (1.6)$$

где $T_n = 273 + t_n$; $R_t(t_n)$ — значение сопротивления ППТР при $t = t_n$.

Исходные данные

№ пптр	R_t	Вариант									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	$R_t(0)$	7320	7310	7351	7125	7312	7258	7222	7358	7410	7255
	$R_t(20)$	2713	2485	2584	2485	2745	2385	2385	2645	2545	2482
2	$R_t(0)$	7351	7340	7322	7218	7351	7292	7240	7282	7355	7208
	$R_t(20)$	2810	2428	2518	2542	2609	2405	2412	2710	2612	2512
3	$R_t(0)$	7310	7385	7410	7325	7305	7288	7322	7310	7425	7322
	$R_t(20)$	2545	2392	2810	2508	2655	2355	2584	2582	2582	2455
4	$R_t(0)$	7325	7312	7415	7254	7258	7320	7415	7125	7388	7414
	$R_t(20)$	2518	2455	2754	2419	2318	2582	2744	2188	2644	2518

Примечание: Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Порядок выполнения работы

1. Для каждого терморезистора определить константы B и R_0. Определение производится с использованием системы уравнений

$$\begin{cases} R_t(0) = R_0 \exp[B/273] \\ R_t(20) = R_0 \exp[B/293] \end{cases} \tag{1.7}$$

где $R_t(0)$ — значение сопротивления ППТР при $0°C$ ($T = 273K$); $R_t(20)$ — значение сопротивления ППТР при $20°C$ ($T = 293K$).

2. Рассчитать исходные характеристики ППТР в точках $t = 5°C$, $t = 10°C$, $t = 15°C$ и $t = 20°C$. В качестве опорного значения берется $R_t(0)$. Различие между рассчитанным значением $R_t(20)$ и заданным $R_t(20)$, превышающие 0.5 Ом, свидетельствует о некачественном расчете B и R_0.
3. Построить графики $R_t(t)$ для диапазона $0 \div 20\,°C$ для всех четырех ППТР.
4. Рассчитать R_1 по формуле (1.6), задавая $T_п = 283K$.
5. Рассчитать значения сопротивлений двухполюсника $R_g(t)$ по формуле (1.4) в точках $R_g(0)$, $R_g(5)$, $R_g(10)$, $R_g(15)$ и $R_g(20)$.
6. Аппроксимировать полученную кривую $R_g(t)$ прямой линией $R_л(t)$. Для этого поставить условия:

$$R_л(0) = R_g(0);$$
$$R_л(20) = R_g(20);$$

и рассчитать коэффициент преобразования

$$K_T = \frac{R_g(0) - R_g(20)}{20}.$$

После этого рассчитать $R_л(t)$:

$$R_л(5) = R_л(0) - 5K_T$$
$$R_л(10) = R_л(0) - 10K_T$$

и т.д.

7. Построить графики $R_g(t)$ и $R_л(t)$, причем, целесообразно совместить эти графики с графиками $R_t(t)$, используя, соответственно, параллельную шкалу R .
8. Определить остаточную нелинейность:

$$\Delta_R = R_g(t) - R_л(t)$$

при $t = 0°\mathrm{C}$, $t = 5°\mathrm{C}$ и т.д.

9. Выразить остаточную нелинейность в значениях температуры

$$\Delta_t = \frac{\Delta_R}{K_T}$$

Значения остаточной нелинейности по модулю не должны превышать $0.1\mathrm{K}$.

10. Все результаты расчетов свести в таблицу:

	ППТР №1					ППТР №2					
	Температура					*Температура*					
величина	0	5	10	15	20	0	5	10			
R_t											
$R_g(t)$											
$R_л(t)$											
Δ_R											
Δ_t											
B [K]											
R_0 [Ом]											
R_1 [Ом]											
K_T [Ом/К]											

Методика макетирования

Для макетирования используется специальная лабораторная установка, содержащая сборочную панель 1 (рис. 1.3), магазины сопротивлений 2, соответственно — R_t, R_1, R_2 и R_3, подключенные к сборочной панели, омметр-компаратор 4 типа ЩЗО и опорный магазин сопротивлений 3, подключаемый при макетировании к омметру 4.

На сборочной панели 1 с помощью перемычек соединяют в требуемый двухполюсник (рис. 1.2) магазины R_t и R_1. К омметру-компаратору подключают опорный магазин R_4. Измерительный вход омметра соединяют с зажимами А и Б сборочной панели. Устанавливают на омметре диапазон измерений ±2 %.

На магазине сопротивлений R_1 устанавливают значение, соответствующее расчетному для ППТР №1. На магазине R_t, задают значение сопротивления ППТР № 1 последовательно во всех точках диапазона, при этом на магазине R_4 устанавливают значение, соответствующее $R_л(t)$ в этих же точках. По шкале омметра определяют отклонения N в % сопротивления двухполюсника от значений $R_{л}(t)$.

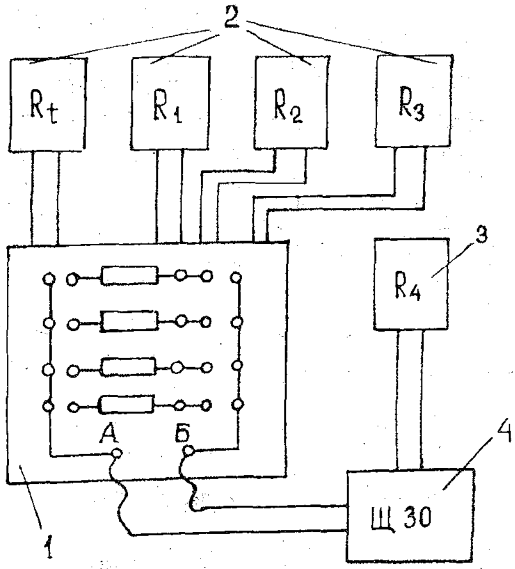


Рис. 1.3 Схема лабораторной установки для макстирования

Результаты сводят в таблицу:

	ППТР № 1				
t, ^{0}C	0	5	10	15	20
$R_t(t)$					
$R_л(t)$					
N					
Δ_R^u					
Δ_t^u					

Значения измеренной остаточной нелинейности в единицах сопротивления (Δ_R^u) и в единицах температуры (Δ_t^u) определяют по выражениям:

$$\Delta_R^u = \frac{NR_л(t)}{100};$$

$$\Delta_t^u = \frac{\Delta_R^u}{K_T}.$$

Отклонения Δ_t^u по модулю не должны превышать 0.1 K.

Макетирование выполняют для всех четырех терморезисторов.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) теоретическая часть, содержащая *самостоятельно сделанные выводы* формул, о которых сказано в описании, а также иные формулы, требуемые для расчетов;
2) таблицы расчетов по рекомендованной форме;
3) графики зависимостей $R_t(t)$ и $R_g(t)$ для всех четырех ППТР;
4) таблицы результатов макетирования;
5) краткие выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа № 2

Расчет и макетирование резистивных ОИП температуры с нормированной характеристикой

Литература

Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 39-41.

Общие пояснения

Важным недостатком ППТР, затрудняющим возможность их широкого использования, является значительный технологический разброс их основных констант (R_0 и B). Этот разброс может достигать 20—30 % и без применения специальных мер практически устраняет возможность взаимозаменяемости ППТР, а также затрудняет использование в многоканальных измерительных установках.

Из-за указанного разброса констант использование простейших двухполюсников (см. лабораторную работу № 1) для линеаризации характеристик ППТР эффективно лишь при конструировании и изготовлении несерийных измерительных устройств, например, для задач лабораторных физических экспериментов, поскольку получаемые линейные характеристики оказываются индивидуальными, т.е. для каждого из них характерны собственные значения сопротивления при фиксированных значениях температуры, а также собственные значения коэффициента K_T .

Методика выполнения работы

Теоретические основы

С целью большей универсальности использования (в многоканальных устройствах, в серийной технике) и взаимозаменяемости, например при ремонте, ППТР включаются в более сложные двухполюсники. Одним из них является двухполюсник, показанный на рис.2.1.

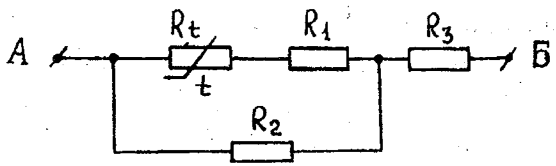


Рис. 2.1 Схема двухполюсника

Общее сопротивление $R_g(t)$ между зажимами двухполюсника А и Б легко находится с использованием правил последовательного и параллельного соединения резисторов и в общем виде может быть выражено формулой:

$$R_g(t) = \frac{aR_t + b}{cR_t + d}. \qquad (2.1)$$

Выражения для постоянных коэффициентов a, b, c, d определяются студентами самостоятельно.

Выражение (2.1) характеризует кривую, для которой свойственно наличие перегиба. Как и в предыдущей работе, эту точку целесообразно задать в середине диапазона измерений, т.е. при

$$t_n = \frac{t_в + t_н}{2},$$

где $t_в$ — верхнее значение диапазона; $t_н$ — нижнее значение.

В таком случае условие перегиба будет следующим:

$$\left. \frac{d^2 R_g(t)}{dt^2} \right|_{t=t_n} = 0. \qquad (2.2)$$

В соответствии с этим условием, дважды дифференцируя выражение (2.1) по t, которое в неявном виде входит в R_t, и приравнивая результат к нулю, получим (вывод делается студентами самостоятельно и включается в отчет по работе)

$$\frac{d}{c} = \frac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_t(t_n), \tag{2.3}$$

где B — известная константа ППТР; $T_n = (273 + t_n)$ — значение температуры в точке перегиба; $R_t(t_n)$ — значение сопротивления ППТР в точке перегиба.

Подставив в (2.3) найденные ранее значения коэффициентов d и c, получим

$$R_1 + R_2 = \frac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_t(t_n). \tag{2.4}$$

Рассмотренного условия (2.2), естественно, недостаточно для расчета всех элементов двухполюсника. Введем дополнительные условия. Зададим требуемое для конструируемого устройства значение сопротивления двухполюсника в начальной точке диапазона измерений

$$R_{gн} = \frac{aR_t(t_н) + b}{cR_t(t_н) + d}, \tag{2.5}$$

где $R_t(t_н)$ — значение сопротивления ППТР в начальной точке $(t = t_н)$.

Также зададим требуемый коэффициент преобразования K_T

$$K_T = \frac{R_{gн} - R_{gв}}{t_в - t_н}, \tag{2.6}$$

где $R_{gв}$ — значение сопротивления двухполюсника в точке $t = t_в$.

Либо можно задать требуемую изменчивость сопротивления двухполюсника в диапазоне измерений

$$600\,\text{Ом} = \Delta R_g = R_{gн} - R_{gв}, \tag{2.7}$$

что полностью эквивалентно условию (2.6).

Соответственно, используя выражения (2.4), (2.5) и, например, (2.7) получим расчетные выражения для сопротивлений двухполюсника (вывод выражений производится студентами самостоятельно и приводится в отчете):

$$\begin{aligned} R_2 &= \sqrt{\frac{\Delta R_g \, [R_t(t_в) + \psi] \, [R_t(t_н) + \psi]}{R_t(t_н) - R_t(t_в)}} \\ R_1 &= \psi - R_2 \\ R_3 &= R_{gн} - \frac{R_2 \, [R_t(t_н) + R_1]}{R_t(t_н) + \psi}, \end{aligned} \tag{2.8}$$

где $\psi = \dfrac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_t(t_n)$.

Рассчитав по формуле (2.8) значения R_1, R_2 и R_3, по выражению (2.1) можно определить температурную характеристику двухполюсника и аппроксимировать ее линейной функцией $R_л(t)$. Аппроксимация выполняется, как и в лабораторной работе № 1, т.е. прямая линия $R_л(t)$ должна проходить через значения $R_{gн}$ и $R_{gв}$. Отклонения реальной характеристики $R_g(t)$ от $R_л(t)$ составляют знакопеременную по диапазону остаточную нелинейность, которой либо пренебрегают, тогда она входит в состав систематической погрешности, либо учитывают в виде поправок при обработке результатов измерений.

Исходные данные

1. Градуировочные данные 4-х терморезисторов из лабораторной работы № 1 в виде значений сопротивлений R_t в точках 0, 5, 10, 15 и 20 °C.
2. $R_{gн} = 3000$ Ом.
3. $K_T = 30$ Ом/К или $\Delta R_g = 600$ Ом.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить вывод всех расчетных формул в соответствии с указаниями теоретической части описания работы.
2. Используя исходные данные, рассчитать значения R_1, R_2 и R_3. Задать $t_n = 10$ °C.
3. Рассчитать по формуле (2.1) значения сопротивлений двухполюсника в точках 0, 5, 10, 15 и 20 °C. Естественно, что значение $R_g(t)$ в точке $t = 0$ должно получиться равным $R_{gн}$.
4. Используя исходные данные, рассчитать требуемую $R_л(t)$ в пределах от $R_л(0) = 3000$ Ом до $R_л(20) = 2400$ Ом.
5. Рассчитать остаточную нелинейность в пределах всего диапазона измерений, определив разность в каждой точке:

$$\Delta_R = R_g(t) - R_л(t),$$

и пересчитать ее в значения температуры

$$\Delta_t = \frac{\Delta_R}{K_T}.$$

Полученные значения остаточной нелинейности во всем диапазоне должны укладываться в условие

$$|\Delta_t| \le 0.1 \text{ K}.$$

Методика макетирования

Для макетирования используется та же лабораторная установка, что и в лабораторной работе № 1. На сборочной панели (рис. 1.3) с использованием коротких и длинных соединительных перемычек четыре магазина сопротивлений R_t, R_1, R_2 и R_3 соединяют в требуемый двухполюсник. Выход двухполюсника (зажимы А и Б) подсоединяют к входу омметра-компаратора ЩЗО. В качестве опорного магазина сопротивлений для ЩЗО используют магазин R_4.

С помощью собранного макета выполняют два измерительных эксперимента.

Эксперимент № 1

На магазине R_4 устанавливают значение $R_{gн} = 3000$ Ом. На омметре-компараторе ЩЗО включают диапазон ±20 % (реальное предельное значение шкалы 19.9 %). На магазинах R_1, R_2 и R_3 задают рассчитанные значения. С помощью магазина R_t производят имитацию изменений температуры от 0 до 20 °C установкой соответствующих значений R_t. В каждой имитируемой точке берут отсчет омметра. Результаты сводят в таблицу:

t °C	0	5	10	15	20
R_t Ом					
Отсчет					

При правильно выполненной работе отсчеты должны соответствовать значениям температуры с погрешностью, не превышающей ±0.1 K.

Эксперимент № 2

На омметре включают диапазон 2 %. С помощью магазина R_4 задают значения $R_л(t)$ в соответствующих точках имитируемого диапазона. Остальное, как и в эксперименте № 1. Результаты сводят в таблицу:

t °C	0	5	10	15	20
R_t Ом					
$R_л(t)$ Ом	3000	2850	2700	2550	2400
Отсчет N					
Δ_R^u					
Δ_t^u					

Значения остаточной нелинейности, полученные на макете, определяют по отсчетам N следующим образом:

$$\Delta_R^u = \frac{NR_л(t)}{100};$$

$$\Delta_t^u = \frac{\Delta_R^u}{K_T};$$

Значения $\left|\Delta_t^u\right|$ при правильно выполненной работе не должны превышать 0.1 K.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) теоретическая часть, содержащая *самостоятельно сделанные выводы* формул, о которых сказано в описании, а также иные формулы, требуемые для расчетов;
2) таблицы расчетов по рекомендованной форме;
3) таблицы результатов макетирования (эксперименты № 1 и 2);
4) краткие выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа № 3

Расчет и макетирование ОИП температуры с аналоговым выходным сигналом

Литература

Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 42–43.

Общие пояснения

Для получения в ОИП температуры аналогового выходного сигнала в виде изменений напряжения $U_в$ можно включить ППТР в качестве одного из плеч в схему моста постоянного тока. При этом нецелесообразно применять рассмотренные выше (см. лабораторные работы № 1 и 2) приемы коррекции нелинейности характеристики, поскольку функция преобразования $U_в(R_t)$ в свою очередь является нелинейной. В связи с этим в ОИП температуры мостового типа целесообразно применение самостоятельных приемов коррекции нелинейности с одновременным нормированием результирующей функции преобразования $U_в(t)$.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

В простейшем варианте моста постоянного тока (рис 3.1а) возможно получение линейной характеристики как в потенциальном ($R_в \to \infty$), так и в токовом ($R_в$ сравнимо с остальными R) вариантах. В частности, в потенциальном варианте линеаризация сводится к преобразованию функции

$$\varphi_1(t) = \frac{U_n R_2}{R_t + R_2} \tag{3.1}$$

в кривую с перегибом, что задается условием

$$\left.\frac{d^2\varphi_1(t)}{dt^2}\right|_{t=t_n} = 0. \qquad (3.2)$$

Причем в конкретной задаче получения линейной функции преобразования в диапазоне 0÷20 °C возможно также выполнение очень удобного для последующей регистрации условия

$$U_в(t)\big|_{t=t_n} = 0, \qquad (3.3)$$

что обеспечивается за счет выбора не влияющих на условие (3.2) значений сопротивлений R_3 и R_4 в соответствии с равенством

$$R_4 R_t(0) = R_2 R_3. \qquad (3.4)$$

Однако в таком простом варианте моста невозможно нормировать чувствительность преобразования, т.е. задать при всех применяемых ППТР с их реальным разбросом констант некоторую одинаковую изменчивость напряжения $U_в$ в диапазоне измерений. Причем, наиболее целесообразно, чтобы в числовом выражении эта изменчивость соответствовала изменчивости температуры. Например, для диапазона 0÷20 °C

$$U_в\big|_{t=0\,°C} = 0,$$
$$U_в\big|_{t=20\,°C} = 200 \text{ мВ}. \qquad (3.5)$$

Линеаризация с одновременным нормированием характеристики может быть осуществлена, если в термочувствительное плечо моста дополнительно включить постоянный резистор R_1 (рис.3.1б).

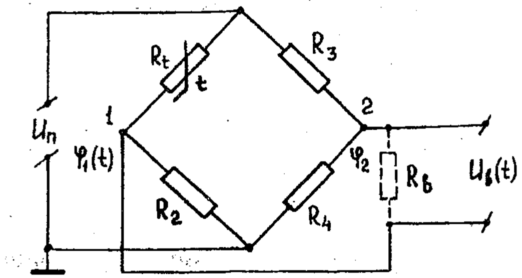
Выходное напряжение моста формируется как разность потенциалов

$$U_в(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \frac{U_n R_2}{R_t + R_1 + R_2} - \frac{U_n R_4}{R_3 + R_4} = \frac{aR_t + b}{cR_t + d}, \qquad (3.6)$$

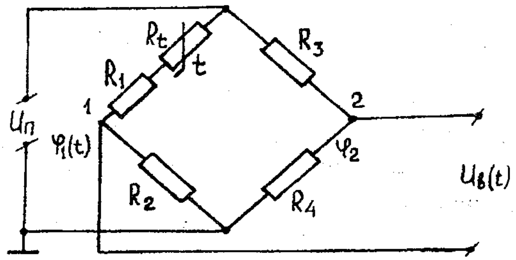
где

$a = -U_n R_4$; $b = U_n(R_2 R_3 - R_1 R_4)$; $c = R_3 + R_4$;

$d = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)$; U_n — напряжение питания моста.



а)



б)

Рис. 3.1 Мостовые схемы с ППТР

Поскольку выражение для $U_в(t)$, записанное в общем виде (3.6), совпадает по форме с выражением (2.1) из предыдущей лабораторной работы, то дальнейшие выводы условия перегиба

$$\left.\frac{d^2U_в(t)}{dt^2}\right|_{t=t_n} = 0$$

могут быть взяты в виде (2.3), т.е.

$$\frac{d}{c} = \frac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_t(t_n). \tag{3.7}$$

Отношение $\dfrac{d}{c}$ здесь тоже оказывается аналогичным, поскольку

$$\frac{d}{c} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_3 + R_4} = R_1 + R_2. \tag{3.8}$$

Рассчитанные формулы для всех четырех резисторов R_1, R_2, R_3 и R_4 могут быть получены с использованием дополнительных условий. Зададим баланс моста при $t = 0\ ^\circ\mathrm{C}$. Это приведет к условию

$$\frac{aR_t(0) + b}{cR_t(0) + d} = 0, \tag{3.9}$$

что эквивалентно первому из выражений (3.5). Второе из этих выражений даст следующее:

$$\frac{aR_t(20) + b}{cR_t(20) + d} = 200. \tag{3.10}$$

Зададимся также равенством токов в ветвях моста при $t = 0\ ^\circ\mathrm{C}$, что приведет к условию

$$R_2 = R_4. \tag{3.11}$$

Используя выражения (3.7)—(3.11), получим расчетные формулы (студенты самостоятельно выполняют вывод этих формул):

$$R_2 = R_4 = \frac{200\ \left[R_t(0) + \psi R_t(t_n)\right]\ \left[R_t(20) + \psi R_t(t_n)\right]}{U_n\left[R_t(0) - R_t(20)\right]};$$

$$R_1 = \psi R_t(t_n) - R_2; \qquad (3.12)$$
$$R_3 = R_t(0) + R_1,$$

где $\psi = \dfrac{B - 2T_n}{B + 2T_n}$.

Определив значения сопротивлений, по выражению (3.6) можно рассчитать реальную функцию преобразования мостовой схемы. Как и в предыдущих работах, она будет отличаться от прямой линии. “Чистая” линейная функция преобразования $U_л(t)$, очевидно, должна иметь следующие значения:

t °C	0	5	10	15	20
$U_л(t)$ мВ	0	50	10	150	200

Максимальные отклонения реальной $U_в(t)$ от “идеальной” $U_л(t)$ будут наблюдаться при $t = 5$ и 15 °C.

Исходные данные

1. Градуировочные данные четырёх терморезисторов из лабораторной работы № 1 с рассчитанными значениями в промежуточных точках диапазона.
2. $U_п = 1500$ мВ.
3. $U_в(0) = 0$.
4. $U_в = 200$ мВ. (20)
5. $t = 10$ °C и $T_n = 283$ K.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить вывод всех расчетных формул в соответствии с указаниями теоретической части описания работы.

2. Используя исходные данные, рассчитать значения R_1, R_2, R_3 и R_4.
3. Рассчитать по формуле (3.6) значения выходного напряжения моста в точках 0, 5, 10, 15 и 20 °C.
4. Рассчитать остаточную нелинейность в пределах диапазона $0 \div 20\,^{\circ}C$, определив разность в каждой точке:

$$\Delta_U = U_в(t) - U_л(t),$$

где $U_л(t)$ — аппроксимирующая линейная функция преобразования.
5. Пересчитать Δ_U в значения температуры Δ_t, учитывая, что коэффициент преобразования мостовой схемы равен 10 мВ / K. Полученные значения остаточной нелинейности во всем диапазоне должны соответствовать условию

$$|\Delta_t| \le 0.1\ K.$$

Методика макетирования

На сборочной панели 1 лабораторной установки (рис. 3.2) с использованием соединительных перемычек макетируют мост, соответствующий рис. 3.1б. С помощью милливольтметра 2, например типа В7-23, измеряют напряжение на выходных гнездах 3 источника питания 4. Оно должно быть равным 1500 мВ. При отклонении от этого значения производят подстройку в источнике 4. После этих контрольных измерений милливольтметр 2 подсоединяют к гнездам выходной диагонали моста.

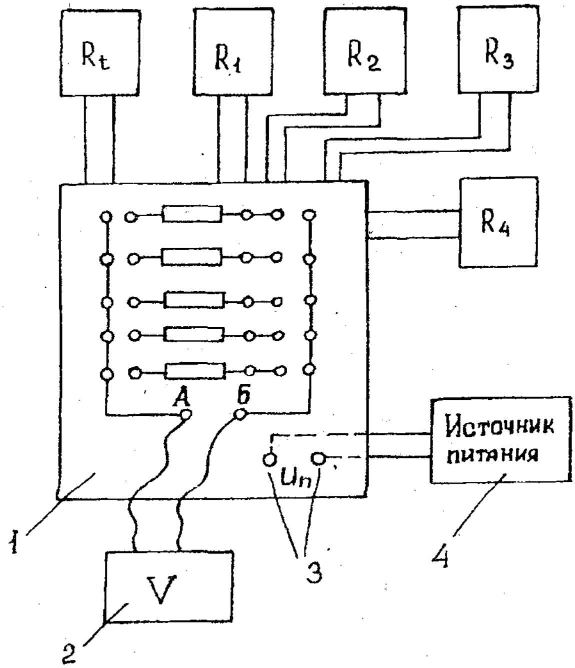


Рис. 3.2 Схема лабораторной установки для макетирования

На магазинах сопротивлений, которые использованы при макетировании, устанавливают значения R_1, R_2, R_3 и R_4, рассчитанные для 1-го ППТР. Задавая значение R_t для всех точек диапазона, измеряют значения $U_в(t)$. Результаты сводят в таблицу:

t °C	0	5	10	15	20
$R_t(t)$					
$U_в(t)$ мВ					
$U_л(t)$ мВ	0	50	10	150	200
Δ_U					
Δ_t					

Оценка результирующей погрешности Δ_t производится с учетом коэффициента преобразования 10 мВ / К. Значения Δ_t, как и при расчетах, должны соответствовать условию:

$$\left|\Delta_t\right| \leq 0.1 \text{ K}.$$

Макетирование выполняют для всех четырёх ППТР.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) теоретическая часть, содержащая *самостоятельно сделанные выводы* формул, о которых сказано в описании, а также иные формулы, требуемые для расчетов;
2) таблицы расчетов;
3) таблицы результатов макетирования;
4) краткие выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа № 4

Расчет амплитудно-частотной характеристики установки для измерений колебаний уровня

Литература

Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 195–197.

Общие пояснения

Наиболее распространенный вариант стационарной прибрежной установки для измерений колебания уровня (мареографной установки) представляет собой сочетание колодца и горизонтально расположенной трубы, соединяющей этот колодец с морем (рис 4.1а). Такое сочетание есть не что иное, как гидравлический фильтр, обеспечивающий пропускание низких частот (приливы, сгонно-нагонные колебания и др.) и задерживание колебаний высоких частот (ветровые волны, зыбь и др.). Эквивалентная схема фильтра (рис. 4.1б) содержит гидравлическое сопротивление $R_Г$, гидравлическую индуктивность $L_Г$ и гидравлическую емкость $C_Г$. Подобные фильтры обладают свойствами динамических систем второго порядка. При определенных условиях передаточная функция таких систем, как известно, может содержать резонансную частоту. Несомненно, что наличие резонанса является отрицательным фактором и требует изменения геометрических параметров установки до таких значений, при которых условия резонанса ликвидируются. В самом же общем случае, когда предстоит использовать информацию, полученную с помощью уже функционирующей мареографной установки, необходимо выполнение расчета и анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) этой установки. Только при наличии АЧХ возможна отбраковка ложной информации (например, из-за резонанса) и коррекция данных в области среза АЧХ.

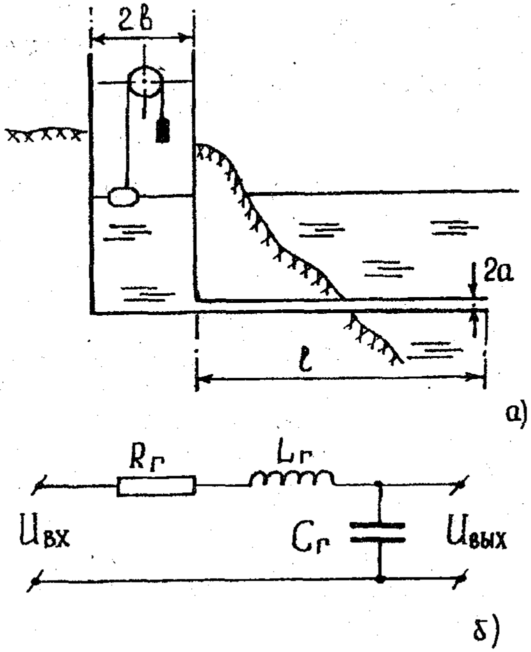


Рис. 4.1 Мареографная установка
а – конструкция, б – эквивалентная схема

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Выражение для передаточной функции установки (см. рис 4.1) может быть получено с использованием эквивалентной схемы. Учитывая, что индуктивное (Z_L) и емкостное (Z_C) сопротивления определяются формулами

$$Z_L = i\omega L_Г;$$
$$Z_c = \frac{i}{i\omega C_Г}, \qquad (4.1)$$

(где ω — круговая частота колебаний),получим результирующее выражение для полного сопротивления цепи (см. рис. 4.1б)

$$Z_{ОБЩ} = R_Г + i\omega L_Г + \frac{1}{i\omega C_Г} = \frac{1-\omega^2 L_Г C_Г + i\omega R_Г C_Г}{i\omega C_Г}. \quad (4.2)$$

Выражение для передаточной функции найдем в виде отношения напряжений:

$$F(i\omega) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{J_{\sim} Z_C}{U_{ВХ}} = \frac{Z_C}{Z_{ОБЩ}} = \frac{1}{1-\omega^2 L_Г C_Г + i\omega R_Г C_Г}. \quad (4.3)$$

Здесь ток $J_{\sim} = \dfrac{U_{ВХ}}{Z_{ОБЩ}}$.

Амплитудно-частотная характеристика, как известно, определяется как модуль передаточной функции

$$|F(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2 L_Г C_Г)^2 + \omega^2 R_Г^2 C_Г^2}}. \quad (4.4)$$

Возможность наличия резонанса в мареографной установке может быть выявлена путем анализа выражения

$$\left.\frac{d|F(i\omega)|}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_p} = 0, \quad (4.5)$$

из которого можно получить (студенты делают вывод самостоятельно)

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L_Г C_Г} - \frac{R_Г^2}{2L_Г^2}}. \qquad (4.6)$$

Если подкоренное выражение больше нуля, то, очевидно, в установке существуют условия резонанса. Если оно равно нулю или меньше нуля, то резонанс отсутствует.

Значения $R_Г$, $L_Г$, и $C_Г$ можно определить по формулам:

$$R_Г = \frac{l}{16\pi} \sqrt[4]{\frac{\rho_w^3 \eta V_{cp}^3}{a^{13}}}; \qquad (4.7)$$

$$L_Г = \frac{\rho_w l}{\pi a^2}; \qquad (4.8)$$

$$C_Г = \frac{\pi b^2}{\rho_\omega g}, \qquad (4.9)$$

где l — длина трубы; ρ_w— плотность морской воды; η — динамическая вязкость воды; V_{cp}— скорость потока в трубе; a — радиус трубы; b — радиус колодца; g — ускорение свободного падения.

Формула (4.7) обычно применяется при турбулентном режиме потока воды в трубе. При ламинарном потоке используют более простую формулу

$$R_Г = \frac{8\eta l}{\pi a^4}. \qquad (4.9)$$

Оценка характеристики потока производится путем расчета числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{a \rho V_{cp}}{\eta}. \qquad (4.10)$$

Как известно, если рассчитанное число Рейнольдса превышает критическое значение ($Re > Re_{крит}$), то поток считается турбулентным, в противном случае ($Re < Re_{крит}$) — ламинарным. Для труб, применяемых в мареографных установках, принято считать $Re_{крит} = 2500$.

Для расчетов по формулам (4.7) и (4.10) необходима средняя скорость потока в трубе $V_{ср}$. Ее можно определить по формуле

$$V_{ср} = \frac{4b^2h}{a^2T} = \frac{2b^2h\omega}{\pi a^2}, \tag{4.11}$$

где h — амплитуда волновых колебаний в море; T — период этих колебаний; $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ — круговая частота колебаний; a — как и ранее, радиус трубы; b — радиус колодца.

Очевидно, что скорость $V_{ср}$ для всего диапазона колебаний уровня (от ветровых волн до приливных колебаний) получается существенно переменной. При практических расчетах АЧХ это необходимо учитывать. Однако для целей лабораторной работы упростим задачу и примем $V_{ср} \approx 0.5$ м/с, что характерно для колебаний с периодами порядка 5÷20 мин, т.е. вблизи ожидаемой максимальной изменчивости АЧХ.

Исходные данные

Параметры установки	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина трубы, м	9	10	11	12	15	15	10	12	10	12
Радиус трубы, см	4.5	5.0	3.5	4.5	5.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0
Радиус колодца, м	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.8	0.8	0.6	0,6

Примечание. Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Остальные данные, требуемые для расчетов, студенты находят для средних значений характеристик морской воды: $T = 15\ ^\circ\mathrm{C}$, $S = 25$ ‰, используя справочники (например, “Океанографические таблицы”).

Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность расчетных формул путем проверки размерностей, учитывая, что размерность произведений:
   $[R_Г C_Г]$ — с (секунды);
   $[L_Г C_Г]$ — с^2 (секунда в квадрате).
2. Рассчитать значение Re и, сопоставив его с $\mathrm{Re}_{крит}$, выбрать формулу для расчёта $R_Г$.
3. Рассчитать значения $R_Г$, $L_Г$ и $C_Г$.
4. Рассчитать значение резонансной частоты ω_p. Сделать вывод о наличии либо отсутствии резонанса.
5. Рассчитать значения амплитудно-частотной характеристики для всего диапазона возможных периодов (от ветровых волн до приливных колебаний). Расчет выполнить для 20 точек, *неравномерно* распределенных по диапазону. Выбор точек производится самостоятельно. Наиболее целесообразно “учащение” расчетов в области резкого спада значений $|F(i\omega)|$ (“срез” фильтра), а при наличии резонанса — обязательно при $\omega = \omega_p$, а также в окрестностях этой частоты.

   Результаты расчетов необходимо свести в таблицу:

№	T, с	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$\lg \omega$	$\lvert F(i\omega)\rvert$
1				
2				
3				
.				
.				

6. Построить график АЧХ. По оси ординат — значение $|F(i\omega)|$, по оси абсцисс— значение частоты ω в логарифмическом масштабе. Параллельно оси абсцисс разместить шкалу периодов колебаний, указав на ней характерные диапазоны (ветровые волны, зыбь, цунами и сейши и т.д.). Пример построения графика показан на рис.4.2.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) теоретическая часть, содержащая *самостоятельно сделанные выводы* формул, о которых сказано в описании, и выполненную проверку размерностей;

2) таблица расчетов;

3) график амплитудно-частотной характеристики;

4) краткие выводы по выполненной работе.

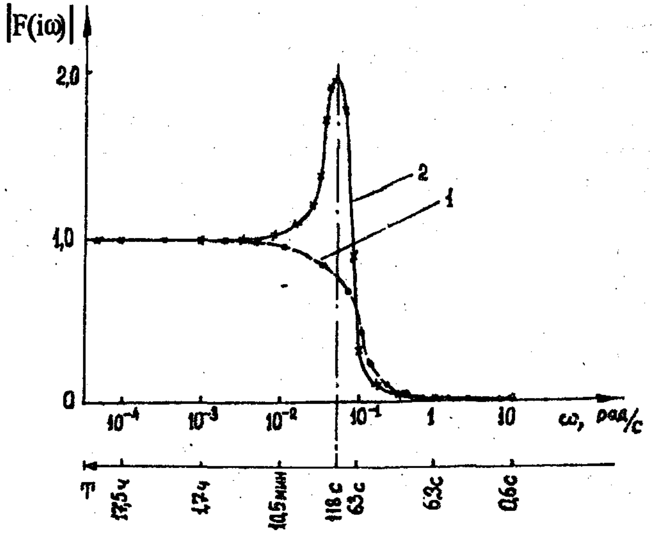


Рис. 4.2 Амплитудно-частотные характеристики мареографных установок
(1 – при отсутствии резонанса, 2 – при наличии резонанса)

Лабораторная работа № 5

Расчет полосового гидравлического фильтра для выделения длиннопериодных волн

Литература

Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи.— Л.: Гидрометеоиздат, 1986, с. 197–201.

Общие пояснения

Выделение длиннопериодных волн, например цунами, можно осуществить с помощью полосовых гидравлических фильтров, пропускающих колебания (в виде изменений уровня, либо изменений давления), характерные для цунами, и задерживающих колебания остальных периодов. Обычно применяются моночастотные конструкции фильтров, у которых форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) близка к колоколообразной и содержит экстремум только на одной частоте. Такие конструкции сравнительно просты и весьма эффективны, хотя им свойственна большая неравномерность АЧХ в полосе пропускания. Резкое уменьшение неравномерности АЧХ (повышение прямоугольности) можно получить в двухчастотных фильтрах, обычно представляющих собой сочетание двух последовательно включенных моночастотных фильтров со смещенными относительно друг друга частотами экстремумов АЧХ. Однако это приводит к существенному усложнению конструкции.

В лабораторной работе рассматриваются моночастотные полосовые фильтры. Конструкции таких фильтров весьма разнообразны. Одна из сравнительно простых конструкций представляет собой сочетание мареографных установок, которые можно реализовать как в “классическом” виде колодца с длинной трубой, так и в иных вариантах, например в виде вертикально установленной трубы, соединенной с морем в нижней части посредством тонкой и сравнительно короткой трубки. Во всех этих вариантах рабочей жидкостью фильтров является непосредственно морская вода.

Однако более широкое применение, по-видимому, в силу своей компактности, получили полосовые фильтры со специальными видами рабочей жидкости. Малые габариты фильтров реализуются за счет высокой динамической вязкости жидкости, которая позволяет получать большие значения гидравлического сопротивления у сравнительно коротких трубок.

В лабораторной работе изучаются оба варианта конструкций. При выполнении работы студенты самостоятельно выбирают вариант и производят требуемые расчеты в соответствии с описанием этого варианта.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Вариант 1

Рассмотрим сочетание рядом расположенных мареографных установок (рис. 5.1а).

В самом общем случае у этих установок различны геометрические размеры колодцев и труб, связывающих эти колодцы с морем. Соответственно различны эквивалентные емкости $C_Г$, сопротивления $R_Г$ и индуктивности $L_Г$. На вход труб воздействует один и тот же сигнал — колебания уровня. На эквивалентной схеме (рис. 5.1б) этот сигнал указан в виде входного напряжения $U_{вх}$, подаваемого на мостовую схему. Уровень в каждом из колодцев, воспринимаемый преобразователями ИП1 и ИП2, отображен на эквивалентной схеме в виде потенциалов φ_1 и φ_2 (падений напряжения на емкостях $C_{Г1}$ и $C_{Г2}$). Выходным сигналом является разность уровней в обоих колодцах, что отображается на схеме в виде $U_{вых} = \varphi_1 - \varphi_2$.

Такая конструкция должна обладать свойствами полосового фильтра. Действительно, короткопериодные колебания уровня моря (ветровые волны, зыбь) не пропускаются в оба колодца из-за сравнительно больших значений $R_Г$ и $L_Г$, а приливные либо сгонно-нагонные колебания пропускаются практически одинаково, и поэтому не возникает разностного сигнала между ИП1 и ИП2. В то же время среднепериодные колебания (единицы и десятки минут) пропускаются в колодцы по-разному, вызывая различия уровней (потенциалов φ_1 и φ_2 на эквивалентной схеме).

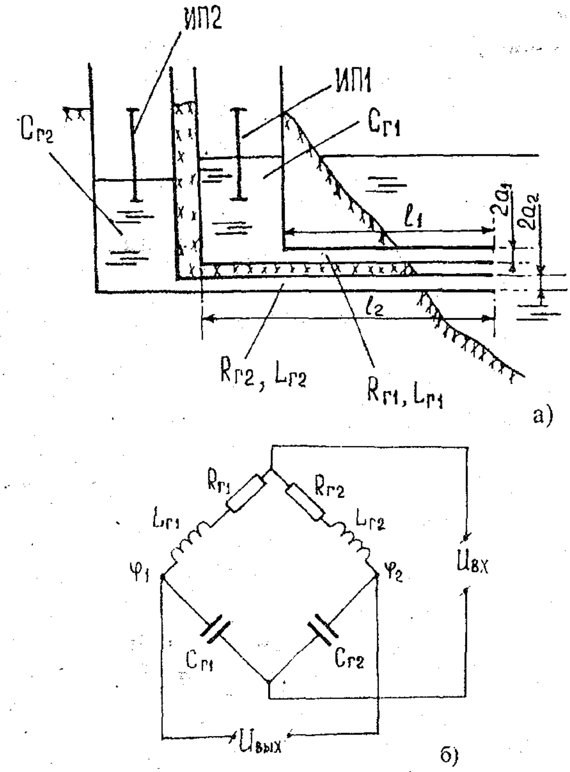


Рис. 5.1 Полосовой гидравлический фильтр на основе сочетания двух мареографных установок
а – конструкция, б – эквивалентная схема

На основе эквивалентной схемы (см. рис. 5.1б) найдем передаточную функцию рассматриваемой мареографной системы. Используя простейшие периодические формы сигналов:

$$U_{вх} = U_{m1} e^{i\omega\tau};$$

$$U_{зых} = U_{m2} e^{i(\omega\tau + \psi)},$$

где ψ – фазовый сдвиг,
определим передаточную функцию в виде

$$F(i\omega) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{U_{вх}} = \frac{\varphi_1}{U_{вх}} - \frac{\varphi_2}{U_{вх}} = F_1(i\omega) - F_2(i\omega), \qquad (5.1)$$

где $F_1(i\omega)$ и $F_2(i\omega)$ — отдельные передаточные функции мареографных колодцев.

Поскольку

$$\varphi_1 = \frac{U_{вх} \dfrac{1}{i\omega C_{Г1}}}{R_{Г1} + i\omega L_{Г1} + \dfrac{1}{i\omega C_{Г1}}} = \frac{U_{вх}}{1 - \omega^2 L_{Г1} C_{Г1} + i\omega R_{Г1} C_{Г1}};$$

$$\varphi_2 = \frac{U_{вх} \dfrac{1}{i\omega C_{Г2}}}{R_{Г2} + i\omega L_{Г2} + \dfrac{1}{i\omega C_{Г2}}} = \frac{U_{вх}}{1 - \omega^2 L_{Г2} C_{Г2} + i\omega R_{Г2} C_{Г2}},$$

то (подробный вывод студенты делают самостоятельно):

$$F(i\omega) = \frac{(A - C) + i(B - D)}{(A + iB)(C + iD)}, \qquad (5.2)$$

где $A = 1 - \omega^2 L_{Г2} C_{Г2}$; $B = \omega R_{Г2} C_{Г2}$; $C = 1 - \omega^2 L_{Г1} C_{Г1}$;
$D = \omega R_{Г1} C_{Г1}$.

(6)

Выражение для АЧХ получается следующим (студенты делают вывод самостоятельно):

$$|F(i\omega)| = \frac{\sqrt{\left[AC(A-C)+B^2C-AD^2\right]^2+\left[D(A^2+B^2)-B(C^2+D^2)\right]^2}}{(A^2+B^2)\ (C^2+D^2)}. \quad (5.3)$$

При реализации полосовой АЧХ необходимо устранить возможность появления резонансов у отдельных установок. Условие резонанса анализировалось ранее (см. лабораторную работу № 4), и в расчетном виде выглядит следующим образом:

$$\omega_P = \sqrt{\frac{1}{L_\Gamma C_\Gamma} - \frac{R_\Gamma^2 C_\Gamma^2}{2L_\Gamma^2 C_\Gamma^2}}. \quad (5.4)$$

(5)

Тем самым, отсутствие резонанса у обоих колодцев может быть задано условиями:

$$\begin{aligned} R_{\Gamma 1}^2 C_{\Gamma 1}^2 &\geq 2L_{\Gamma 1}C_{\Gamma 1}; \\ R_{\Gamma 2}^2 C_{\Gamma 2}^2 &\geq 2L_{\Gamma 2}C_{\Gamma 2}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

При этих условиях подкоренное выражение в формуле вида (5.4) является отрицательным или равным нулю.

Для дальнейших выводов наиболее целесообразно использовать предельные взаимосвязи в условиях (5.5), т.е. равенства. Благодаря этому можно получить достаточно простые выражения для частоты среза каждой установки:

$$\begin{aligned} \omega_{C1} &= \frac{2\pi}{T_{C1}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\Gamma 1}C_{\Gamma 1}}}; \\ \omega_{C2} &= \frac{2\pi}{T_{C2}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\Gamma 2}C_{\Gamma 2}}}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

(1)

где T_{C1} и T_{C2} — периоды колебаний уровня на частотах среза.

Выражения (5.6) студенты должны получить самостоятельно, учитывая, что

$$\left|F_1(i\omega)\right|^2\Big|_{\omega=\omega_{C1}} \approx 0.5;$$
$$\left|F_2(i\omega)\right|^2\Big|_{\omega=\omega_{C2}} \approx 0.5. \tag{5.7}$$

Задавая ω_{C1} и ω_{C2} в качестве оценок границ полосы пропускания, найдем расчетные выражения для геометрических параметров установок (студенты получают выражения самостоятельно):

$$a_1 = 0.25\sqrt[5]{\frac{2\eta V_{\ell p}^3}{\rho_w \omega_{C1}^4}};$$
$$a_2 = 0.25\sqrt[5]{\frac{2\eta V_{\ell p}^3}{\rho_w \omega_{C2}^4}};$$

(2)

$$\ell_1 = \frac{a_1^2 g}{b_1^2 \omega_{C1}^2};$$
$$\ell_2 = \frac{a_2^2 g}{b_2^2 \omega_{C2}^2}. \tag{5.8}$$

(3)

(4) R_p, C_p, L_p по труб

При выводе формул (5.8) используются выражения для $R_Г$, $C_Г$ и $L_Г$ из лабораторной работы № 4 при условии турбулентного потока в трубах и соответственно с индексами: "1" — для установки с передаточной функцией $F_1(i\omega)$ и "2" — для установки с функцией $F_2(i\omega)$. Кроме того, выражения (5.5), как и ранее, используются в виде равенств.

Задачей работы является расчет геометрических параметров установки и ее амплитудно-частотной характеристики.

При расчетах геометрических параметров (длин труб ℓ_1, ℓ_2 и радиусов a_1 и a_2 труб) целесообразно априорно задать радиусы мареографных колодцев b_1 и b_2. Рекомендуется $b_1 = b_2 = 0.7$ м. Также рекомендуется использовать при расчетах $V_{ср} \approx 0.5$ м/с. Остальные данные (ρ_w, η, g) следует найти в справочниках, причем значения ρ_w и η взять те, которые соответствуют средним значениям температуры и солености морской воды ($T = 15\ ^\circ\text{C}$, $S = 25$ ‰).

<u>Вариант 2</u>

Малогабаритные полосовые фильтры со специальными видами рабочей жидкости, как правило, представляют собой герметичные конструкции, например в виде объемов (емкостей) 1 и 2 (рис.5.2а), разделенных упругой перегородкой 3 и связанных посредством узких трубок 4 и 5 с входным сильфоном 6. Емкости 1 и 2 расположены вертикально, и их верхние части заполнены газом. Сильфон 6 обладает очень малой жесткостью, установлен лишь с целью разделения рабочей жидкости фильтра и окружающей морской воды, и его характеристики в дальнейшем анализе не учитываются.

Эквивалентная электрическая схема фильтра может быть представлена в виде *RC*-моста (рис. 5.2б). Здесь узкие трубки 4 и 5 отображены гидравлическими сопротивлениями $R_{Г1}$ и $R_{Г2}$, а объемы 1 и 2 — гидравлическими емкостями $C_{Г1}$ и $C_{Г2}$.

Найдем передаточную функцию фильтра в соответствии с эквивалентной схемой (студенты находят ее самостоятельно). Получим

$$F(i\omega) = \frac{i\omega(R_{Г1}C_{Г1} - R_{Г2}C_{Г2})}{(1 - \omega^2 R_{Г1}C_{Г1}R_{Г2}C_{Г2}) + i\omega(R_{Г1}C_{Г1} + R_{Г2}C_{Г2})}. \quad (5.9)$$

Соответственно амплитудно-частотная характеристика будет следующей:

$$|F(i\omega)| = \frac{\omega(R_{Г1}C_{Г1} - R_{Г2}C_{Г2})}{\sqrt{(1 - \omega^2 R_{Г1}C_{Г1}R_{Г2}C_{Г2})^2 + \omega^2(R_{Г1}C_{Г1} + R_{Г2}C_{Г2})^2}}. \quad (5.10)$$

(4)

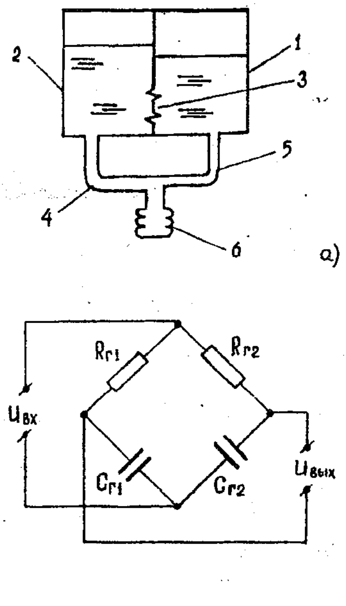


Рис. 5.2 Малогабаритный полосовой гидравлический фильтр
а – конструкция, б – эквивалентная схема

Очевидно, что центральная частота $\omega_ц$ полосы пропускания фильтра определяется из условия

$$\left.\frac{d\left|F(i\omega)\right|}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_ц} = 0. \qquad (5.11)$$

В соответствии с этим получим (студенты делают вывод самостоятельно):

$$\omega_ц = \frac{1}{\sqrt{R_{Г1}C_{Г1}R_{Г2}C_{Г2}}}. \qquad (5.12)$$

Вид АЧХ на частоте $\omega_ц$ получается следующим:

$$\left|F(i\omega)\right\|_{\omega=\omega_{ц}} = \frac{R_{Г1}C_{Г1} - R_{Г2}C_{Г2}}{R_{Г1}C_{Г1} + R_{Г2}C_{Г2}}. \qquad (5.13)$$

Как следует из выражения (5.13), максимальное значение АЧХ в полосе пропускания всегда меньше единицы. Его можно задать из следующих соображений. Произведения $R_Г C_Г$ это не что иное, как “обратные” частоты срезов отдельных ветвей моста

$$\begin{aligned} R_{Г1}C_{Г1} &= \frac{1}{\omega_{C1}} = \frac{T_{C1}}{2\pi}; \\ R_{Г2}C_{Г2} &= \frac{1}{\omega_{C2}} = \frac{T_{C2}}{2\pi}, \end{aligned} \qquad (5.14)$$

где T_{C1} и T_{C2} — периоды колебаний уровня, соответствующие частотам срезов.

В таком случае получим

$$\left|F(i\omega)\right\|_{\omega=\omega_{ц}} = \frac{T_{C1} - T_{C2}}{T_{C1} + T_{C2}}, \qquad (5.15)$$

а из выражения (5.12)

$$T_{ц} = \frac{2\pi}{\omega_{ц}} = \sqrt{T_{C1}T_{C2}}. \qquad (5.16)$$

При конструировании фильтра можно задать:

а) “граничные” периоды полосы пропускания T_{C1} и T_{C2}, как в предыдущем варианте, и по выражению (5.16) рассчитать период $T_{ц}$ максимума АЧХ, а по выражению (5.15) рассчитать само максимальное значение АЧХ;

б) период $T_{ц}$ максимума АЧХ и одну из границ полосы (T_{C1} или T_{C2}), все остальное рассчитывается по формулам (5.15) и (5.16);

в) период $T_ц$ и значение $|F(i\omega)|$ для этого периода.

В силу того что АЧХ фильтра в полосе пропускания является существенно неравномерной, необходим ее полный расчет независимо от выбранного варианта задания исходных требований. При этом реальная ширина полосы пропускания, например оцениваемая по уровню ≈ 0.707 относительно значения АЧХ при $\omega_ц$, оказывается больше задаваемой изначально.

Расчет величин $R_Г$ выполняется по формуле

$\ell = 20$ см

$$R_Г = \frac{8\eta\ell}{\pi a^4}, \qquad (5.17)$$

(2) $a = 5$ мм

используемой обычно при ламинарном потоке (см. лабораторную работу № 4).

Для конструкции, показанной на рис. 5.2а, гидравлическая емкость определяется сжатием объема газа и рассчитывается по формуле

$$C_Г = \frac{\alpha V}{P}, \qquad (5.18)$$

(1)

где α — коэффициент, зависящий от режима сжатия газа; при изотермическом режиме, который характерен для конструкции, рассчитываемой в данной работе, $\alpha = 1$; V — объем, занимаемый газом; P — давление, действующее на газ.

Задачей работы является расчет геометрических параметров конструкции фильтра, а также его амплитудно-частотной характеристики. При расчетах целесообразно задать: $C_{Г1} = C_{Г2}$, значение объема V для каждой емкости порядка 1000 см^3; действующее давление $P = 10^5$ Па. В качестве рабочей жидкости лучше всего использовать полиметилсилоксановую жидкость № 3, динамическая вязкость которой $\eta = 0.02$ Па·с при $T = 20\ ^\circ\mathrm{C}$. Необходимо также задать один из размеров трубок, например их длину ℓ.

Исходные данные

Период, с	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{C1}	20	25	30	40	50	55	60	60	70	75
T_{C2}	100	120	150	200	220	270	280	300	320	350

Примечание. Студенты ФЗО используют номер варианта, соответствующий последней цифре номера их зачетной книжки.

Остальные данные, требуемые для расчетов, указаны в описании либо (при отсутствии таких указаний) должны быть самостоятельно найдены в справочниках.

Порядок выполнения работы

1. Изучить варианты конструкций, выбрать для последующих расчетов один из вариантов.
2. Рассчитать геометрические параметры элементов конструкции фильтра — диаметры и длины труб, размеры емкостей. Результаты расчетов свести в самостоятельно составленную таблицу.
3. Рассчитать амплитудно-частотную характеристику фильтра. Расчет выполнить не менее чем для 20 точек, *неравномерно* распределенных по диапазону. Диапазон должен существенно "выходить" за пределы частот срезов — приблизительно до значений $|F(i\omega)|$ порядка 0.05 по обе стороны от полосы пропускания. Результаты расчетов представить в виде таблицы.
4. Построить график АЧХ. Использовать указания к построению аналогичного графика из лабораторной работы № 4. Пример графика показан на рис. 5.3.

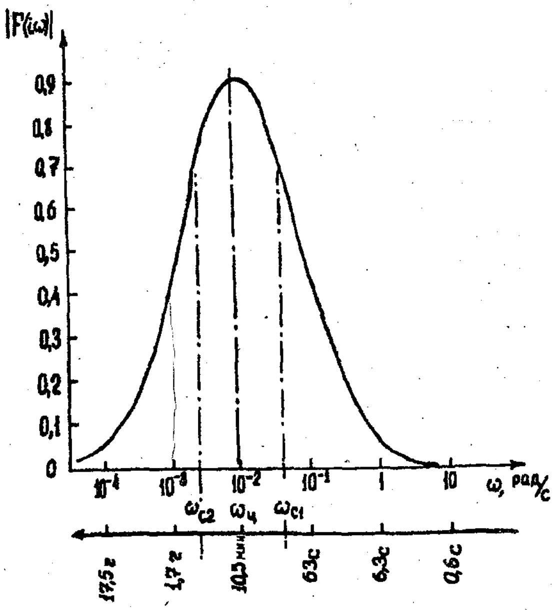


Рис. 5.3 Амплитудно-частотная характеристика полосового гидравлического фильтра

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1) теоретическая часть, включающая требуемые для расчета формулы, а также *самостоятельно сделанные выводы* формул, о которых сказано в описании;
2) таблицы расчетов;
3) график амплитудно-частотной характеристики;
4) краткие выводы по выполненной работе.

Учебное издание

ИВАН АНТОНОВИЧ СТЕПАНЮК

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ОКЕАНОЛОГИИ
Руководство к лабораторным работам
Учебное пособие

Редактор О. Д. Рейнгеверц
ЛР № 020309
от 30.12.1996

Подписано в печать 22.06.98. Формат 60×90 1/16.
Печ. л. 5,6 Тир. 200 Бумага офсетная. Печать офсетная.
Зак. 342

195196, СПб, Малоохтинский пр. 98. РГГМУ