

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Севастопольский национальный технический университет

Ю.В. Матвеев

МЕТРОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Рекомендовано
Министерством образования и науки Украины
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
которые обучаются по направлениям подготовки
“Электромеханика” и “Морской и речной транспорт”

Севастополь 2014

УДК 006.91.621.317.3 (075.8)

ББК 30.10 я73

МЗЗ

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой “Приборы и методы неразрушающего контроля” Национального технического университета “Харьковский политехнический институт” Г.М. Сучков;

к-т техн. наук, доц., заведующий кафедрой технологий измерения и оценивания Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности Е.Н. Сычев;

к-т техн. наук, доцент кафедры электроснабжения городов Харьковской национальной академии городского хозяйства С.В. Швец.

Научный редактор — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета В.Я. Копп.

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, которые обучаются по направлениям подготовки “Электромеханика” и “Морской и речной транспорт”
(письмо № 1/11-5545 от 15.04.2014 г.)*

Матвеев Ю.В.

МЗЗ Метрология и электрические измерения: учеб. пособие / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевНТУ, 2014. — 232 с.
ISBN 978-617-612-075-9

Учебное пособие соответствует дисциплинам “Основы метрологии и электрических измерений” и “Метрология и электрические измерения”. В нем изложены основные понятия в метрологии и теории электрических измерений, а также методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 6.050702 — “Электромеханика”, 6.070104 — “Морской и речной транспорт”.

Книга может быть также полезна студентам, обучающимся по направлению подготовки 6.051003 — “Приборостроение”.

Матвеев Ю.В.

МЗЗ Метрологія та електричні вимірювання: навч. посібник / Ю. В. Матвеев. — Севастополь: СевНТУ, 2014. — 232 с.
ISBN 978-617-612-075-9

Навчальний посібник відповідає дисциплінам “Основы метрології та електричних вимірювань” і “Метрологія та електричні вимірювання”. У ньому викладено основні поняття в метрології та теорії електричних вимірювань, а також методи і засоби вимірювань електричних і неелектричних величин.

Посібник призначений для студентів, які навчаються за напрямками підготовки: 6.050702 — “Електромеханіка”, 6.070104 — “Морський та річковий транспорт”.

Книга може бути також корисна студентам, які навчаються за напрямком підготовки 6.051003 — “Приладобудування”.

УДК 006.91.621.317.3 (075.8)
ББК 30.10 я73

© Ю.В. Матвеев, 2014
© СевНТУ, 2014

ISBN 978-617-612-075-9

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	8
Список принятых сокращений.....	9
Список условных обозначений.....	11
Часть 1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ.....	13
1.1 Основные понятия и определения в метрологии.....	13
1.1.1 Сущность метрологии.....	13
1.1.2 Международная система единиц физических величин.....	13
1.1.3 Основные понятия в метрологии.....	15
1.1.4 Виды измерений.....	15
1.1.5 Виды средств измерений.....	17
1.1.6 Контрольные вопросы	19
1.2 Погрешности измерений и измерительных приборов.....	20
1.2.1 Классификация погрешностей.....	20
1.2.2 Нормирование погрешностей средств измерений	22
1.2.3 Критерии качества измерений.....	27
1.2.4 Правила округления и записи результата измерений	27
1.2.5 Метрологические характеристики средств измерений	28
1.2.6 Поверка средств измерений.....	29
1.2.7 Маркировка, буквенные коды и классификация электроизмерительных приборов.....	30
1.2.8 Контрольные вопросы	31
1.3 Оценка случайных погрешностей.....	32
1.3.1 Случайные погрешности.....	32
1.3.2 Оценки случайных погрешностей	35
1.3.3 Обработка результатов прямых измерений.....	39
1.3.3.1 Обработка результатов прямых однократных измерений.....	39
1.3.3.2 Обработка результатов прямых многократных измерений.....	39
1.3.4 Обработка результатов косвенных измерений.....	44
1.3.5 Контрольные вопросы	46
Часть 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.....	47
2.1 Устройство и характеристики электромеханических приборов.....	47
2.1.1 Устройство и принцип работы электромеханических приборов.....	47
2.1.2 Классификация электромеханических приборов.....	48
2.1.3 Основные характеристики электромеханических приборов.....	49
2.1.4 Контрольные вопросы.....	50
2.2 Магнитоэлектрические и электромагнитные приборы.....	51
2.2.1 Устройство и принцип работы магнитоэлектрических измерительных механизмов	51
2.2.2 Устройство и принцип работы магнитоэлектрического логометра...	53
2.2.3 Применение магнитоэлектрических приборов.....	54

2.2.4 Устройство и принцип работы электромагнитных измерительных механизмов.....	55
2.2.5 Устройство и принцип работы электромагнитного логометра.....	58
2.2.6 Применение электромагнитных приборов.....	59
2.2.7 Контрольные вопросы.....	60
2.3 Электродинамические и ферродинамические приборы.....	61
2.3.1 Устройство и принцип работы электродинамического измерительного механизма	61
2.3.2 Включение электродинамического измерительного механизма для измерения тока и напряжения.....	62
2.3.3 Включение электродинамического измерительного механизма для измерения мощности	63
2.3.4 Устройство и принцип работы электродинамического логометра	64
2.3.5 Применение электродинамических приборов.....	64
2.3.6 Устройство и принцип работы ферродинамических приборов.....	65
2.3.7 Контрольные вопросы	67
2.4 Электростатические и индукционные приборы.....	68
2.4.1 Устройство и принцип работы электростатических измерительных механизмов	68
2.4.2 Применение электростатических приборов.....	69
2.4.3 Устройство и принцип работы индукционных измерительных механизмов.....	70
2.4.4 Применение индукционных приборов.....	72
2.4.5 Контрольные вопросы.....	73
Часть 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ...	74
3.1 Измерение постоянных токов и напряжений аналоговыми приборами...	74
3.1.1 Расширение пределов измерений амперметров и вольтметров в цепях постоянного тока	74
3.1.2 Измерение малых значений постоянных токов и напряжений.....	76
3.1.3 Измерение средних значений постоянных токов и напряжений.....	77
3.1.4 Измерение больших значений постоянных токов и напряжений.....	78
3.1.5 Электронные вольтметры постоянного тока.....	80
3.1.6 Потенциометры постоянного тока.....	81
3.1.7 Контрольные вопросы	83
3.2 Измерение переменных токов и напряжений аналоговыми приборами..	84
3.2.1 Параметры электрических сигналов.....	84
3.2.2 Способы измерения переменных токов и напряжений.....	85
3.2.3 Схемы трансформаторных преобразователей напряжения.....	87
3.2.4 Измерительные трансформатора тока.....	87
3.2.5 Измерительные трансформаторы напряжения.....	91
3.2.6 Вольтметры прямого преобразования и сравнения.....	94
3.2.7 Аналоговые электронные вольтметры.....	95
3.2.8 Измерительные преобразователи.....	100
3.2.9 Контрольные вопросы	106

3.3 Аналоговые частотомеры и фазометры.....	107
3.3.1 Электродинамические фазометры	107
3.3.2 Электромеханические вибрационные частотомеры.....	108
3.3.3 Электродинамические и электромагнитные частотомеры.....	109
3.3.4 Электронные частотомеры.....	112
3.3.5 Контрольные вопросы.....	113
3.4 Ваттметры и счетчики электрической энергии.....	114
3.4.1 Измерение активной мощности в однофазной цепи переменного тока.....	114
3.4.2 Измерение активной мощности в трехфазной цепи.....	114
3.4.3 Измерение реактивной мощности.....	117
3.4.4 Счетчики электрической энергии.....	120
3.4.5 Контрольные вопросы.....	123
Часть 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....	124
4.1 Анализаторы спектра.....	124
4.1.1 Основные свойства анализа.....	124
4.1.2 Классификация анализаторов спектра.....	125
4.1.3 Характеристики анализаторов спектра.....	127
4.1.4 Фильтровые схемы анализаторов спектра.....	129
4.1.5 Дисперсионные анализаторы спектра.....	133
4.1.6 Рециркуляционные анализаторы спектра.....	134
4.1.7 Контрольные вопросы.....	136
4.2 Измерители нелинейных искажений и анализаторы гармоник	137
4.2.1 Основные свойства анализа нелинейных искажений.....	137
4.2.2 Автоматический измеритель нелинейных искажений	140
4.2.3 Анализаторы гармоник.....	141
4.2.4 Контрольные вопросы.....	143
4.3 Электронные осциллографы.....	144
4.3.1 Назначение электронного осциллографа.....	144
4.3.2 Устройство электронно-лучевой трубки.....	145
4.3.3 Принцип получения осциллограммы.....	146
4.3.4 Устройство электронно-лучевого осциллографа.....	148
4.3.5 Принцип работы электронно-лучевого осциллографа.....	149
4.3.6 Осциллографические измерения.....	151
4.3.6.1 Процесс подготовки к работе с осциллографом.....	151
4.3.6.2 Процесс подготовки осциллографа к измерениям.....	152
4.3.6.3 Наблюдение периодических сигналов с помощью осциллографа.....	152
4.3.6.4 Наблюдение импульсных процессов с помощью осциллографа...	153
4.3.6.5 Измерение амплитуды и частоты исследуемого напряжения с помощью осциллографа.....	154
4.3.6.6 Измерение длительности импульса с помощью осциллографа.....	155
4.3.6.7 Измерение сдвига фаз с помощью осциллографа	156
4.3.6.8 Измерение частоты осциллографическим способом.....	157
4.3.7 Контрольные вопросы.....	160

Часть 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ОБОРУДОВАНИЯ И МАШИН.....	161
5.1 Измерительные мосты.....	161
5.1.1 Основные соотношения.....	161
5.1.2 Мосты постоянного тока.....	162
5.1.2.1 Одинарные мосты постоянного тока.....	162
5.1.2.2 Двойной мост Томсона.....	163
5.1.3 Мосты переменного тока.....	165
5.1.3.1 Мосты для измерения индуктивностей.....	165
5.1.3.2 Мосты для измерения емкостей конденсаторов.....	165
5.1.3.3 Мосты для измерения частоты.....	166
5.2 Измерение сопротивления изоляции с помощью мегаомметра.....	167
5.2.1 Устройство и назначение мегаомметра.....	167
5.2.2 Порядок измерения сопротивления изоляции с помощью мегаомметра.....	169
5.2.3 Значения сопротивлений изоляции проводов, кабелей, аппаратов, силового оборудования и электрических машин переменного тока..	170
5.2.4 Допустимые значения сопротивления изоляции для судовых сетей и электрооборудования.....	171
5.3 Контрольные вопросы.....	174
Часть 6. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	175
6.1 Цифровые вольтметры.....	175
6.1.1 Устройство цифровых измерительных приборов.....	175
6.1.2 Обобщённая структурная схема цифрового вольтметра.....	178
6.1.3 Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием.....	181
6.1.4 Цифровые вольтметры с двухтактным интегрированием	183
6.1.5 Цифровые вольтметры с поразрядным уравниванием	185
6.1.6 Цифровые вольтметры с частотно-импульсным преобразованием...	188
6.1.7 Универсальные цифровые вольтметры.....	189
6.1.8 Контрольные вопросы.....	190
6.2 Цифровые фазометры и частотомеры.....	191
6.2.1 Цифровые фазометры	191
6.2.2 Цифровые частотомеры.....	193
6.2.3 Контрольные вопросы.....	196
Часть 7. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	197
7.1 Устройство приборов для измерений неэлектрических величин	197
7.2 Измерительные преобразователи.....	197
7.2.1 Общие характеристики измерительных преобразователей.....	197
7.2.2 Реостатные измерительные преобразователи.....	198
7.2.3 Тензометрические измерительные преобразователи.....	200
7.2.4 Индукционные измерительные преобразователи.....	204
7.2.5 Электромагнитные измерительные преобразователи.....	205
7.2.6 Емкостные измерительные преобразователи.....	206
7.2.7 Тепловые измерительные преобразователи.....	208

7.2.8 Пьезоэлектрические измерительные преобразователи.....	209
7.3 Контрольные вопросы.....	210
Библиографический список.....	211
Приложение А. Перечень единиц физических величин и приставок, согласно ГОСТ 30012.1-2002(МЭК60051-1-97).Буквенные коды приборов.	217
Приложение Б. Классификация электронных измерительных приборов....	218
Приложение В. Обозначения электроизмерительных приборов, согласно ГОСТ 2.729-68.....	221
Приложение Г. Обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей, согласно ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97).....	225
Приложение Д. Табличные данные для оценки случайных погрешностей и статистической обработки результатов измерений.....	229

ПРЕДИСЛОВИЕ



Настоящее учебное пособие написано в соответствии с рабочими программами дисциплин “Основы метрологии и электрических измерений” и “Метрология и электрические измерения”.

В предлагаемом учебном пособии изложено основное содержание лекций по данным дисциплинам, читаемых автором в Севастопольском национальном техническом университете для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 6.050702 “Электромеханика” и 6.070104 “Морской и речной транспорт”.

В соответствии с целями и задачами дисциплин содержание пособия охватывает вопросы: метрологии и теории электрических измерений, а также методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин.

Задача правильного выбора метода и средства измерений, должной организации проведения измерительного эксперимента, обработки и представления результатов измерений в соответствии с принципами метрологии и действующими в этой области системой стандартов Государственной системы и другими нормативными документами является очень важной для будущего специалиста.

Для более качественного усвоения учебного материала в пособии приведены примеры выпускаемых приборов с их основными характеристиками, а также обозначения и маркировки электроизмерительных приборов, которые можно найти в приложениях учебного пособия. В тексте пособия приведены ссылки на: монографии, учебники и учебные пособия [1 — 29]; справочную литературу [30 — 41]; государственные стандарты [42 — 51] и электронные ресурсы [52 — 80].

В целом, по мнению автора, учебное пособие найдет желаемый интерес среди студентов, изучающих дисциплины “Основы метрологии и электрических измерений”, “Метрология и электрические измерения”, “Метрология, электрические измерения и стандартизация”, а также аспирантов и преподавателей.

Автор считает своим долгом выразить благодарность за трудоемкую работу научному редактору и рецензентам за ценные замечания и советы, которые способствовали улучшению содержания учебного пособия.

Автор

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АРУ — автоматическая регулировка усиления
АС — анализатор спектра
АГ — анализатор гармоник
АТ — аттенюатор
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
БВВИ — блок выделения временного интервала
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ВД — входной делитель напряжения
ВУ — входное устройство
ВС — временной селектор
Г — гетеродин
ГЛИН — генератор линейно - изменяющегося напряжения
ГР — генератор развертки
ГСИ — генератора счетных импульсов
Д — детектор
ДМ — демодулятор
ДН — делитель напряжения
ДУ — дифференциальный усилитель
ИВИ — измеритель временного интервала
ИП — измерительный прибор
ИМ — измерительный механизм
ИОН — источник опорного напряжения
ИП — измерительный прибор
ИПР — измерительный преобразователь
ИУ — измерительное устройство
К — калибратор
КЛ — ключ
ЛЗ — линии задержки
М — модулятор
НИ — нуль-индикатор
НСП — неисключенная систематическая погрешность
ООС — отрицательная обратная связь
П — преобразователь
ПАЗ — преобразователь амплитудных значений
ПАИ — преобразователь амплитуды импульсов в постоянное напряжение
ПТНП — полупроводниковый тензопреобразователь
ПФ — полосовой фильтр
РУ — регистрирующее устройство
С — сумматор
СКО — среднее квадратическое отклонение
СМ — смеситель

СЧ — счетчик импульсов
СУ — сравнивающее устройство
СХ — синхронизатор
СИ — средство измерения
ТГ — триггер
ТНП — тензопреобразователь
У — усилитель переменного тока
УВ0 — усилитель вертикального отклонения
УГ0 — усилитель горизонтального отклонения
УВ — устройство выходное
УПТ — усилитель постоянного тока
УПЧ — усилитель промежуточной частоты
УС — устройство синхронизации и запуска развертки
УОИ — устройств отображения информации
УУ — устройство управления
УРФ — усилитель с режекторной фильтрацией
УФ — усилитель-формирователь
ШУ — широкополосный усилитель
ТП — термопреобразователь
ТНП — тензопреобразователь
ФНЧ — фильтр нижних частот
Ф — фильтр
ЦВ — цифровой вольтметр
ЦИП — цифровой измерительный прибор
ЦОУ — цифровое отсчетное устройство
ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь
ЭЛТ — электронно-лучевая трубка

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

α	— угол поворота указателя ИМ
Δ_x	— абсолютная погрешность измерения величины x
$\Delta_{\text{макс}}$	— предельное значение абсолютной погрешности
$\Delta_{\text{хи}}$	— инструментальная погрешность прибора
δ	— относительная погрешность измерений
$\delta_{\text{макс}}$	— предельное значение относительной погрешности
$\delta_{\text{прв}}$	— приведённая погрешность СИ
$\delta_{\text{хсп}}$	— относительная погрешность измерений, учитывающая инструментальную и случайную погрешности
σ	— среднее квадратическое отклонение
$\sigma_{\bar{x}}$	— среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения
σ_{Θ}	— СКО неисклученной систематической погрешности
ε	— доверительный интервал
ω	— угловая частота
φ	— начальная фаза
$\overline{\omega}$	— число витков обмотки катушки ИМ
Θ	— неисклученная систематическая погрешность
η	— поправка
$\tau_{\text{и}}$	— длительность импульса
x_k	— больший (по модулю) из пределов измерений
$x_{\text{норм}}$	— нормирующее значение
$\bar{x}$	— среднее арифметическое значение из результатов измерения
$x_{\text{эт}}$	— показание эталонного СИ
$x_{\text{п}}$	— показание поверяемого СИ
$f(x)$	— плотность распределения вероятности
f	— частота
F	— электромагнитная сила
m	— математическое ожидание случайной величины
m_v	— реостатирующий множитель
n_A	— коэффициент шунтирования
N	— число оборотов диска ИМ
N_x	— количество счетных импульсов в цифровом устройстве
p_i	— вероятность появления дискретной случайной величины
q	— уровень значимости
B	— индукция в воздушном зазоре между сердечником и полюсными наконечниками ИМ
C_k	— спектр амплитуд
C_n	— постоянная счетчика электрической энергии
c	— постоянная величина, зависящая от параметров катушек ИМ
D	— дисперсия случайной величины

P — доверительная вероятность
 $P\{x_1 < x < x_2\}$ — вероятность попадания случайной величины x со стандартным нормальным распределением в интервал $[x_1, x_2]$
 P — активная мощность
 P_W — показание ваттметра
 $\Phi(t)$ — интеграл вероятности
 $S(x)$ — выборочное среднее квадратическое отклонение отсчетов
 $S(\bar{x})$ — выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения
 S_Σ — оценка суммарного СКО результата измерения
 S — полная мощность
 $S(j\omega)$ — комплексный спектр непериодической функции
 $|S(j\omega)|$ — спектр
 $S_{им}$ — чувствительность измерительного механизма (прибора)
 Q — реактивная мощность
 K — коэффициент, зависящий от соотношения случайной погрешности и НСП
 K_{U_n} — коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения
 K_{I_n} — коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока
 K_r — коэффициент гармоник
 $K_{ни}$ — коэффициент нелинейных искажений
 k_a — коэффициент амплитуды
 k_ϕ — коэффициент формы
 $M_{вр}$ — механический момент
 $M_{пр}$ — противодействующий момент
 $M_{уд.пр}$ — удельный противодействующий момент
 W — энергия
 $I_m, (U_m)$ — амплитудное значение тока (напряжения)
 $I, (U)$ — действующее значение тока (напряжения)
 $U_{свз}$ — средневывпрямленное значение напряжения
 $I_{ср}$ — среднее значение тока
 T — период
 R — активное сопротивление
 X — реактивное сопротивление
 $\underline{Z}$ — комплексное сопротивление
 z — полное сопротивление

Часть 1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1.1 Основные понятия и определения в метрологии

1.1.1 Сущность метрологии

Важную роль в повседневной познавательной деятельности человека играют измерения. Развитие человеческого общества неразрывно связано с развитием и совершенствованием методов и средств измерений.

Метрология (от греческого “μετρον” — мера, “логос” — учение) — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах получения требуемой точности.

Главная задача метрологии — это обеспечение единства измерений, которое может быть осуществлено при соблюдении двух условий:

- выражение результатов измерений в единых единицах;
- установление допустимых ошибок (погрешностей) результатов измерений.

1.1.2 Международная система единиц физических величин

В 1875 г. на дипломатической конференции семнадцать государств подписали Метрическую конвенцию. Позднее в г. Севре близ Парижа было создано Международное бюро мер и весов (МБМВ). В нем хранятся международные прототипы ряда мер и эталоны единиц некоторых физических величин.

В соответствии с конвенцией для руководства деятельностью МБМВ был учрежден Международный комитет мер и весов (МКМВ). Позднее, в 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц, обозначаемую SI (от начальных букв французского названия *Système International d'Unités*), на русском языке — СИ [1].

Совокупность основных и производных единиц называется **системой единиц физических величин**.

В последующие годы Генеральная конференция по мерам и весам приняла ряд дополнений и изменений, в результате чего в системе единиц стало: семь основных единиц, дополнительные и производные единицы физических величин.

В настоящее время Международная система SI считается совершенной и универсальной. Основные и дополнительные единицы системы SI представлены в таблице 1.1 [2, 30]. В этой таблице основные принятые единицы означают следующее:

— **единица длины — метр** — длина пути, которую проходит свет в вакууме за $1/299792458$ долю секунды;

— **единица массы — килограмм** — масса, равная массе международного прототипа килограмма;

— **единица времени — секунда** — продолжительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;

— **единица силы электрического тока — ампер** — сила не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины;

— **единица термодинамической температуры — кельвин** — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды;

— **единица количества вещества — моль** — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг;

— **единица силы света — кандела** — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (Ватт на стерадиан).

Таблица 1.1 — Основные и дополнительные единицы системы SI

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	Русское
Основные				
Длина	L	Метр	m	м
Масса	M	Килограмм	kg	кг
Время	T	Секунда	s	с
Сила электрического тока	I	Ампер	A	А
Температура	θ	Кельвин	K	К
Количество вещества	N	Моль	mol	моль
Сила света	J	Кандела	cd	кд
Дополнительные				
Плоский угол	1 (α)	Радан	rad	рад
Телесный угол	1 (ω)	Стерadian	sr	ср

Кроме основных единиц, в системе SI есть дополнительные единицы для измерения плоского и телесного углов (радиан и стерадиан соответственно), а также большое количество: производных единиц пространства и времени, механических, электрических, магнитных, тепловых, световых и акустических величин.

Основные термины и определения, касающиеся метрологии, приведены в [3, 31] и даны в межгосударственной Рекомендации РМГ 29-99 [42].

Для правильного обозначения физических величин и приставок к ним, в таблице А.1 приложения А, согласно ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97) [43], приведен перечень единиц физических величин и приставок.

1.1.3 Основные понятия в метрологии

К одним из основных понятий в метрологии относят: физическую величину, измерение, погрешность, истинное и действительное значение измеряемой величины, точность и достоверность измерений [4]. Ниже следующие определения терминов по метрологии соответствуют Рекомендациям РМГ 29-99 [42].

Физической величиной называют одно из свойств физического объекта (явления или процесса), которое является общим в качественном отношении для многих физических объектов, отличаясь при этом количественным значением. Физические величины принимают свои значения в широких диапазонах, поэтому чтобы избежать чисел с большим количеством нулей, применяют кратные и дольные единицы.

Измерением называют совокупность операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу величины и позволяющего сопоставить с ней измеряемую величину. Полученное значение величины и есть результат измерений.

Погрешностью называют отклонение результата измерений от действительного (истинного) значения измеряемой величины. Погрешности измерений приводятся в технической документации на средство измерения или в нормативных документах.

Достоверность измерений говорит о том, что погрешность не выходит за пределы отклонений, заданных в соответствии с поставленной целью измерений. Степень приближения погрешности измерений к нулю характеризуется **точностью измерений**.

1.1.4 Виды измерений

Измерения в основном различают по: способу получения информации; характеру изменений измеряемой величины в процессе измерений и количеству измерительной информации. В свою очередь, **по способу получения информации** измерения разделяют на: прямые, косвенные, совокупные и совместные [5]. Ниже следующие определения терминов по метрологии соответствуют Рекомендациям РМГ 29-99 [42].

Прямые измерения — это непосредственное сравнение физической величины с ее мерой.

В отличие от прямых измерений, при **косвенных измерениях** искомое значение величины устанавливают по результатам прямых измерений таких величин, которые связаны с искомой определенной зависимостью. Например, с помощью ваттметра можно прямым измерением измерить мощность в цепи постоянного тока. В случае если ваттметра нет, то значение мощности можно определить косвенным способом. Для этого вначале провести измерения с помощью амперметра и вольтметра, включенных в измерительную цепь, а затем перемножить результаты показаний этих приборов.

Совокупными называются проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых или косвенных измерениях различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения — это измерения двух или более неоднородных физических величин для установления зависимости между ними.

По характеру изменения измеряемой величины в процессе измерений существуют: статистические; динамические и статические измерения.

Статистические измерения связаны с определением характеристик случайных процессов, таких, к примеру, как: звуковых сигналов, уровня шумов и т.д. **Статические измерения** имеют место тогда, когда измеряемая величина практически постоянна.

В свою очередь, **динамические измерения** связаны с измерением таких величин, которые в процессе измерений претерпевают те или иные изменения.

По количеству измерительной информации различают однократные и многократные измерения.

Однократные измерения — это одно измерение одной величины, т.е. число измерений равно числу измеряемых величин. Практическое применение такого вида измерений всегда сопряжено с большими погрешностями, поэтому на практике следует проводить не менее трех однократных измерений и определить конечный результат как среднее арифметическое значение.

Многократные измерения характеризуются превышением числа измерений количества измеряемых величин. Преимущество многократных измерений заключается в значительном снижении влияний случайных факторов на погрешность измерения.

По отношению к основным единицам измерения делят на абсолютные и относительные.

Абсолютными измерениями называют такие измерения, при которых используются физическая константа и прямое измерение одной (или нескольких) основной величины.

Относительные измерения в основе имеют установление отношения измеряемой величины к однородной, применяемой в качестве единицы.

Важное место в практике измерений занимает такое понятие, как “шкала”. Различают следующие виды шкал.

Шкала измерений — это упорядоченная совокупность значений физической величины, которая служит основой для ее измерения.

Шкала наименований — конечный набор обозначений для никак не связанных между собой состояний (свойств) объекта.

Шкала порядка описывает свойства, для которых имеют смысл не только отношение эквивалентности, но и отношение порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Эта шкала характеризует значение измеряемой величины в баллах. В качестве примера, можно назвать шкалы баллов: землетрясений; ветра; твердости физических тел и т.д..

Шкала интервалов (разностей) — это шкала, которая отражает точные утверждения относительно различий между наблюдаемыми величинами, при

этом интервал измерения определен. К такому виду шкалы, к примеру, можно отнести шкалы измерения: времени, длины, температуры и т.д.

Шкала отношений — это количественная шкала для измерения значений переменной отношений. Шкала отношений отличается от шкалы интервалов тем, что на ней определено положение “естественного нуля”. Примерами шкал отношений являются шкалы массы и термодинамическая температурная шкала.

Объектами измерения являются физические величины, которые принято делить на основные и производные. Основным величинам соответствуют основные единицы измерений, а производным — производные единицы измерений.

1.1.5 Виды средств измерений

Вид средств измерений — совокупность средств измерений (СИ), предназначенных для измерений одного вида физической величины. Вид средств измерений может включать несколько разных типов средств измерений. Ниже следующие определения терминов по метрологии соответствуют Рекомендациям РМГ 29-99 [42].

К **средствам измерений** относят: меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и системы, измерительные принадлежности.

Мерой называют средство измерения, предназначенное для воспроизведения физических величин заданного размера. На практике используют: однозначные и многозначные меры, наборы и магазины мер. Если **однозначные меры** воспроизводят величины только одного размера, то **многозначные меры** воспроизводят несколько размеров физической величины, часто даже непрерывно заполняющих некоторый промежуток между определенными границами.

Под наборами и магазинами понимают объединение однозначных или многозначных мер для получения возможности воспроизведения некоторых промежуточных или суммарных значений величины.

Комплект однородных мер разного размера представляет собой **набор мер**.

В качестве примера можно назвать наборы: концевых мер длины; гирь; мер индуктивности и т. д. Сравнение с мерой можно выполнить с помощью измерительных мостов. Если сочетание мер объединено конструктивно в одно механическое целое, то речь идет о **магазине мер**. В магазине мер посредством ручных или автоматизированных переключателей, связанных с отсчетным устройством, можно соединять составляющие магазин меры в нужном сочетании.

К однозначным мерам относятся также стандартные образцы и образцовые вещества. **Стандартный образец** — это должным образом оформленная проба вещества (материала), которая подвергается метрологической аттестации с целью установления количественного значения.

В практике измерений следует учитывать номинальное и действительное значения мер, а также погрешность меры и ее разряд. **Номинальным называют значение меры**, указанное на ней. В то же время **действительное значение меры** должно быть указано в специальном свидетельстве как результат высокоточного измерения с использованием официального эталона. В зависимости

от погрешности аттестации меры подразделяются на разряды (меры 1-го, 2-го и т. д. разрядов). Погрешность мер является основой их деления на классы. **Образцовые меры** — это меры, которым присвоен тот или иной разряд. Эти меры применяются для поверки средств измерения.

К следующему виду средств измерений относятся измерительные преобразователи.

Измерительный преобразователь — это СИ, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки и хранения, а также передачи в измерительное устройство. Измерительные преобразователи могут входить в конструктивную схему измерительного прибора или применяться совместно с ним. Основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя считается соотношение между входной и выходной величинами, называемое **функцией преобразования**.

Преобразователи, которые непосредственно воспринимают измеряемую величину, называются **первичными**. На выходе **передающих преобразователей** измеряемая величина имеет форму, удобную для регистрации и передачи на расстояние.

Одним из распространенных СИ являются измерительные приборы.

Измерительные приборы — это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. Различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на отсчетном устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. К приборам прямого действия, к примеру, относят: вольтметры, амперметры, ваттметры и т.д.

Приборы сравнения предназначены для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны.

Наиболее сложными средствами измерений являются измерительные установки и системы.

Измерительные установки и системы — это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений. Измерительные установки применяют в тех случаях, когда необходимо измерить какую либо величину или одновременно нескольких величин. Для этого создают измерительные комплексы расположенных в одном месте и функционально объединенных друг с другом средств измерений, предназначенных для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Средства измерений территориально разобщенных и соединенных каналами связи, называют **измерительными системами**. Измерительная информация с таких систем может быть представлена в форме, удобной как для непосредственного восприятия, так и для автоматической обработки и передачи по каналам связи.

Измерительные принадлежности — это вспомогательные средства изме-

рений величин. Эти СИ необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности.

По метрологическому назначению СИ можно разделить на **рабочие средства измерений** и **эталоны**.

Рабочие средства измерений применяют для определения параметров (или характеристик): технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и т.д. По назначению **рабочие средства** могут быть: лабораторными, производственными и полевыми. Самыми точными являются лабораторные средства измерений. В отличие от лабораторных СИ, производственные СИ обладают устойчивостью к воздействиям различных вредных факторов производственного процесса. Если СИ работают в условиях, изменяющихся в широких пределах внешних воздействий, применяют полевые СИ.

Эталон — это СИ, служащее для хранения и передачи размера единицы физической величины другим средствам измерений. Эталоны могут быть: первичными; вторичными; исходными; рабочими и сравнения.

Первичный эталон — это эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений на современном уровне научно-технических достижений. Первичный эталон может быть национальным (государственным) и международным.

Вторичный эталон — эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

Исходный эталон — эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в лаборатории или на предприятии), от которого передают размер единицы подчинённым эталонам и имеющимся средствам измерений.

Рабочий эталон — эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

Эталон сравнения — эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

1.1.6 Контрольные вопросы

1. Какие задачи решает метрология в экономике государства?
2. В чем заключается единство измерений?
3. Что называется измерением?
4. Какие существуют виды средств измерений?
5. Чем отличаются эталоны от рабочих средств измерений?
6. В чем заключается главная задача метрологии?
7. Какие существуют виды средств измерений?
8. В каких целях применяют измерительные преобразователи?
9. Что называется погрешностью измерения?
10. В чем заключается отличие прямых измерений от косвенных?

1.2 Погрешности измерений и измерительных приборов

1.2.1 Классификация погрешностей

Отклонение результата измерения от истинного значения называют **погрешностью измерения**. Погрешности измерений можно классифицировать по различным признакам. Различают следующие погрешности [6]:

- погрешность воспроизведения единицы физической величины — это погрешность результата измерений, выполняемых при воспроизведении единицы физической величины;

- погрешность градуировки средства измерений — это погрешность действительного значения величины, приписанного той или иной отметке шкалы средства измерений в результате градуировки;

- погрешность из-за изменений условий измерения — это составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерения;

- погрешность меры — это разность между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины;

- погрешность метода измерений — это составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений;

- погрешность метода поверки — это погрешность применяемого метода передачи размера единицы при поверке;

- погрешность передачи размера единицы физической величины — это погрешность результата измерений, выполняемых при передаче размера единицы физической величины;

- погрешность результата измерений — это отклонение результата измерения от действительного значения измеряемой величины.

В зависимости от источника возникновения имеют место:

- **методическая погрешность**, обусловленная несовершенством метода измерения;

- **аппаратурная** (инструментальная) погрешность, обусловленная влиянием применяемых средств измерения;

- **внешняя погрешность**, обусловленная внешними по отношению к прибору воздействиями;

- **субъективная погрешность**, зависящая от особенностей экспериментатора.

В соответствии с условиями применения СИ существуют:

- **основная погрешность**, возникающая при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в ГОСТе или в технических условиях (ТУ) на средство измерения;

- **дополнительная погрешность**, появляющаяся при отклонении условий эксплуатации СИ от нормальных, соответствующих ТУ или ГОСТу.

По характеру происхождения все погрешности делятся на **случайные** и **систематические**.

Случайные погрешности — это погрешности, значения которых изменяются непредсказуемым образом при повторных измерениях одной и той же величины. Эти погрешности обусловлены большим числом случайных причин, действие которых на каждое измерение различно и не может быть заранее учтено. Математический аппарат обработки результатов измерений позволяет оценить значение случайных погрешностей и существенно уменьшить их влияние на результат измерения.

К случайным погрешностям относятся **промахи**. Этот вид погрешности, зависит главным образом от наблюдателя, который неправильно обращается со средствами измерений или делает неправильные отсчеты показаний приборов.

Если погрешности измерений существенно превышают ожидаемые значения, то их называют **грубыми погрешностями**.

Грубые погрешности и промахи не рассматривают и исключают из результата измерений.

Систематические погрешности — это погрешности, значения которых при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по определенному закону.

В зависимости от причин возникновения различают следующие **виды систематических погрешностей**:

- **инструментальные погрешности**, обусловленные погрешностями измерительных приборов;

- **погрешности метода измерения**;

- **субъективные погрешности**, связанные с особенностями наблюдателя;

- **погрешности, обусловленные неправильной установкой приборов.**

Систематическая погрешность всегда имеет знак отклонения, т.е. “+” или “–”. Способ борьбы с систематической погрешностью заключается в предварительном их изучении, устранении источника погрешности, а также во введении поправок.

Поправка — это значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения одной из систематических составляющих погрешности. Поправка равна абсолютной систематической погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\eta = -\Delta A,$$

где ΔA — абсолютная погрешность измерения.

Способ борьбы с систематической погрешностью состоит в статистической обработке результатов измерений.

При подготовке к точным измерениям необходимо убедиться в отсутствии постоянной систематической погрешности в данном ряду измерений. Для этого нужно повторить измерения, применив при этом уже другие СИ.

Одним из способов борьбы с грубой погрешностью заключается в применении “правила трех сигм” [8].

Погрешность является количественной характеристикой точности, которая тем выше, чем меньше погрешность.

Существуют два понятия погрешностей, которые нельзя смешивать:

- **погрешность измерения**;

— **погрешность измерительного прибора.**

Погрешностью измерения физической величины называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешность измерения является мерой точности измерения.

Инструментальные (приборные) погрешности — это погрешности, которые определяются погрешностями применяемых средств измерений и вызываются несовершенством принципа действия, неточностью градуировки шкалы прибора и т.д.

Разница этих понятий заключается в том, что имея высокоточный прибор при неправильно поставленном эксперименте или неграмотном использовании прибора можно получить некачественные результаты измерений.

Результат измерения — это значение величины, найденное путем ее измерения.

На практике **погрешность измерения** определяют по формуле [42]:

$$\Delta A = A_x - A,$$

где A_x — значение, полученное при измерении; A — истинное значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность — это погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины [42]. В связи с этим здесь следует различать понятия абсолютной погрешности и абсолютного значения погрешности.

На практике вместо **истинного значения** используют **действительное значение** величины, то есть значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что может быть использовано вместо него. Это значение вычисляется как среднее статистическое значение, полученное при обработке результатов серии измерений.

Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины, называют **относительной погрешностью** измерения и находят по выражению [42]:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta A}{A_x} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной, либо измеряется в процентах.

1.2.2 Нормирование погрешностей средств измерений

Погрешность СИ определяется как разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике пользуются ее действительным значением.

Государственными стандартами устанавливаются нормы на значения суммарных погрешностей и отдельных составляющих погрешности СИ.

Пределы допускаемой основной погрешности задаются в виде абсолютных, относительных и приведённых погрешностей СИ.

Под **абсолютной погрешностью СИ** понимается погрешность СИ, выра-

женная в единицах измеряемой физической величины [42].

При проведении поверки СИ абсолютную погрешность СИ можно определить по формуле [7]:

$$\Delta_x = x_{\text{п}} - x_{\text{эт}},$$

где $x_{\text{п}}$ — показание поверяемого СИ; $x_{\text{эт}}$ — показание эталонного СИ.

Относительная погрешность СИ — это погрешность СИ, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к результату измерений или к действительному значению измеренной физической величины [42]. Значение относительной погрешности СИ можно найти из выражения [7]:

$$\delta = \frac{\Delta_x}{x_{\text{эт}}} \cdot 100\%.$$

Результат измерения записывают в виде суммы найденного значения измеренной величины и абсолютной погрешности измерения [8]:

$$x = x_{\text{п}} \pm \Delta_x.$$

В составе абсолютной погрешности могут быть аддитивная и мультипликативная погрешности.

Аддитивная погрешность не зависит от чувствительности прибора и является постоянной для всего диапазона измерений. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором [9]. В свою очередь, **мультипликативная погрешность** зависит от чувствительности прибора и изменяется пропорционально текущему значению входной величины. Причиной появления этой погрешности может быть, например, физическое старение узлов измерительных приборов [9].

С учетом вышеназванных погрешностей, на рисунке 1.1 изображен график зависимости абсолютной погрешности от значения измеряемой величины x [1].

Уравнение прямой (прямая 3 на рисунке 1.1), описывающее абсолютную погрешность, можно представить в виде суммы погрешностей — аддитивной (прямая 1 на рисунке 1.1) и мультипликативной (прямая 2 на рисунке 1.1).

Значение абсолютной погрешности, ограничивается двумя прямыми, симметричными относительно оси абсцисс.

Прибор, у которого аддитивная погрешность a значительно преобладает над мультипликативной погрешностью b , предельное значение абсолютной погрешности определяется по формуле [1]:

$$\Delta_{\text{макс}} = \pm a,$$

а предельное значение относитель-

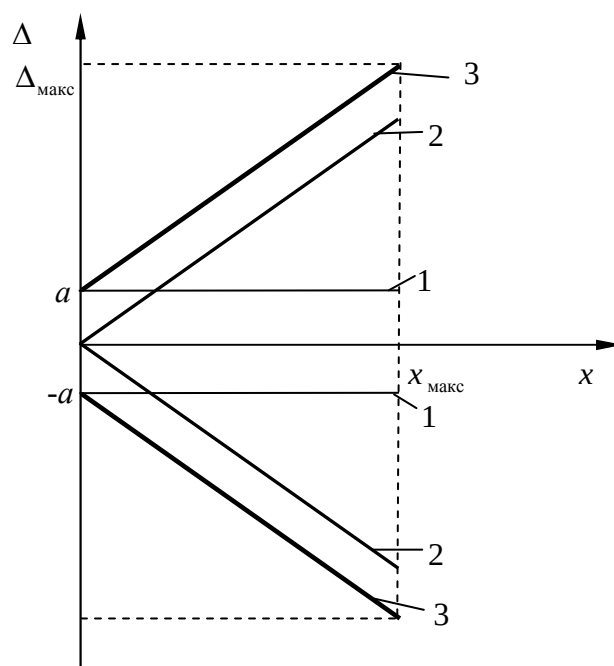


Рисунок 1.1 — График зависимости абсолютной погрешности от значения измеряемой величины

ной погрешности — по выражению [1]:

$$\delta_{\text{макс}} = \pm \frac{\Delta_{\text{макс}}}{x} \cdot 100\%,$$

где x — измеренное значение.

В свою очередь, если аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности соизмеримы, то **предельное значение абсолютной погрешности** определяется по формуле [1]:

$$\Delta_{\text{макс}} = \pm (a + bx),$$

а предельное значение относительной погрешности — по выражению [1]:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{макс}} &= \pm \frac{\Delta_{\text{макс}}}{x} 100\% = \pm \frac{a + bx}{x} 100\% = \pm \left(\frac{a}{x} + b + \frac{a}{x_k} - \frac{a}{x_k} \right) 100\% = \\ &= \pm \left[\left(b + \frac{a}{x_k} \right) 100\% + \frac{a}{x_k} \left(\frac{x_k}{x} - 1 \right) 100\% \right] = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \%, \end{aligned}$$

где $c = \left(b + \frac{a}{x_k} \right) 100\%$, $d = \frac{a}{x_k} 100\%$ — постоянные числа; x_k — больший (по модулю) из пределов измерений.

В последнем выражении слагаемое d отвечает за нормирование величины аддитивной погрешности a (погрешности в начале диапазона) по x_k , а слагаемое c — за нормирование погрешности $a + bx_k$ (погрешности в конце диапазона) по x_k . Для повышения точности измерений необходимо выбрать СИ таким образом, чтобы результат измерения находился как можно ближе к верхнему пределу диапазона измерений x_k .

Приведённая погрешность СИ, определяется как отношение абсолютной погрешности Δ_x к нормирующему значению $x_{\text{норм}}$ [1]:

$$\delta_{\text{прв}} = \frac{\Delta_x}{x_{\text{норм}}} \cdot 100, \%$$

Для приборов с нулевой отметкой на краю шкалы нормирующее значение $x_{\text{норм}}$ принимают равным большему из пределов измерений шкалы данного типа СИ, т.е. $x_{\text{норм}} = x_{\text{макс}}$, выраженное в тех же единицах, что и Δ_x .

Если нулевая отметка находится посередине шкалы, то нормирующее значение берут равным арифметической сумме конечных значений шкалы без учёта знака.

Приведем примеры определения нормирующего значения.

Пример 1. У вольтметра диапазон измерения составляет от 0 до 30 В. Для этого случая нормирующее значение примет значение 30 В.

Пример 2. У амперметра имеется двусторонняя шкала с нулем посередине и с граничными значениями -5 А и $+10\text{ А}$.

В этом случае нормирующее значение будет равным 15 А.

В соответствии со значением приведённой погрешности СИ присваиваются **классы точности**.

Класс точности — это обобщённая характеристика прибора, определяе-

мая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей. Класс точности у различных СИ может выражаться одним числом или дробью. Если приборы имеют основную погрешность более 4 %, то они характеризуются предельным значением основной погрешности и класс точности для них не устанавливается [10].

Общие положения деления средств измерений на классы точности, способы нормирования метрологических характеристик и обозначения классов точности приведены в стандарте ГОСТ 8.401-80 [45].

У приборов, аддитивная погрешность которых резко преобладает над мультипликативной, все значения погрешностей оказываются в пределах двух прямых (прямые 1 на рисунке 1.1).

В результате допускаемая абсолютная и приведённые погрешности прибора оказываются постоянными в любой точке его шкалы.

Для таких приборов **класс точности равен максимальному значению приведенной погрешности**, выраженной в процентах и округленной до ближайшего большего значения из ряда чисел [44, 45]:

$$(1, 1,5, 2, 2,5, 4, 5, 6) \cdot 10^n,$$

где $n = 1; 0; -1; -2; \dots$

В соответствии с ГОСТ 8711-93 (МЭК 51-2-84), классы точности на аналоговые амперметры и вольтметры, установлены следующие: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, 4,0 и 5,0 [44].

Основная приведённая погрешность у приборов, выраженная в %, не превышает значения, соответствующего класса точности.

Класс точности приборов, у которых аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности соизмеримы, обозначается в виде двух чисел разделённых косой чертой c/d [11].

К приборам этого типа относят цифровые измерительные приборы (ЦИП). Для ЦИП значения c и d нормируются и выбираются из определенного ряда по ГОСТ 8.401-80 [45].

Например, если в паспорте цифрового вольтметра приведен класс точности 0,01/0,005, то это означает, что предельное значение основной относительной погрешности прибора можно записать как [12]:

$$\delta_{\text{макс}} = \pm \left[0,01 + 0,005 \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \%$$

На измерительных приборах проставляются соответствующие обозначения, по которым можно судить о классе его точности и погрешностях СИ. К примеру, если на лицевой панели прибора внутри окружности указано число, т.е.

$\textcircled{0,5}$, то это означает, что $\delta_{\text{макс}} = \pm 0,5 \%$.

В тех случаях, когда погрешность прибора не указана на шкале и не приведена в паспорте прибора, ее считают равной величине, соответствующей половине наименьшего деления шкалы.

Согласно ГОСТ 8.401-80 в таблице 1.2 приведены примеры обозначения классов точности СИ с оценкой пределов допускаемой основной погрешности [45].

Таблица 1.2 — Примеры обозначения классов точности СИ с оценкой пределов допускаемой основной погрешности

Форма представления нормируемой основной погрешности	Примеры обозначения класса точности		Расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности
	В документации	На средствах измерений	
Нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности	Варианты: — класс В; — класс допуска В; — класс точности В	В	$\Delta_{\text{макс}} = \pm a \text{ или } \Delta_{\text{макс}} = \pm (a + bx);$ $\delta_{\text{макс}} = \pm \frac{a}{x} \cdot 100\%$ или $\delta_{\text{макс}} = \pm \left(\frac{a}{x} + b \right) \cdot 100\%$ Примечание: значения a и b приводятся в документации на средство измерений.
Нормируется предел допускаемой приведенной основной погрешности	Варианты: — класс точности 1,5 — не обозначается	1,5	$\delta_{\text{прв}} = 1,5 \%; \Delta_{\text{макс}} = \pm \frac{\delta_{\text{прв}} \cdot x_{\text{макс}}}{100};$ $\delta_{\text{макс}} = \pm \delta_{\text{прв}} \cdot \frac{x_{\text{макс}}}{x},$ где $x_{\text{норм}} = x_{\text{макс}}$ — предел измерений Примечание: для приборов с равномерной шкалой и нулевой отметкой в начале шкалы.
	Варианты: — класс точности 2,5; — не обозначается	2,5	$\delta_{\text{прв}} = 2,5\%;$ $\Delta_{\text{макс}} = \pm \frac{\delta_{\text{прв}} \cdot L}{100},$ где $\Delta_{\text{макс}}$ — предел допускаемой абсолютной погрешности в мм; L — длина всей шкалы (нормирующее значение) Примечание: для приборов с неравномерной шкалой; длина шкалы указывается в документации.
Нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности	Класс точности 1,5	1,5	$\delta_{\text{макс}} = \pm b \cdot 100\% = \pm 1,5\%;$ $\Delta_{\text{макс}} = \pm \frac{\delta_{\text{макс}} \cdot x}{100}$ Примечание: для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.
	Варианты: — класс точности 0,05/0,01; — не обозначается	0,05/0,01	$\delta_{\text{макс}} = \pm \left[0,05 + 0,01 \left(\left \frac{x_{\text{к}}}{x} \right - 1 \right) \right] \%;$ $\Delta_{\text{макс}} = \pm \frac{\delta_{\text{макс}} \cdot x}{100}$ Примечание: Для средств измерений с соизмеримыми аддитивной и мультипликативной погрешностью.

В зависимости от характера изменений измеряемой физической величины СИ могут обладать статической или динамической погрешностью.

Статическая погрешность средства измерений — это погрешность средства измерений, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

Динамическая погрешность средства измерений — это погрешность средства измерений, возникающая дополнительно при измерении переменной физической величины и обусловленная несоответствием его реакции на скорость изменения входного сигнала.

1.2.3 Критерии качества измерений

Качество измерений, кроме размера допустимых погрешностей, характеризуется параметрами: точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью, воспроизводимостью [10].

Точность — это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям, как систематическим, так и случайным.

Достоверность измерений характеризует степень доверия к результатам измерений.

Правильность измерений — это качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в результатах измерений.

Сходимость — это качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях.

Воспроизводимость — это качество измерений, которое отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях.

1.2.4 Правила округления и записи результата измерений

Нормирование пределов допускаемых погрешностей средств измерений производится указанием значения погрешностей с одной или двумя значащими цифрами.

По этой причине при расчете значений погрешностей измерений также должны быть оставлены только первые одна или две значащие цифры.

Для округления используются следующие правила.

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них не более 2, и одной цифрой, если первая из них 3 и более.

2. Показание прибора округляется до того же десятичного разряда, которым заканчивается округленное значение абсолютной погрешности.

3. Округление производится в окончательном ответе, промежуточные вычисления выполняют с одной — двумя избыточными цифрами.

Для наглядности рассмотрим примеры.

Пример 1:

— показание вольтметра — 7,562 В;

— вычисленное значение абсолютной погрешности — $\pm 0,163$ В;

- округленное значение абсолютной погрешности — $\pm 0,16$ В;
- результат измерения — $(7,56 \pm 0,16)$ В.

Пример 2:

- показание миллиамперметра — 15,38 мА;
- вычисленное значение абсолютной погрешности — $\pm 0,412$ мА;
- округленное значение абсолютной погрешности — $\pm 0,4$ мА;
- результат измерений — $(15,4 \pm 0,4)$ мА.

Пример 3:

- вычисленное значение относительной погрешности — $\pm 2,378$ %;
- округленное значение относительной погрешности — $\pm 2,4$ %.

1.2.5 Метрологические характеристики средств измерений

Все СИ можно характеризовать некоторыми общими свойствами — метрологическими характеристиками (МХ).

Метрологическая характеристика средства измерений — характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность.

Различают нормируемые МХ, устанавливаемые нормативными документами на средства измерений, и действительные характеристики, определяемые экспериментально.

Метрологические характеристики различаются по значимости и информативности и зависят от типа СИ.

К основным МХ относят следующие.

1. **Длина деления шкалы** — это расстояние между осями или центрами двух соседних отметок шкалы, измеренное вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы.

2. **Цена деления шкалы** — это разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

3. **Градуировочная характеристика** — это зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений. Градуировочную характеристику снимают для уточнения результатов измерения.

4. **Диапазон показаний** — это область значения индикатора (шкалы) прибора, ограниченная начальным и конечным значениями индикатора (шкалы).

5. **Диапазон измерений** — это область значений измеряемой величины с нормированными допускаемыми погрешностями средства измерения.

6. **Чувствительность СИ** — это свойство СИ, выражаемое отношением линейного или углового перемещения указателя по шкале прибора (сигнала на выходе прибора) к вызвавшему его изменению измеряемой величины. У СИ с постоянной чувствительностью шкала является равномерной. Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления прибора.

7. **Вариация (нестабильность) показаний прибора** — это алгебраическая разность между наибольшим и наименьшим результатами измерений при многократном измерении одной и той же величины в неизменных условиях.

8. **Стабильность СИ** — это свойство, выражающее неизменность во времени его метрологических характеристик (показаний).

9. **Порог чувствительности СИ** — это характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

10. **Зона нечувствительности СИ** — это диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают выходного сигнала средства измерений.

11. **Дрейф показаний СИ** — это изменение показаний СИ во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов.

12. **Динамические характеристики СИ** — это характеристики, которые описывают инерционные свойства средств измерений и определяют зависимость выходного сигнала средств измерений от меняющихся во времени величин: входного сигнала; нагрузки и влияющих величин.

13. **Характеристики погрешностей СИ.** Для цифровых приборов используются еще такие виды характеристик, как [11]:

— вид выходного кода и число разрядов кода для СИ с дискретным (цифровым, числовым) устройством выдачи измерительной информации;

— цена единицы наименьшего разряда кода или номинальная ступень квантования.

1.2.6 Поверка средств измерений

При проведении измерений особенно важным является соответствие СИ установленным техническим требованиям. Поверке подлежат средства измерительной техники, которые находятся в эксплуатации, выпускаются из производства или ремонта, продаются и выдаются напрокат [32].

Поверка — это совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям. Кроме того, при поверке производят операции, необходимые для определения наличия/отсутствия неисправных узлов измерительного прибора [46].

Неправильно поверку средств измерений называть “проверкой”, так как слово “**проверка**” имеет иной смысл. Поверке могут подвергаться только СИ с точки зрения точности.

В свою очередь, если необходимо определить свойства СИ или его отдельные характеристики, то такую операцию называют “проверкой”. Поверка проводится согласно ДСТУ 2708 “Метрология. Поверка средств измерительной техники [46]. Организация и порядок проведения” и является обязательной для средств измерительной техники, на которые распространяется государственный метрологический надзор.

В соответствии со ст. 28 Закона Украины “О метрологии и метрологической деятельности” перечни средств измерительной техники, находящихся в эксплуатации и подлежащих поверке, составляются их пользователями (за исключением физических лиц, не являющихся субъектами предпринимательской

деятельности) и подаются на согласование в соответствующий территориальный орган Госпотребстандарта Украины.

Калибровка меры или набора мер — это совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего метрологическому контролю и надзору. Калибровка проводится согласно ДСТУ 3989 “Метрология. Калибровка средств измерительной техники. Организация и порядок проведения” [47].

Калибровкой можно называть лишь такую поверку, при которой сравниваются несколько мер или деления шкалы между собой в различных сочетаниях. Калибровке подлежат средства измерительной техники, на которые не распространяется государственный метрологический надзор.

Необходимость проведения калибровки при эксплуатации средств измерительной техники определяется их пользователем и может осуществляться метрологической службой предприятия, организации.

Градуировка средств измерений — нанесение отметок на шкалу или определение значений измеряемой величины, соответствующих уже нанесенным условным отметкам [47].

При отсутствии шкалы под градуировкой понимают определение зависимости между измеряемой и другой величиной, легко определяемой по показаниям измерительного прибора.

1.2.7 Маркировка, буквенные коды и классификация электроизмерительных приборов

Тип электромеханических измерительных приборов указывается на циферблате. Он состоит из прописной буквы и нескольких цифр, отражающих шифр завода-изготовителя и номер конструктивной разработки.

Буква, с которой начинается обозначение, указывает способ создания вращающего момента электромеханического измерительного прибора (ИП), определяющий его название: М — магнитоэлектрический; Э — электромагнитный; Д — электро- и ферродинамический; И — индукционный; С — электростатический; В — выпрямительный; Т — термоэлектрический; Н — самопишущий; Р — меры и измерительные преобразователи [11].

В таблице А.2 приложения А приведены буквенные коды электроизмерительных приборов согласно ГОСТ 2.710 – 81 [48].

Электронные измерительные приборы имеют свою классификацию. В зависимости от вида измеряемых величин и характера измерений электронные ИП делятся на подгруппы. Каждая подгруппа состоит из нескольких видов.

Классификация электронных измерительных приборов приведена в таблице Б.1 приложения Б.

Обозначения электроизмерительных приборов по ГОСТ 2.729-68 приведены в таблице В.1 приложения В [49].

Наиболее употребляемые обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей, согласно ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97), приведены в таблице Г.1 приложения Г [43].

1.2.8 Контрольные вопросы

1. Чем вызываются погрешности измерений?
2. В чем заключается поверка средств измерений?
3. Что называется погрешностью измерения?
4. Какие существуют критерии качества измерений?
5. Как нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности прибора?
6. Что называется приведенной погрешностью прибора?
7. Чем отличается основная погрешность измерения от дополнительной погрешности?
8. В каких случаях целесообразно использовать статистическую обработку результатов измерений?
9. Какие существуют способы по минимизации систематической и случайной погрешностей?
10. Как определяется класс точности измерительного прибора?

1.3 Оценка случайных погрешностей

1.3.1 Случайные погрешности

В ходе проведения в одинаковых условиях повторных измерений (выборочных исследований) одной и той же измеряемой величины можно получить результаты, отличающиеся друг от друга. Этот факт свидетельствует о наличии в результатах измерений случайных погрешностей. Многократные измерения, осуществляемые одним методом и с одинаковой тщательностью, называются **равноточными**. Проведя опыт бесконечно большое число раз, мы получим полный набор всех значений, которые может принимать случайная величина, т.е. **генеральную совокупность**. Другими словами генеральная совокупность является предельным случаем выборки с бесконечно большим объемом.

Случайные погрешности — это погрешности, которые изменяются случайным образом при повторных измерениях одного и того же значения физической величины. Как правило, для уменьшения влияния случайных погрешностей на результат измерений, необходимо провести усреднение многократных измерений величины в одинаковых условиях [42].

При проведении выборочных исследований предполагается, что выборка является однородной. Это означает, что она получена из одной генеральной совокупности, т.е. в исходной совокупности отсутствуют объекты, резко выделяющиеся по значениям изучаемого признака. Измеряемая величина, содержащая случайную погрешность, должна рассматриваться как случайная величина. Наиболее общей характеристикой случайной величины x является плотность распределения ее вероятности, которая определяется следующим образом [4]:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx},$$

где $dF(x)$ — вероятность значений случайной величины x в интервале dx .

Кроме этого используется функция распределения вероятностей случайной величины [4]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x_1} f(x)dx,$$

которая выражает собой вероятность того, что случайная величина находится в интервале от $-\infty$ до некоторого значения, меньшего x_1 .

Функция распределения любой случайной величины является неубывающей функцией, определенной так, что $F(-\infty)=0$, а $F(+\infty)=1$. Если известен дифференциальный закон распределения случайной величины $f(x)$, то вероятность P ее попадания в интервал между x_1 и x_2 , равна [4]:

$$P(x_1 < x < x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx.$$

Вероятность того, что результат измерения лежит в конечном промежутке $[x_1, x_2]$, равна площади под кривой плотности распределения вероятности $f(x)$ между абсциссами x_1 и x_2 .

Кривая плотности распределения вероятностей всегда неотрицательна и

подчинена условию нормирования в виде:

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

К числовым характеристикам закона распределения относятся начальные и центральные моменты случайных величин:

В практике обработки результатов измерений наибольший интерес представляет начальный момент 1-го порядка, называемый **математическим ожиданием случайной величины**.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины x определяется по выражению [9]:

$$m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx,$$

а дискретной случайной величины — по формуле [9]:

$$m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i,$$

где p_i — вероятность появления дискретной случайной величины. Математическое ожидание определяет положение центра распределения случайной величины. Математическое ожидание случайной величины x является постоянной величиной и характеризует ее среднее значение. В случае если математическое ожидание случайной величины равно нулю, случайную величину и соответствующее распределение называются **центрированными**.

Среди центральных моментов важную роль играет момент 2-го порядка, называемый **дисперсией случайной величины**. Дисперсия непрерывной случайной величины x определяется по выражению [9]:

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx,$$

а дискретной случайной величины — по формуле [9]:

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i.$$

Дисперсия характеризует разброс результатов измерений относительно наиболее вероятного значения и имеет размерность квадрата случайной величины, что не всегда является удобным.

Чаще при определении погрешностей, наряду с дисперсией, используют **среднее квадратическое отклонение (СКО)**, определяемое по выражению [9]:

$$y = \sqrt{D_x}.$$

При измерении одной и той же величины разными приборами всегда будет разброс результатов относительно истинного значения измеряемой величины из-за наличия случайной погрешности. Если метод измерения или прибор является более точным, то разброс результатов будет меньше. Таким образом, среднее квадратическое отклонение σ характеризует прибор или метод измерения, а математическое ожидание при бесконечном числе опытов — истинное значение измеряемой величины.

В практике электрических измерений чаще всего имеют дело с нормальным и равномерным распределениями.

На рисунке 1.2 изображены графики зависимости плотности распределения вероятности случайной величины x при распределении: а — равномерном; б — нормальном. Если случайная величина x принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала от x_1 до x_2 с постоянной плотностью вероятностей, то такое распределение называется равномерным и описывается соотношениями [4]:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ \frac{1}{x_2 - x_1} & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases},$$

Математическое ожидание случайной величины x в случае равномерного распределения определяется по выражению [4]:

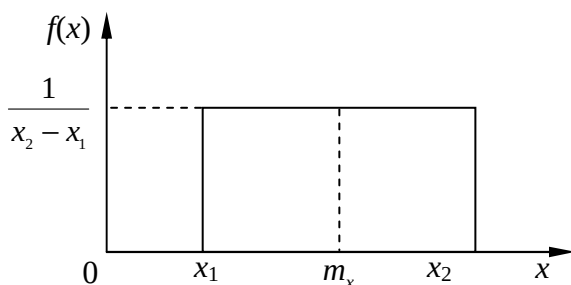
$$m_x = \frac{x_1 + x_2}{2},$$

а дисперсия — по формуле [4]:

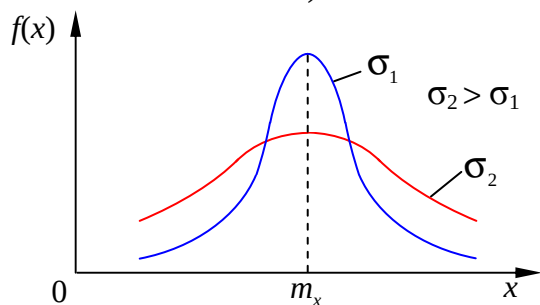
$$D_x = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12},$$

откуда значение СКО примет значение $\sigma = \frac{x_2 - x_1}{2\sqrt{3}}$.

Примером случайной погрешности с равномерным распределением являются погрешности отсчета



а)



б)

Рисунок 1.2 — Графики зависимости плотности распределения вероятности случайной величины x при распределении:

а — равномерном; б — нормальном

по шкале прибора и квантования измеряемой величины по уровню в цифровых измерительных приборах.

Нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим.

Практически, суммарное воздействие даже сравнительно небольшого числа возмущений приводит к закону распределения результатов и погрешностей измерений, близкому к нормальному.

Плотность нормального распределения непрерывной случайной величины x описывается выражением [7]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где m_x — математическое ожидание случайной величины x ; σ — генеральное среднее квадратическое отклонение; σ^2 — генеральная дисперсия, характеризующая разброс результатов измерений относительно наиболее вероятного значения x . Из графика на рисунке 1.2,б видно, что чем меньше значение среднеквадратического отклонения σ , тем точнее выполнены измерения.

Для группы из n измерений, распределенных по нормальному закону, математическое ожидание случайной величины определяется по выражению [7]:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

а СКО — по формуле [7]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}.$$

1.3.2 Оценки случайных погрешностей

В практике измерений число измерений n всегда конечно, поэтому используют статистические числовые характеристики, которые называют **оценками** характеристик. Под “оценкой” понимают как процесс получения значений параметров генеральной совокупности, так и сами значения параметров генеральной совокупности, полученные при выборке [11].

Разделяют точечные и интервальные оценки.

Точечные оценки — это конкретные значения параметров генеральной совокупности, полученные по выборочным данным. Эти значения максимально близки к значениям соответствующих параметров генеральной совокупности, которые являются истинными значениями оцениваемых параметров [42].

В отличие от точечных оценок, **интервальные оценки** определяют границы интервалов, между которыми с некоторой вероятностью, называемой еще доверительной вероятностью, находится истинное значение оцениваемого параметра [42].

Определимся вначале с точечными оценками значений измеряемых параметров. При практическом применении нормального закона необходимо принять какое-то значение измеряемой величины x за истинное значение. В качестве такого значения, при достаточно **большом числе n измерений** одинаковой точности, принимается **среднее арифметическое значение $\bar{x}$** из результатов, полученных при всех i -х измерениях [8]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.1)$$

где x_i — i -й результат измеряемой величины из ряда (выборки) $x_1, x_2, \dots, x_n$.

В случае большого числа измерений СКО, характеризующее разброс случайных величин, определяется следующим образом [8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

а среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения, как [8]:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Последнее выражение показывает, как точность результата серии измерений зависит от числа измерений в серии и указывает пути повышения точности. Если, например, требуется уменьшить ошибку результата эксперимента в 5 раз, а эта ошибка определяется величиной $\sigma_{\bar{x}}$, то необходимо изменить так методику измерений, чтобы разброс отдельных измерений уменьшился в 5 раз, либо при сохранении прежней методики следует увеличить в 25 раз число измерений. На практике для определения $\sigma_{\bar{x}}$ нужно проделать бесконечно много измерений, что является нереальным.

Рассмотрим **интервальные оценки**. Для экспериментальных исследований важно определить вероятность того, что измеренные значения лежат в некотором интервале от истинного значения измеряемой величины.

Интервал, в котором с заданной доверительной вероятностью находится оцениваемый генеральный параметр, называется **доверительным интервалом**.

Доверительный интервал при заданной доверительной вероятности зависит от размера выборки, т.е. от количества измерений. Обработка результатов многократных измерений позволяет определить интервал значений, а также вероятность, с которой действительное значение измеряемой величины оказывается в этом интервале.

В теории обработки результатов измерений говорят о $(1-\alpha) \cdot 100\%$ -процентном доверительном интервале, где $P=(1-\alpha)$ — доверительная вероятность, а α — некоторое малое число ($\alpha=0,05, 0,01, 0,001$ и т.д.), задающее вероятность того, что оцениваемый параметр выходит за границы доверительного интервала.

Обычно в качестве доверительных вероятностей выбирают значения 0,95, 0,99 или 0,999 (их принято выражать в процентах). Перечисленным значениям соответствуют 95 %, 99 %, 99,9 %. Выбор той или иной доверительной вероятности осуществляется исходя из практических соображений.

Для нормального закона распределения непрерывной случайной величины доверительная вероятность $P(t)$ определяется с помощью интеграла вероятности $\Phi(t)$ [4]:

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

где $t = \varepsilon / \sigma$ — кратность случайной погрешности, ε — доверительный интервал.

С помощью интеграла вероятностей $\Phi(t)$ можно вычислить вероятность

попадания случайной величины x со стандартным нормальным распределением в интервал $[x_1, x_2]$ [4]:

$$P\{x_1 < x < x_2\} = \frac{1}{y\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2}} dx = \frac{1}{2} [\Phi(x_2) - \Phi(x_1)].$$

Кривая плотности распределения вероятности $f(x)$ симметрична относительно прямой, проходящей через точку с координатой $x = m_x$, как видно на рисунке 1.2.

При многократных измерениях случайной величины x математическое ожидание случайной величины определяется через среднее арифметическое значение $\bar{x}$ из результатов, полученных при всех i -х измерениях, т.е. $m_x = \bar{x}$.

Если значения случайной величины распределены по нормальному закону, то вероятность попадания ее в симметричный интервал значений $\bar{x} \pm \varepsilon$ будет определяться по выражению [8]:

$$P\{\bar{x} - \varepsilon < x < \bar{x} + \varepsilon\} = \int_{\bar{x}-\varepsilon}^{\bar{x}+\varepsilon} f(x) dx.$$

Измеряя, доверительный интервал ε в единицах σ , т.е. $\varepsilon = t\sigma$, последнее выражение можно записать в виде [8]:

$$P\{\bar{x} - t\sigma < x < \bar{x} + t\sigma\} = \Phi(t).$$

Значения интеграла вероятности $\Phi(t)$ приведены в таблице Д.1 приложения Д, при пользовании которой следует учесть, что значения $\Phi(t)$ даны в ней только для положительных значений t . Для отрицательных значений t вычисления проводятся с помощью свойства нечетности этой функции:

$$\Phi(-t) = -\Phi(t).$$

Значения интегральной функции нормального распределения приведены в таблице Д.2 приложения Д.

Пользуясь значениями интеграла вероятности, можно найти вероятность попадания случайной величины x в определенный наперед заданный интервал или определить величину интервала, в который попадает результат измерения с заданной вероятностью. Например:

$$P\{\bar{x} - \sigma < x < \bar{x} + \sigma\} = 0,683 \text{ (для } t=1\text{);}$$

$$P\{\bar{x} - 2\sigma < x < \bar{x} + 2\sigma\} = 0,954 \text{ (для } t=2\text{);}$$

$$P\{\bar{x} - 3\sigma < x < \bar{x} + 3\sigma\} = 0,997 \text{ (для } t=3\text{).}$$

Доверия заслуживают только результаты измерений, лежащие внутри доверительного интервала.

Абсолютная погрешность значений измеряемой физической величины ограничена длиной доверительного интервала, являющегося характеристикой погрешности многократных измерений.

Таким образом, если в качестве случайной величины выступает случайная погрешность, то согласно теории статистики доверительному интервалу $\pm\sigma$ соответствует в процентном выражении доверительная вероятность 68,3 %. Это означает, что 68,3 % результатов входят в интервал от $-y$ до $+y$ от истинного значения, а 31,7 % находятся вне этого интервала.

В случае если доверительная вероятность составляет 95,5 %, это означает, что 95,5 % значений, полученных в ходе измерений, находятся в интервале $\pm 2\sigma$ от истинного значения. Значение доверительной вероятности 99,7 % соответствует тому факту, что 99,7 % экспериментальных значений находятся в интервале $\pm 3\sigma$.

В практике измерений погрешность $\pm 3\sigma$ принимают за максимальную погрешность. Погрешности больше значения 3σ , считаются **промахами** и при обработке результатов измерений не учитываются.

Таким образом, если выполняется условие, по которому [6]:

$$\Delta_{i \max} \leq 3\sigma,$$

где $\Delta_{i \max}$ — максимальное значение абсолютной погрешности, то считается, что в результатах измерений промахов нет. Последнее условие называют “правилом трех сигм”.

При обработке результатов измерения, как правило, значение σ неизвестно и представляет трудность его определить. В этом случае вначале определяют **выборочное среднее квадратическое отклонение отсчетов** $S(x)$ по выражению [4]:

$$S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1.2)$$

а затем — **выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения** для серии из n измерений по формуле [4]:

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}}. \quad (1.3)$$

Таким образом, выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения из n отсчетов в $\sqrt{n}$ раз меньше выборочного среднеквадратического отклонения одного отсчета.

При оценке промахов в результате проведенных измерений “правило трех сигм” преобразуется в “правило трех $S(\bar{x})$ ”.

Для обработки результатов измерений в математической статистике разработан метод определения доверительного интервала и соответствующей доверительной вероятности при любом числе измерений.

Это метод основан на распределении Стьюдента, которое при малом числе измерений отлично от распределения Гаусса, а при большом числе измерений ($n \rightarrow \infty$) в него переходит.

Суть метода в следующем. По результатам измерений определяют значения среднее арифметическое значение $\bar{x}$ из результатов, полученных при всех i -х измерениях и оценку $S(\bar{x})$.

При известном количестве измерений n и заданной доверительной вероятности P по таблице Д.3 приложения Д определяют коэффициент распределения Стьюдента $t_{P,n}$, а затем доверительный интервал, в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью [4]:

$$\varepsilon = t_{P,n} S(\bar{x}). \quad (1.4)$$

1.3.3 Обработка результатов прямых измерений

1.3.3.1 Обработка результатов прямых однократных измерений

Одним из видов технических измерений являются прямые однократные измерения. Этот вид измерений проводится в том случае, когда ожидается пренебрежимо малая (по сравнению с инструментальной) случайная погрешность. Порядок обработки результатов прямых однократных измерений следующий.

При однократных измерениях за измеренное значение величины следует принять результат одного измерения [1]:

$$\bar{x} = x_1.$$

Затем по инструментальной погрешности средства измерения $\Delta_{\text{ин}}$ следует определить абсолютную погрешность измерения [1]:

$$\Delta_x = \Delta_{\text{ин}}.$$

В соответствии со стандартами определяется предельное значение инструментальной погрешности средства измерения, т.е. инструментальная погрешность задается с доверительной вероятностью равной единице при нормальных условиях эксплуатации. Эту погрешность можно определить, зная класс точности прибора, величина которого указывается в паспорте к прибору и (или) на шкале прибора.

Далее следует вычислить относительную погрешность измерения по выражению [1]:

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

Затем, используя правила представления результатов измерения, следует определить количество значащих цифр в абсолютной и относительной погрешностях, и в значении измеряемой величины.

Конечный результат измерений для доверительной вероятности равной единице необходимо представить в следующем виде:

$x = (\text{измеренное значение} \pm \text{абсолютная погрешность}) \text{ единица измерения};$

$\delta_x = \text{относительная погрешность \%}; P=1.$

1.3.3.2 Обработка результатов прямых многократных измерений

Если в процессе многократных измерений выясняется, что основной вклад в случайную погрешность вносит приборная (инструментальная) погрешность, то в эксперименте можно ограничиться однократными измерениями. Оценка истинного значения измеряемой величины при этом будет определяться однократным показанием прибора. Если же основной вклад определяется не погрешностью прибора, то с целью уменьшения влияния случайных погрешностей на результат измерения необходимо проводить многократные измерения. В последнем случае в качестве оценки истинного значения будет выступать величина среднего значения серии измерений $\bar{x}$, а в качестве оценки погрешности берется выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения $S(\bar{x})$.

При статистической обработке результатов многократных измерений не-

обходимо выполнить следующие операции [50].

1. Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений (введением поправки).

2. По паспорту измерительного прибора необходимо определить инструментальную погрешность прибора $\Delta_{\text{хи}}$. Величина этой погрешности определяется классом точности или указывается в паспорте прибора как предельная погрешность, т.е. для доверительной вероятности $0,997 \approx 1$.

3. Вычислить по выражению (1.1) среднее арифметическое значение $\bar{x}$ из результатов, полученных при всех i -х измерениях.

4. По формулам (1.2) и (1.3) определить оценку СКО $S(\bar{x})$.

5. Далее, в соответствии с ГОСТ 8.207-76, следует проверить гипотезу о нормальности распределения результатов измерений. При числе измерений $n < 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы случайной погрешности результата определяют лишь в том случае, если достоверно известно, что результаты измерений принадлежат нормальному закону.

В таблице Д.4 приложения Д указаны предельные значения коэффициента t_r для различных значений теоретической вероятности появления ошибки, которую обычно называют уровнем значимости $q = 1 - P$, при определенном объеме выборки.

Если количество измерений $n > 50$, то проверка гипотезы о нормальности распределения может осуществляться по критерию Пирсона или Мизеса-Смирнова.

В случае если количество измерений $15 < n < 50$, то проверка гипотезы о нормальности распределения может осуществляться по составному критерию.

Проверка согласия экспериментального распределения нормальному распределению осуществляется с помощью составного критерия, который заключается в следующем.

Вначале следует проверить первый критерий. Для этого по данным измерений вычисляем значение d по формуле [50]:

$$d = \Delta_{\text{ср}} / \sigma,$$

где $\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$.

Далее необходимо выбрать уровень значимости q_1 в пределах от 0,02 до 0,1, а затем произвести сравнение вычисляемой по опытным данным величины d с теоретическими точками распределения $d_1\left(1 - \frac{q_1}{2}\right)$ и $d_2\left(\frac{q_1}{2}\right)$, соответствующие заданному уровню значимости q_1 критерия 1.

Значения $d_1\left(1 - \frac{q_1}{2}\right)$ и $d_2\left(\frac{q_1}{2}\right)$ для заданного уровня значимости q_1 критерия 1 следует найти по таблице Д.5 приложения Д.

Гипотеза о принадлежности данного ряда результатов наблюдений к нормальному закону распределений верна, если вычисленная величина d лежит в пределах [50]:

$$d_{1\left(1-\frac{q_1}{2}\right)} < d \leq d_{2\left(\frac{q_1}{2}\right)}.$$

Далее следует проверить второй критерий. Оценка по второму критерию заключается в определении числа отклонений m_{γ} экспериментальных значений $t_{\gamma i}$ от теоретического значения t_T для заданного уровня значимости q_2 .

Для этого при заданных значениях q_2 и n по данным из таблицы Д.6 приложения Д находится параметр α . Затем находится квантиль интегральной функции нормированного нормального распределения t_T , который определяется из таблицы Д.2 приложения Д для значения $F(t_T) = (1 + \alpha)/2$. Далее вычисляются экспериментальные значения параметра $t_{\gamma i}$ по формуле [50]:

$$t_{\gamma i} = |x_i - \bar{x}| / S(x).$$

Вычисленное значение $t_{\gamma i}$ сравнивается с теоретическим значением параметра t_T и подсчитывается число отклонений m_{γ} , для которых удовлетворяется неравенство $t_{\gamma i} > t_T$.

Значение m_{γ} сравнивается с теоретическим числом отклонений m_T , которое находится из таблицы Д.6 приложения Д. Если $m_{\gamma} < m_T$, то распределение данного ряда наблюдений не противоречит нормальному.

Если соблюдаются оба критерия, то данный ряд подчиняется нормальному распределению. При этом уровень значимости составного критерия принимается [50]:

$$q \leq q_1 + q_2.$$

6. Если результаты измерений распределены нормально, то определяется наличие промахов.

Для этого можно воспользоваться “правилом трех сигм” или методикой, описанной ниже. Суть ее состоит в том, что в начале по результатам измерений строится вариационный ряд $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, а затем по определенным в п.2 и п.3 значениях $\bar{x}$ и S_x вычисляют коэффициенты:

$$t_{\gamma 1} = (\bar{x} - x_1) / S(x), \quad t_{\gamma n} = (x_n - \bar{x}) / S(x).$$

На следующем шаге полученные значения $t_{\gamma 1}$ и $t_{\gamma n}$ сравнивают с теоретическим значением параметра t_T для заданного уровня значимости q при заданном объеме выборки. Если $t_{\gamma 1} > t_T$ или $t_{\gamma n} > t_T$, то данный результат является промахом и должен быть отброшен.

7. Затем необходимо задаться значением доверительной вероятности P и, зная количество измерений, выбрать по таблице Д.3 приложения Д коэффициент распределения Стьюдента $t_{P,n}$.

8. На следующем шаге по выражению (1.4) следует определить доверительные границы (без учета знака) или абсолютную погрешность результата измерения (случайную составляющую погрешности)

$$\varepsilon = t_{P,n} S(\bar{x}).$$

9. В случае многократных измерений некоторой величины x каждое отдельное измерение можно рассматривать как однократное. Поэтому при оценке

погрешности необходимо учитывать случайные ошибки многократных (подчиняющихся распределению Гаусса) и ошибки однократных (подчиняющихся равномерному распределению) измерений. Факторы, способствующие формированию погрешностей обоих типов, действуют независимо друг от друга. Поэтому для определения суммарной ошибки результата используют закон сложения независимых величин. Исходя из этого, если величина погрешности результата измерения Δ_x окажется сравнимой с величиной погрешности прибора $\Delta_{хи}$, то в качестве границы доверительного интервала следует взять абсолютную погрешность измерений $\Delta_{хсп}$ с учетом составляющих: инструментальной — $\Delta_{хи}$ и случайной — $\Delta_x = \epsilon$.

Тогда полную (общую) погрешность измерений можно определить по выражению [50]:

$$\Delta_{хсп} = \sqrt{\Delta_{хи}^2 + \Delta_x^2}.$$

В случае если преобладают случайные ошибки и число измерений большое, принимают $\Delta_{хсп} = \epsilon$.

Если приборная погрешность превышает остальные, можно в записи результата измерений не указывать доверительную вероятность, но необходимо указать ее характер, например — предельная приборная погрешность.

При значениях $\Delta_{хи}$ и Δ_x , отличающихся друг от друга в три и более раз, за $\Delta_{хсп}$ следует взять большее из этих значений.

На практике при обработке результатов электрических измерений значение доверительной вероятности достаточно взять равным 0,95. В тоже время величина инструментальной погрешности прибора нормируется для доверительной вероятности, равной 0,997≈1. Поэтому при принятом значении доверительной вероятности 0,95 инструментальную погрешность результата измерений следует учитывать в последнем выражении с коэффициентом 2/3 [50]:

$$\Delta_{хсп} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\Delta_{хи}\right)^2 + (t_{P,n}S(\bar{x}))^2}.$$

10. Далее необходимо найти относительную погрешность по формуле [50]:

$$\delta_{хсп} = \frac{\Delta_{хсп}}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

11. Используя правила представления результатов измерения, следует определить количество значащих цифр в абсолютной и относительной погрешностях, а также в значениях измеряемой величины.

12. В заключении необходимо представить результат измерений в следующем виде:

$x = (\text{измеренное значение } (\bar{x}) \pm \text{абсолютная погрешность}) \text{ единица измерения};$

$\delta_{хсп} = \text{относительная погрешность } \%; P=0,95.$

13. Для более точного определения границ погрешности результата измерений, руководствуясь ГОСТом 8.207-76 следует сделать оценку доверительных границ неисключенной систематической погрешности (НСП) результата

измерения. При введении поправки устраняется влияние только одной вполне определенной систематической погрешности, поэтому в результаты измерения зачастую приходится вводить очень большое число поправок.

Вследствие ограниченной точности определения поправок накапливаются случайные погрешности, то есть фактически нельзя полностью устранить все систематические погрешности.

Систематическая погрешность, которая остаётся после введения поправок на ее наиболее существенные составляющие, включает в себя ряд элементарных составляющих, называемых неисключенными остатками систематических погрешностей. Неисключенная систематическая погрешность (НСП) результата образуется из НСП средств и метода измерений, погрешностей поправок и т.д. При суммировании эти составляющие рассматриваются как случайные величины.

В случае отсутствия данных о виде распределения неисключенных составляющих систематических погрешностей их распределения принимают за равномерные.

Границы НСП результата измерения Θ вычисляют путем построения композиции НСП средств измерений, метода и погрешностей, вызванных другими источниками. При числе составляющих $m \leq 4$ границы НСП можно определить по следующей формуле [42]:

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^m |\Theta_i|,$$

где Θ_i — граница i -й НСП; m — количество неисключенных составляющих.

Оценка границ НСП является завышенной, поэтому при $m > 4$ границы Θ оцениваются по точечной оценке СКО НСП, определяемой как [50]:

$$\sigma_{\Theta} = \sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3}.$$

Когда $m \leq 4$ и $P=0,99$ доверительные границы вычисляются по выражению [50]:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где k — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при $P=0,95$ $k=1,1$); m — количество неисключенных составляющих. При доверительной вероятности $P=0,99$ и $m > 4$ коэффициент $k=1,4$. Если же число $m \leq 4$, то коэффициент k определяют по графику зависимости, приведенному в ГОСТ 8.207–76.

14. Далее следует вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Анализ соотношения между НСП и случайной погрешностью показывает,

что если $\frac{\Theta}{S(\bar{x})} < 0,8$, то НСП можно пренебречь и принять доверительные границы погрешности результата $\Delta = \epsilon$ [50].

Если $\frac{\Theta}{S(\bar{x})} > 8$, то случайной погрешностью можно пренебречь и принять

границы погрешности результата $\Delta = \Theta$ [50].

Если оба неравенства не выполняются, вычисляют оценку суммарного СКО результата измерения [50]:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\Theta_i^2}{3} \right) + S_{\bar{x}}^2}.$$

Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле [50]:

$$\Delta = \pm K S_{\Sigma},$$

где коэффициент K , зависящий от соотношения случайной погрешности и НСП, вычисляется по выражению [50]:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\bar{x}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\Theta_i^2}{3} \right)}}.$$

15. Стандартом регламентирована форма записи результатов измерений.

При симметричном доверительном интервале результат измерения представляют в форме:

$x = (\text{измеренное значение } (\bar{x}) \pm \Delta) \text{ единица измерения; } P.$

16. При отсутствии данных о видах функции распределения составляющих погрешности результата или при необходимости дальнейшей обработки результатов, результат измерения представляют в форме $\bar{x}, S_{\bar{x}}, n, \Theta$.

1.3.4 Обработка результатов косвенных измерений

В метрологии все измерения делятся на прямые и косвенные. При прямых (или непосредственных) измерениях числовое значение измеряемой величины получают по показаниям прибора.

В случаях, когда физическая величина не может быть измерена непосредственно, прибегают к косвенным измерениям.

При косвенных измерениях физическая величина y определяется функциональной зависимостью:

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

где $x_1, x_2, \dots, x_N$ — непосредственно измеряемые величины.

Методы обработки результатов косвенных измерений с многократными наблюдениями регламентируются МИ 2083–90 [51].

Обработка результатов косвенных измерений проводится в следующей последовательности.

1. Вначале находим средние значения и погрешности (абсолютную и относительную) каждой из непосредственно измеренных величин $x_1, x_2, \dots, x_N$. Погрешности $\Delta_{x_{i \text{ ср}}}$ и $\delta_{x_{i \text{ ср}}}$ определяются из прямых измерений или, как инструментальная погрешность прибора при доверительной вероятности, справедливой

для большинства электрических измерений $P = 0,95$.

2. Далее находим значение y_{cp} искомой величины при средних арифметических значениях параметров:

$$y_{cp} = f(x_{1cp}, x_{2cp} \dots x_{Ncp}).$$

3. Погрешность искомой величины y_{cp} зависит от погрешностей непосредственно измеренных величин, входящих в последнее выражение.

Определение погрешности y_{cp} можно выполнить одним из двух способов.

Способ 1. При первом способе вначале определяется абсолютная погрешность, а потом относительная погрешность.

Абсолютная погрешность определяется по выражению [51]:

$$\Delta_{y_{cp}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta_{x_{i_{cp}}} \right)^2}, \quad (1.5)$$

где $\Delta_{x_{i_{cp}}}$ — абсолютная погрешность величины x_i , а $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ — частные производные, вычисляемые при $x_i = x_{i_{cp}}$.

В выражении (1.5) используется геометрическое суммирование. При алгебраическом суммировании частных погрешностей для получения результирующей погрешности косвенного измерения $\Delta_{y_{cp}}$ следует просуммировать выражения $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta_{x_{i_{cp}}}$.

Далее находится относительная погрешность по формуле [51]:

$$\delta_{y_{cp}} = \frac{\Delta_{y_{cp}}}{y_{cp}} 100\%.$$

Способ 2. При втором способе вначале определяется относительная погрешность, а потом абсолютная погрешность.

Относительная погрешность определяется по выражению [51]:

$$\delta_{y_{cp}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta_{x_{i_{cp}}} \right)^2} 100\%,$$

где $\Delta_{x_{i_{cp}}}$ — абсолютная погрешность величины x_i , а $\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}$ — частные производные, вычисляемые при $x_i = x_{i_{cp}}$.

Далее находится абсолютная погрешность по формуле [51]:

$$\Delta_{y_{cp}} = \frac{y_{cp} \delta_{y_{cp}}}{100}.$$

Окончательно округляем результат косвенных измерений и делаем его запись в виде:

$y = (\text{измеренное значение} \pm \text{абсолютная погрешность}) \text{ единица измерения};$

$\delta_y = \text{относительная погрешность } \%; P = 0,95.$

При выборе способа расчета следует руководствоваться следующим.

1. В случае если искомая величина является функцией одной переменной, можно воспользоваться первым способом [51]:

$$\Delta_{y_{cp}} = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta_{x_{cp}}.$$

2. При зависимости искомой величины, определяемой как произведение (частное от деления) нескольких непосредственно измеряемых величин, следует воспользоваться вторым способом.

Например, есть выражение $y = \frac{Ax_1^a}{x_2^b}$. Если прологарифмировать это выра-

жение, то получим $\ln y = \ln A + a \ln x_1 - b \ln x_2$. С учетом того, что $\frac{\partial f \ln x_1}{\partial x_1} = \frac{1}{x_1}$ и

$\frac{\partial f \ln x_2}{\partial x_2} = \frac{1}{x_2}$, а производная от постоянной величины равна нулю, то

$$\delta_{y_{cp}} = \sqrt{\left(\frac{a\Delta_{x_{1cp}}}{x_{1cp}}\right)^2 + \left(\frac{b\Delta_{x_{2cp}}}{x_{2cp}}\right)^2} \cdot 100\% = \sqrt{a^2 \epsilon_{x_{1cp}}^2 + b^2 \epsilon_{x_{2cp}}^2} \cdot 100\%.$$

3. Если измеряемая величина определяется суммой или разностью двух величин, погрешность измеряемой величины можно определить по первому способу.

К примеру, если измеряемая величина $y = Ax \pm Bz$, то $y_{cp} = Ax_{cp} \pm Bz_{cp}$, а значение абсолютной погрешности определится как $\Delta_{y_{cp}} = \sqrt{A^2 \Delta_{x_{cp}}^2 + B^2 \Delta_{z_{cp}}^2}$.

1.3.5 Контрольные вопросы

1. В чем заключается причина появления случайных погрешностей?
2. Как учитывается инструментальная погрешность при полной оценке погрешности результатов измерений?
3. В каких целях используется правило “трех сигм”?
4. Как обработать результаты прямых однократных измерений?
5. Что называют средним квадратическим отклонением?
6. В чем заключается алгоритм обработки результатов прямых измерений?
7. Как бороться с промахами при проведении измерений?
8. Какие существуют условия для уменьшения случайных погрешностей?
9. Для какой цели определяются доверительные границы случайной погрешности результата измерений?
10. Что характеризуют математическое ожидание и дисперсия при оценке погрешностей случайной величины?

Часть 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

2.1 Устройство и характеристики электромеханических приборов

2.1.1 Устройство и принцип работы электромеханических приборов

Электромеханические приборы — это средства измерений (СИ), в которых электрическая энергия измеряемого сигнала преобразуется в механическую энергию подвижной части. Электромеханические приборы относятся к приборам прямого преобразования. Структурная схема электромеханического прибора изображена на рисунке 2.1.

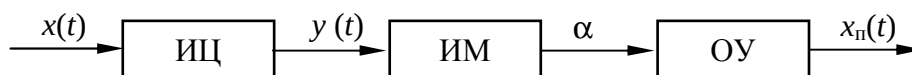


Рисунок 2.1 — Структурная схема электромеханического прибора

Основными составными частями электромеханического прибора являются: измерительная цепь (ИЦ), измерительный механизм (ИМ) и отсчетное устройство (ОУ). Все устройства размещаются в общем корпусе.

В ИЦ происходит преобразование входного сигнала $x(t)$ в промежуточную электрическую величину $y(t)$, воздействующую на ИМ. Кроме того, ИЦ может выполнять функцию расширения пределов измерений и компенсации погрешностей.

В ИМ осуществляется преобразование электромагнитной энергии $W_{эм}$, обусловленной наличием промежуточной величины $y(t)$, в механическую энергию. ИМ состоит из неподвижной и подвижной частей. Под действием измеряемой величины в ИМ создается вращающий момент $M_{вр}$, поворачивающий подвижную часть ИМ. В общем случае вращающий момент зависит от измеряемой величины $x(t)$ и угла поворота подвижной части α .

Для электромеханических приборов вращающий момент определяется как:

$$M_{вр} = \frac{dW_{эм}}{d\alpha}.$$

В настоящее время существует широкий класс измерительных механизмов (ИМ), входящих в конструкцию аналоговых измерительных приборов.

В зависимости от принципа действия ИМ, входящего в измерительный прибор, существуют следующие системы приборов: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, электростатическая и индукционная.

Принцип действия ИМ различных систем (групп) приборов основан на взаимодействии, в результате которого создается вращающий момент $M_{вр}$:

1) в магнитоэлектрических ИМ — магнитных полей постоянного магнита и проводника с током;

2) в электромагнитных ИМ — магнитного поля, создаваемого проводником с током, и ферромагнитного сердечника;

3) в электродинамических (и ферродинамических) ИМ — магнитных полей двух систем проводников с токами;

- 4) в электростатических ИМ — двух систем заряженных электродов;
5) в индукционных ИМ — переменного магнитного поля проводника с током и индуцированных этим полем вихревых токов в подвижном элементе.

Для того, чтобы каждому значению $x(t)$ соответствовало определенное значение угла поворота указательной стрелки α , вращающий момент $M_{вр}$ уравновешивается противодействующим моментом $M_{пр}$, зависящим от угла α и направленным в сторону, обратную моменту $M_{вр}$. Если бы в ИМ действовал только вращающий момент $M_{вр}$, то подвижная часть ИМ отклонилась бы до упора независимо от значения измеряемой величины.

В большинстве ИМ момент $M_{пр}$ создается спиральными пружинами или растяжками. Для этого случая

$$M_{пр} = M_{уд.пр} \alpha,$$

где $M_{уд.пр}$ — удельный противодействующий момент спиральных пружинок или растяжек.

В приборах для измерения отношения токов, называемых логометрами, противодействующий момент создается измеряемой величиной $x(t)$.

Указательная стрелка механизма останавливается, когда уравновешиваются оба момента, то есть $M_{вр} = M_{пр}$.

Отклонения подвижной части ИМ наблюдают с помощью отсчетного устройства (ОУ). Отсчетное устройство является частью конструкции прибора, предназначенной для отсчитывания значений измеряемой физической величины. В электромеханических приборах ОУ состоит из шкалы и указателя (стрелки). По ОУ определяют показание измерительного прибора $x_n(t)$.

Для соответствия значения измеряемой величины $x(t)$ определенному значению $x_n(t)$ необходимо, чтобы параметры всех устройств, входящих в ИМ при определенных внешних условиях были постоянными. Кроме того, отклонения этих параметров при различных внешних условиях должны вызывать малые изменения показаний, допустимые для данного прибора.

Большинство аналоговых электромеханических измерительных приборов являются измерителями электрического тока. Исключение составляют приборы, основанные на использовании электростатического эффекта для измерения электрического напряжения. Однако дополнительные схемные решения позволяют применить их для измерения различных электрических величин и параметров электрических цепей.

2.1.2 Классификация электромеханических приборов

В зависимости от типа применяемого ИМ, существуют следующие виды электромеханических приборов:

- ммагнитоэлектрические;
- электромагнитные;
- электродинамические;
- электростатические;
- индукционные;
- ферродинамические.

По роду измеряемого электрического тока электромеханические приборы

делятся на приборы, предназначенные для измерения в цепях постоянного или переменного тока.

В зависимости от способа создания противодействующего момента $M_{пр}$ электромеханические приборы подразделяются на механические и логометры.

Электромеханические приборы могут иметь различные способы успокоения: воздушные, жидкостные и магнитоиндукционные.

По виду измеряемой величины существуют следующие виды электромеханических приборов: амперметры; вольтметры; омметры; частотомеры и фазометры.

2.1.3 Основные характеристики электромеханических приборов

К метрологическим характеристикам СИ, приведенным в § 1.2.5, для электромеханических приборов можно добавить такие характеристики, как: точность, собственное потребление мощности, время успокоения, устойчивость к перегрузкам (электрическим и механическим), надежность и др.

Точность средства измерений — это есть качество СИ, отражающее близость нуля его погрешностей. Чем меньшие погрешности имеет СИ, тем оно считается более точным. Свойства электромеханического прибора в отношении точности характеризуется классом точности и другими свойствами прибора, влияющими на его точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды приборов.

Класс точности — обобщенная характеристика прибора, определяемая пределами допускаемой основной и дополнительных погрешностей (т. е. наибольшими погрешностями, при которых прибор по техническим требованиям может быть допущен к применению).

У электромеханических приборов **потребляемая мощность** определяется входным сопротивлением прибора. Для этого, у приборов, реагирующих на напряжение (включаемых параллельно участку цепи), входное сопротивление должно быть большим. У приборов, чувствительных к току (включаемых последовательно в электрическую цепь), входное сопротивление, наоборот, должно быть минимальным (по крайней мере, намного меньшим, чем сопротивление участка цепи).

Входное сопротивление прибора является важным параметром СИ, показывающим степень приспособленности данного средства к измерениям в мало-мощных измерительных цепях. В случае если мощность, потребляемая входной цепью прибора, имеет один порядок с мощностью входного сигнала, необходимо вводить поправки или согласовывать прибор по сопротивлению с источником измерительного сигнала.

Для электромеханических приборов указывается **время установления показания**, то есть промежуток времени с момента начала измерения до момента установления показаний. Значение времени установления показания для большинства приборов не должно превышать порядка ≈ 6 с.

Надежностью измерительного прибора называется его свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным ус-

ловиям использования, хранения и транспортирования.

Надежность прибора — это его безотказность, то есть свойство прибора непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

2.1.4 Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы электромеханических приборов?
2. Из каких основных составных частей состоит схема электромеханического прибора?
3. Какие существуют системы измерительных механизмов?
4. Как различаются электромеханические приборы в зависимости от способа создания противодействующего момента?
5. По какому устройству определяют показание измерительного прибора?
6. Что подразумевают под точностью средства измерений?
7. По какой из обобщенных характеристик прибор по техническим требованиям может быть допущен к применению?
8. Какое должно быть входное сопротивление электромеханического прибора в зависимости от измерения тока и напряжения?
9. Чем определяется потребляемая мощность электромеханического прибора?
10. Что характеризует надежность прибора?

2.2 Магнитоэлектрические и электромагнитные приборы

2.2.1 Устройство и принцип работы магнитоэлектрических измерительных механизмов

Одним из типов измерительных механизмов (ИМ) является магнитоэлектрический ИМ, входящий в состав магнитоэлектрического прибора. Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в электрических цепях постоянного тока. Различают магнитоэлектрические ИМ с подвижной рамкой и подвижным магнитом.

На рисунке 2.2 изображено конструктивное исполнение магнитоэлектрического измерительного механизма с подвижной рамкой [13].

Магнитоэлектрический ИМ с подвижной рамкой имеет постоянный магнит 1 с полюсными наконечниками 3. Форма магнита может быть разнообразной. Радиус закругления полюсных наконечников выбран таким, чтобы в воздушном зазоре между ними и неподвижным стальным цилиндром 2 получилась равномерная плотность магнитного потока или постоянная магнитная индукция. Вокруг неподвижного стального цилиндра 2 может поворачиваться алюминиевый каркас, на который намотана катушка 4 из тонкой проволоки. Один ее конец присоединен к спиральной пружине 5, а второй — к пружине 6. Через эти пружины подается в рамку измеряемый ток. Вместе с каркасом и рамкой может поворачиваться ось 7 с указательной стрелкой 8. Отсчет значений ведется по шкале 9. Рассмотрим принцип работы магнитоэлектрического ИМ с подвижной рамкой. Измеряемое напряжение подается на подвижную катушку (рамку) ИМ. Постоянный ток, протекающий через катушку, создает вокруг нее магнитное поле. При взаимодействии магнитного поля этой катушки с внешним магнитным полем, создаваемым магнитом неподвижной части прибора, возникает вращающий механический момент $M_{вр}$ [13]:

$$M_{вр} = B I s \varpi,$$

где B — индукция в воздушном зазоре между сердечником и полюсными наконечниками; s — площадь катушки; ϖ — число витков обмотки катушки. Под действием этого момента рамка, а вместе с ней и стрелка поворачиваются в направлении действия силы. При повороте рамки происходит закручивание спиральных пружин 5 и 6 на угол α и создается противодействующий момент [13]:

$$M_{пр} = M_{уд.пр} \alpha,$$

где $M_{уд.пр}$ — удельный противодействующий момент спиральных пружин.

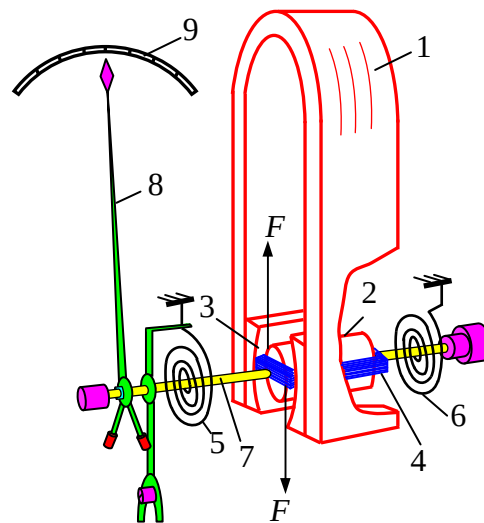


Рисунок 2.2 — Конструктивное исполнение магнитоэлектрического измерительного механизма с подвижной рамкой

При равенстве вращающего и противодействующего моментов устанавливается угол поворота подвижной части прибора.

Так как

$$BIs\omega = M_{\text{уд.пр}} \alpha,$$

получим уравнение шкалы прибора:

$$\alpha = BIs\omega / M_{\text{уд.пр}} = S_{\text{им}} I,$$

где $S_{\text{им}} = Bs\omega / M_{\text{уд.пр}}$ — чувствительность измерительного механизма.

Чувствительность ИМ показывает, на какой угол отклоняется указательная стрелка механизма при изменении силы тока на единицу.

Из последнего выражения видно, что значение угла α пропорционально силе измеряемого тока, то есть шкала у магнитоэлектрического прибора **равномерная**.

Прибором этого типа можно измерять только значение постоянного тока, так как при переменном токе создаются то положительный, то отрицательный моменты, что вследствие инерции стрелки приводит к ее неподвижности. Так как ток, проходящий по рамке, зависит от приложенного напряжения, то при постоянном сопротивлении рамки угол отклонения стрелки пропорционален напряжению, и, следовательно, при соответствующей градуировке шкалы прибора им можно измерять значение постоянного напряжения.

Магнитоэлектрические ИМ используются в амперметрах, вольтметрах и гальванометрах, а также в некоторых типах омметров.

Для измерения тока и напряжения в сетях постоянного тока судовых энергетических установок, а также для измерения неэлектрических величин, преобразованных в сигналы постоянного тока или напряжения, широкое применение нашли амперметры и вольтметры постоянного тока: М1420.1 (М1420); М1611.1; М1618; М1620 и т.д. Приборы содержат ИМ магнитоэлектрической системы. На рисунке 2.3, в качестве примера, изображен щитовой круглошкальный вольтметр постоянного тока М1420. Прибор соответствует класс точности 1,5, а предельное значение шкалы прибора — значению 450 В. Общие параметры моделей амперметров и вольтметров постоянного тока М1420.1 (М1420) следующие [52]:



Рисунок 2.3 — Щитовой круглошкальный вольтметр постоянного тока М1420

- класс точности: 2,5;
- пределы измерений:
- по току: 250 мкА...7,5 кА;
- по напряжению: 3...1000 В.

При верхнем пределе шкалы амперметра более 20 А подключается наружный шунт на 75 мВ. Вольтметры с соответствующим верхним пределом шкалы, измеряющие напряжение до 1000 В, включаются непосредственно к измеряемым цепям. Прибор отвечает требованиям Морского и Речного Регистров.

2.2.2 Устройство и принцип работы магнитоэлектрического логометра

Магнитоэлектрический логометр — это прибор, измеряющий отношение двух электрических величин: токов или напряжений. Логометр не измеряет абсолютные значения этих величин.

На рисунке 2.4 изображено конструктивное исполнение магнитоэлектрического логометрического механизма [14].

Магнитоэлектрический логометр имеет в своем составе две подвижные катушки 1 и 2, расположенные под определенным углом одна к другой и закрепленные на общей оси. Магнитное поле создается постоянным магнитом 4. Напряжение на подвижные катушки 1 и 2, вращающихся вокруг неподвижного сердечника 3, подается через контакты 6-7 и 7-8 посредством тонких ленточек, не создающих противодействующего момента. Отсчет измеренного значения ведется по шкале 5.

Принцип действия логометра основан на взаимодействии поля постоянного магнита и магнитных полей, вызванных токами, протекающими в двух рамках подвижной системы. Катушки подключают таким образом, что при пропускании через них токов создаются два противоположно направленных момента M_1 и M_2 . Эти моменты зависят не только от токов, протекающих по катушкам, но и еще от расположения рамок в магнитном поле воздушного зазора между полюсными наконечниками и неподвижным сердечником. С этой целью радиус полюсных наконечников 9 и форма неподвижного сердечника 3 подбираются таким образом, чтобы магнитная индукция в зазоре изменялась по синусоидальному закону, причем под серединой полюсов она была максимальна, а далее уменьшается с увеличением угла α .

Учитывая, что значения магнитных индукций B_1 и B_2 являются функциями угла поворота рамки, то есть $B_1 = f_1(\alpha)$ и $B_2 = f_2(\alpha)$, вращающие моменты, действующие на рамки, будут определяться по следующим выражениям [14]:

$$M_{вр1} = B_1 I_1 s_1 \varpi_1 = f_1(\alpha) I_1 s_1 \varpi_1 = f_{1им}(\alpha) I_1;$$

$$M_{вр2} = B_2 I_2 s_2 \varpi_2 = f_2(\alpha) I_2 s_2 \varpi_2 = f_{2им}(\alpha) I_2.$$

При неодинаковых значениях моментов подвижная система поворачивается в сторону действия большего вращающего момента.

Предположим, что момент M_1 будет больше момента M_2 . В результате этого подвижная система, а вместе с ней и стрелка прибора, начнут отклоняться по

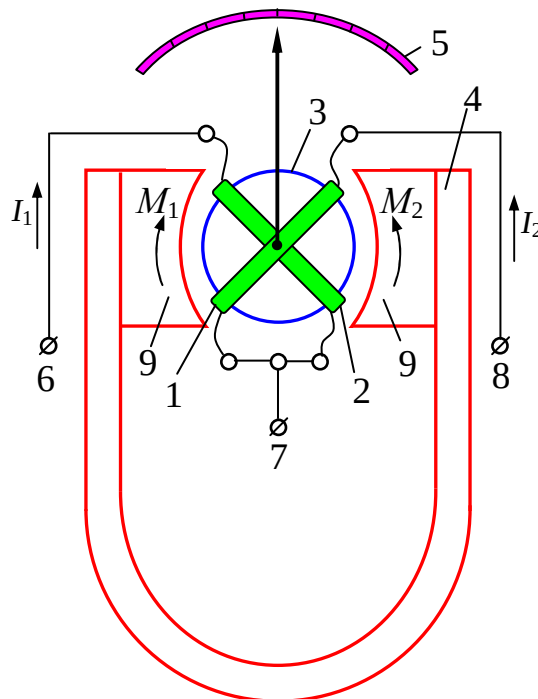


Рисунок 2.4 — Конструктивное исполнение магнитоэлектрического логометрического механизма

часовой стрелке. При этом рамка с током I_1 будет удаляться от середины полюсов, а рамка с меньшим током I_2 начнет приближаться к середине полюсов. Это приведет к тому, что рамка с током I_1 окажется в магнитном поле с меньшей магнитной индукцией B , вследствие чего сила F_1 , действующая на рамку, а также вращающий момент M_1 уменьшатся. В тоже время рамка с меньшим током I_2 начнет перемещаться в магнитное поле с большей индукцией, и, следовательно, сила F_2 увеличится. Увеличение момента M_2 будет происходить до тех пор, пока его значение не сравняется со значением момента M_1 .

При наступлении равновесия моментов, то есть:

$$M_{\text{вр1}} = M_{\text{пр}} = M_{\text{вр2}} \text{ или } f_{1\text{им}}(\alpha)I_1 = f_{2\text{им}}(\alpha)I_2,$$

отношение токов в рамках будет являться функцией угла отклонения стрелки

прибора $\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_{2\text{им}}(\alpha)}{f_{1\text{им}}(\alpha)} = f_{\text{им}}(\alpha)$ или угол поворота рамки α будет являться функ-

цией отношения токов, протекающих по рамкам прибора $\alpha = f_{\text{им}}\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$ [14].

2.2.3 Применение магнитоэлектрических приборов

Магнитоэлектрические приборы имеют следующие достоинства. Из уравнения шкалы магнитоэлектрического прибора видно, что угол отклонения стрелки прибора пропорционален силе тока, протекающего по его рамке. Из этого вытекает линейность шкалы прибора. Кроме того, чувствительность такого прибора остается практически величиной постоянной во всем диапазоне измерений. В отличие от других приборов, магнитоэлектрические приборы, имея сильное собственное магнитное поле, незначительно подвергаются влиянию внешних магнитных полей. Наличие довольно большого вращающего момента в ИМ этого типа позволяет применять их для изготовления самопишущих регистрирующих приборов.

Магнитоэлектрические приборы потребляют малые токи и, соответственно относятся к приборам с малыми собственными потерями. С помощью этих приборов можно измерять очень малые токи и напряжения.

Недостатки магнитоэлектрических приборов следующие: сложность конструкции, сравнительно высокая стоимость, слабая перегрузочная способность и работа только в цепях постоянного тока. Для применения ИМ в цепях переменного тока необходимо дополнительно подключить выпрямительные устройства. Класс точности магнитоэлектрических приборов составляет 0,5...1,5.

Одной из основных причин возникновения погрешности приборов связано с влиянием температуры. При повышении температуры уменьшаются магнитная индукция в рабочем зазоре и удельный противодействующий момент, а также увеличивается электрическое сопротивление обмотки рамки и токоподводов (спиральных пружинок или растяжек). Для компенсации влияния температуры в схему ИМ включают дополнительные терморезисторы и применяют различные схемы термокомпенсации.

Магнитоэлектрические ИМ применяют в приборах, предназначенных для

измерения напряжения, тока и сопротивления в цепях постоянного тока. Кроме того, магнитоэлектрические логометры используют в приборах для непосредственного измерения сопротивлений в виде омметров и мегомметров.

2.2.4 Устройство и принцип работы электромагнитных измерительных механизмов

В 1881 г. немецкий инженер Ф. Уппенборн изобрел электромагнитный прибор с эллиптическим сердечником, а в 1886 г. он же предложил электромагнитный прибор с круглой катушкой и двумя цилиндрическими сердечниками.

Значительные заслуги в электротехнике и развитии электроизмерительной техники конца второй половины XIX и начала XX столетия принадлежат русскому ученому М.О. Доливо-Добровольскому. Русский ученый разработал электромагнитные амперметры и вольтметры, индукционные приборы с вращающимся магнитным полем (ваттметр, фазометр) и ферродинамический ваттметр [15].

На рисунке 2.5 изображено конструктивное исполнение электромагнитных измерительных механизмов с катушкой: а) — плоской; б) — круглой.

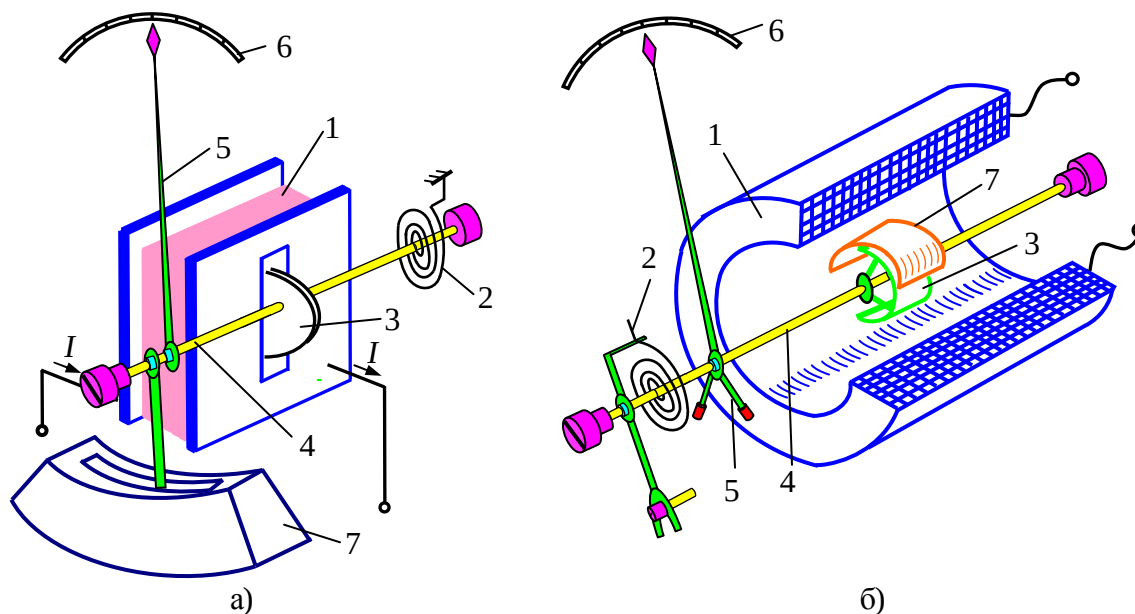


Рисунок 2.5 — Конструктивное исполнение электромагнитных измерительных механизмов с катушкой: а) — плоской; б) — круглой

Рассмотрим устройство и принцип действия электромагнитного измерительного механизма с плоской катушкой.

На плоский неферромагнитный каркас намотана из толстой проволоки катушка 1. Внутри каркаса имеется воздушный зазор. В зазоре перемещается ферромагнитная пластина 3, закрепленная ассиметрично на оси вращения. На оси 4 закреплена указательная стрелка 5, перемещающаяся вдоль шкалы прибора 6.

Принцип работы ИМ этой системы основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого катушкой 1 со стальным сердечником 3, помещенным в поле этой катушки. При прохождении тока I по катушке 1 создается намагничивающая сила $I\omega$ и магнитный поток Φ , в результате чего ферромагнитный сер-

дечник 3 будет втягиваться в катушку, поворачивая ось и стрелку. При этом действующая на нее сила F пропорциональна квадрату магнитной индукции B , возникающей в катушке. Сила F , стремясь втянуть сердечник, вызывает его поворот относительно оси, вместе с осью поворачивается стрелка прибора. Повороту оси 4 препятствует спиральная пружина 2. Поворот указательной стрелки будет происходить до тех пор, пока вращающий момент, создаваемый силой F , не уравнивается противодействующим моментом, создаваемым спиральной пружинкой.

Энергия, запасенная в катушке, определяется как [15]:

$$W_{\text{эм}} = (L \cdot I^2) / 2.$$

Индуктивность катушки при движении сердечника меняется, следовательно, выражение для вращающего момента, равного [15]:

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha}$$

будет иметь вид

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Из условия равенства вращающего и противодействующего моментов получаем:

$$\alpha = \frac{1}{2W_{\text{эм}}} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Из последнего уравнения следует, что отклонение указателя пропорционально квадрату измеряемого тока, то есть шкала нелинейная и прибор пригоден для измерения постоянного и переменного тока.

Градировка шкалы на постоянном токе соответствует среднеквадратичному (действующему) значению переменного тока.

Уравнение шкалы электромагнитного ИМ выглядит как [15]:

$$\alpha = AI^2 = S_{\text{им}} I,$$

где A — постоянная величина, обусловленная конструкцией данного прибора; $S_{\text{им}} = AI$ — чувствительность электромагнитного ИМ.

Чувствительность электромагнитного ИМ зависит от значения измеряемого тока.

При измерении малых значений токов чувствительность настолько мала, что начало шкалы не градуируют.

При измерении больших токов, с целью получения равномерной шкалы, ИМ конструируют таким образом, чтобы чувствительность его практически оставалась постоянной. Для этого устанавливают специальные ферромагнитные косынки, а также подбирают пространственное расположение сердечника относительно катушки.

ИМ с круглой катушкой, конструкция которого изображена на рисунке 2.5,б, состоит из катушки 1, подвижного 2 и неподвижного 7 ферромагнитных сердечников, форма которых определяется необходимостью получения требуемого характера шкалы 6.

Принцип работы ИМ с круглой катушкой аналогичен принципу работы ИМ с плоской катушкой и заключается в следующем. При протекании по катушке тока подвижный и неподвижный сердечники одноименно намагничиваются. Подвижный сердечник отталкивается от неподвижного сердечника, поворачиваясь вместе с осью 4 и закрепленной на ней стрелкой 5. Причем сила отталкивания оказывается прямо пропорциональной значению тока, протекающего по катушке. Противодействующий момент создается с помощью спиральной пружины 2.

Электромагнитные ИМ используют в амперметрах, вольтметрах, фазометрах и частотомерах. На рисунке 2.6, в качестве примера, изображен амперметр Э350 (Е350), предназначенный для измерения тока и напряжения в цепях переменного тока частотой 50 Гц класса точности 1,5. ИМ амперметров и вольтметров Е350 является механизмом электромагнитной системы с механическим противодействующим моментом с подвижной частью на кернах и подпятниках.

Для расширения пределов измерения переменного тока и напряжения применяют измерительные трансформаторы тока и напряжения соответственно.



Рисунок 2.6 — Щитовой амперметр Э350

В таблице 2.1 приведены способы включения щитовых амперметров и вольтметров Э350 (Е350) в зависимости от значения диапазона измерений [53].

Таблица 2.1 — Способы включения щитовых амперметров и вольтметров Э350 (Е350) в зависимости от конечного значения диапазона измерений

Наименование прибора	Конечные значения диапазонов измерений	Способ включения
Амперметр Е350	от 5 до 500 мА от 1 до 300 А	Непосредственно
	от 1 до 800 А от 1 до 4 кА	Через трансформатор тока с вторичным током 1 А или 5 А
	от 5 до 800 А от 4 до 40 кА	Через трансформатор тока с вторичным током 5А
Вольтметр Е350	от 6 до 600 В	Непосредственно
	от 450 до 750 В от 3,5 до 600 кВ	Через трансформатор напряжения с вторичным напряжением 100В или 110В

2.2.5 Устройство и принцип работы электромагнитного логометра

На рисунке 2.7 изображено конструктивное исполнение электромагнитного логометрического механизма. Электромагнитные логометрические механизмы бывают двухмоментные и трехмоментные. В отличие от двухмоментного механизма, у трехмоментного механизма имеет место переменная магнитная связь между катушками. Двухмоментный электромагнитный логометр состоит из двух неподвижных катушек 1 и 2, расположенных на значительном расстоянии одна от другой (чтобы уменьшить их взаимное влияние), и двух сердечников 3, укрепленных на подвижной оси 4 с указательной стрелкой 5. Отсчет показаний ИМ ведется по шкале 6 [16].

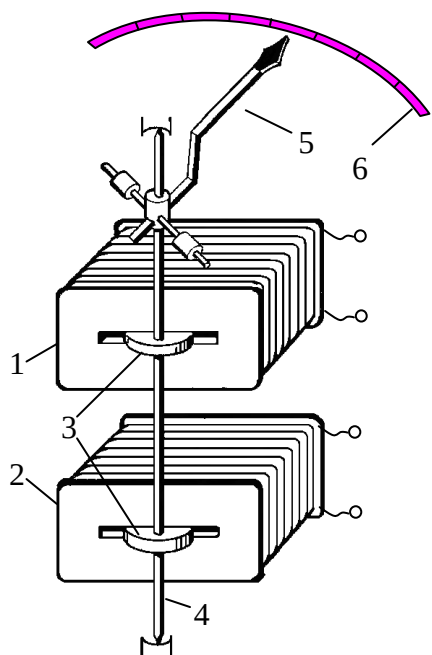


Рисунок 2.7 — Конструктивное исполнение электромагнитного логометрического механизма

Катушки с токами и сердечники укреплены так, что при увеличении угла поворота α и, следовательно, при изменении положения сердечников относительно катушек индуктивность одной катушки возрастает, а другой убывает, поэтому производные $dL_1/d\alpha$ и $dL_2/d\alpha$ имеют разные знаки, а

вращающие моменты, действующие на сердечники, направлены в противоположные стороны. Под действием разности этих вращающих моментов подвижная система вместе со стрелкой механизма 4 поворачивается в сторону действия большего момента. Поскольку в логометрах нет противодействующего момента, вся система будет двигаться до тех пор, пока вращающие моменты M_1 и M_2 не сравняются. При статическом равновесии моментов ($M_1=M_2$) получим [16]:

$$\frac{I_1^2 dL_1}{2d\alpha} = \frac{I_2^2 dL_2}{2d\alpha}.$$

Окончательно уравнение преобразования электромагнитного логометрического ИМ примет следующий вид [16]:

$$f_{\text{им}}(\alpha) = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{(dL_2/d\alpha)}{(dL_1/d\alpha)}}.$$

Таким образом, угол отклонения стрелки у электромагнитных логометров зависит от отношения токов, протекающих по рамкам. Электромагнитные логометры нашли применение в аналоговых фазометрах, частотомерах и синхроноскопах. На рисунке 2.8, в качестве примера, изображен синхроноскоп Э1505, а на рисунке 2.9 — схема его подключения к генераторам [54].

Прибор предназначен для указания момента синхронизации при включении на параллельную работу двух или нескольких трехфазных генераторов переменного тока в передвижных энергетических установках. В схеме прибора, в качестве ИМ, используется электромагнитный логометр PS_1 . ИМ включает три неподвиж-

ные катушки 1, 2 и 3, внутри которых на оси с закрепленной стрелкой вращается стальной сердечник, состоящий из двух секторообразных лепестков.

В схеме подключения синхроскопа катушка 3 подключена к фазам *A* и *B* первого генератора, а катушки 1 и 2 через добавочные резисторы R_1 , R_2 и R_3 — к фазам подключаемого второго генератора. Подключение второго генератора осуществляется с помощью переключателя SA_1 . В случае несовпадения частот подключаемого второго генератора и сети, то есть в зависимости от того, быстрее или медленнее синхронной скорости вращается подключаемый генератор, стрелка синхроскопа вращается по часовой стрелке или наоборот.

Указания в отношении регулировки скорости дают надписи “медленнее” и “быстрее” на шкале прибора. При совпадении частот и фаз ЭДС генератора и напряжения сети стрелка синхроскопа устанавливается в нулевое положение. Синхроскопы этого типа выпускаются на работу в сетях с частотой 50 и 400 Гц и на номинальное напряжение: 127, 220, 380 В. Основная погрешность прибора, заключающаяся в отклонении его стрелки от отметки синхронизации, составляет $\pm 3^\circ$.

Диапазон разности частот синхронизируемого и работающего генераторов должен быть не менее чем 0...1 Гц на частоте 50 Гц и 0...2,5 Гц на частоте 400 Гц.

2.2.6 Применение электромагнитных приборов

Вначале рассмотрим преимущества этих приборов. Приборы электромагнитной системы могут работать в цепях постоянного и переменного тока, причем в цепях переменного тока электромагнитные приборы измеряют действующие значения тока или напряжения. Приборы этого типа просты по устройству и являются сравнительно недорогими. Для измерения больших токов эти приборы могут непосредственно подключаться к электрической цепи, так как катушки у них неподвижные и их легко изготовить из провода с большой площадью сечения. В настоящее время изготавливают амперметры электромагнитной системы для непосредственного включения на токи до 150 А. Приборы с



Рисунок 2.8 — Синхроскоп Э1505

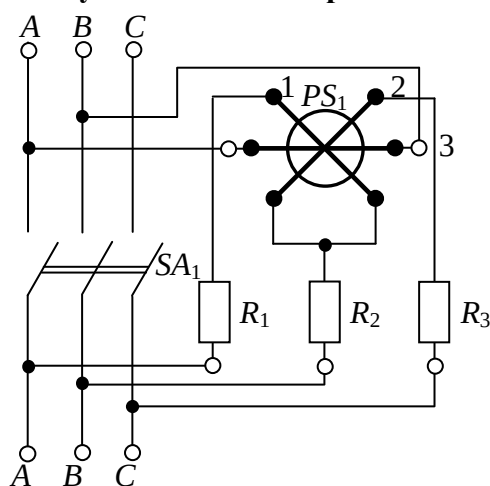


Рисунок 2.9 — Схема подключения синхроскопа Э1505 к генераторам

электромагнитными ИМ выдерживают не только кратковременные, но и длительные перегрузки, возникающие в процессе измерения.

К недостаткам электромагнитных приборов относят:

- неравномерность шкалы у большинства приборов;
- относительно низкая чувствительность при измерении малых токов, то есть сравнительно низкая точность измерения в начале шкалы;
- зависимость показаний приборов от влияния внешних магнитных полей;
- низкий частотный диапазон измерений, обусловленный влиянием вихревых токов, а также изменением индуктивного сопротивления катушки и наличием межвитковой емкости этой катушки;
- большая чувствительность приборов к колебаниям частоты тока;
- большое их собственное потребление.

Для устранения влияния магнитных полей в ИМ устанавливают магнитные экраны. На погрешность электромеханических приборов влияют:

- трение в опорах ИМ и последствия упругости действия пружинок или растяжек;
- погрешность от гистерезиса материала сердечников, вызывающая разницу в показаниях прибора при возрастании и убывании постоянного тока;
- температурная погрешность, обусловленная изменением температуры окружающей среды и приводящая к изменению сопротивления цепи катушки и упругости пружин (или растяжек).

Для снижения погрешности от гистерезиса материал сердечника выбирается с малой коэрцитивной силой. С целью компенсации температурной погрешности используют термокомпенсационные схемы и терморезисторы. Расширение частотного диапазона прибора осуществляется с помощью специальных схем частотной компенсации.

Электромагнитные измерительные механизмы нашли наибольшее распространение в щитовых измерительных приборах классов точности не выше 1,5.

2.2.7 Контрольные вопросы

1. Каково назначение магнитоэлектрических приборов?
2. В чем заключается принцип работы магнитоэлектрического прибора с подвижной рамкой?
3. Какие достоинства и недостатки имеют магнитоэлектрические приборы?
4. Где нашли применение магнитоэлектрические приборы?
5. В чем заключается особенность магнитоэлектрических логометров?
6. Какие основные элементы входят в электромагнитные приборы?
7. Каков принцип действия электромагнитных приборов?
8. Какие достоинства и недостатки имеют электромагнитные приборы?
9. Почему начало шкалы электромагнитных ИМ не градуируется?
10. Где нашли применение электромагнитные приборы?

2.3 Электродинамические и ферродинамические приборы

2.3.1 Устройство и принцип работы электродинамического измерительного механизма

На рисунке 2.10 изображено конструктивное исполнение электродинамического ИМ, входящего в состав электродинамического прибора.

Электродинамический ИМ состоит из двух катушек: неподвижной 2 и расположенной внутри нее подвижной 1. Подвижная катушка 1, закреплена на оси прибора 3. Для быстрого успокоения в ИМ установлен воздушный успокоитель (демпфер) 4. На оси 3 установлена указательная стрелка 5 и две спиральные пружины 6, служащие для создания в механизме противодействующего момента и подвода тока к подвижной катушке 1 [16].

Принцип работы электродинамического ИМ основан на взаимодействии полей катушек 1 и 2. При прохождении по катушкам токов i_1 и i_2 возникают электродинамические силы F , которые стремятся повернуть подвижную катушку относительно неподвижной катушки на некоторый угол. Вращающий момент, действующий на подвижную катушку, определяется как [16]:

$$M_{\text{вр}} = c_1 I_1 I_2,$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от параметров катушек (числа витков и размеров), а также их формы и взаимного расположения.

Повороту подвижной катушки с конструктивной постоянной c_2 противодействует момент $M_{\text{пр}} = c_2 \alpha$.

В момент равновесия [16]:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}},$$

откуда

$$\alpha = (c_1/c_2) I_1 I_2 = k I_1 I_2,$$

где $k = c_1/c_2$ — постоянная величина.

При прохождении по катушкам переменных токов i_1 и i_2 вращающий момент, средний за период, будет равен [16]:

$$M_{\text{ср}} = c_1 I_1 I_2 \cos \psi,$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов i_1 и i_2 соответственно; ψ — угол сдвига фаз между токами i_1 и i_2 . Поэтому при переменном токе угол поворота

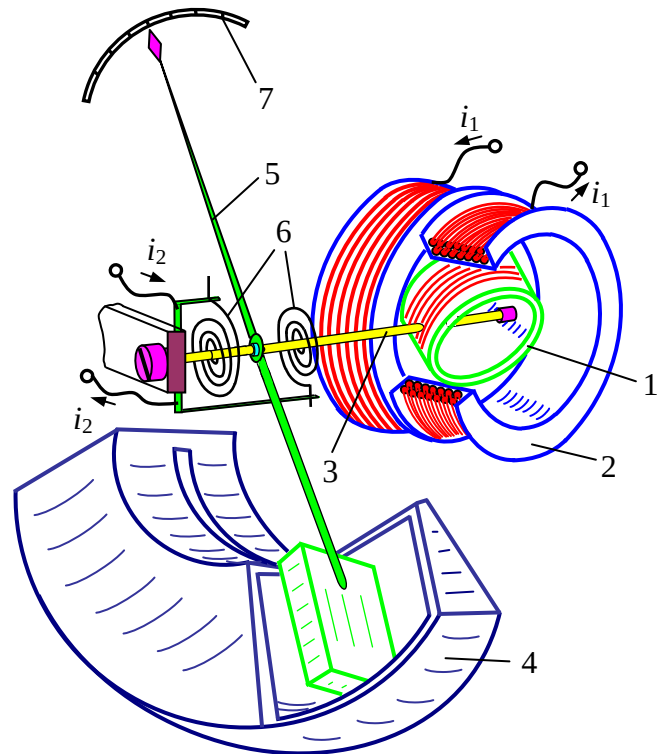


Рисунок 2.10 — Конструктивное исполнение электродинамического измерительного механизма

стрелки механизма составит:

$$\alpha = kI_1I_2 \cos\psi.$$

Таким образом, угол поворота стрелки α пропорционален действующим значениям токов, проходящих по катушкам и углу сдвига фаз между этими токами.

Для того чтобы электродинамический ИМ мог быть использован для измерения тока, напряжения или мощности, необходимо катушки ИМ включить по определенной схеме.

2.3.2 Включение электродинамического измерительного механизма для измерения тока и напряжения

На рисунке 2.11,а изображены схемы включения электродинамического ИМ в качестве амперметра, а на рисунке 2.11,б — в качестве вольтметра [10].

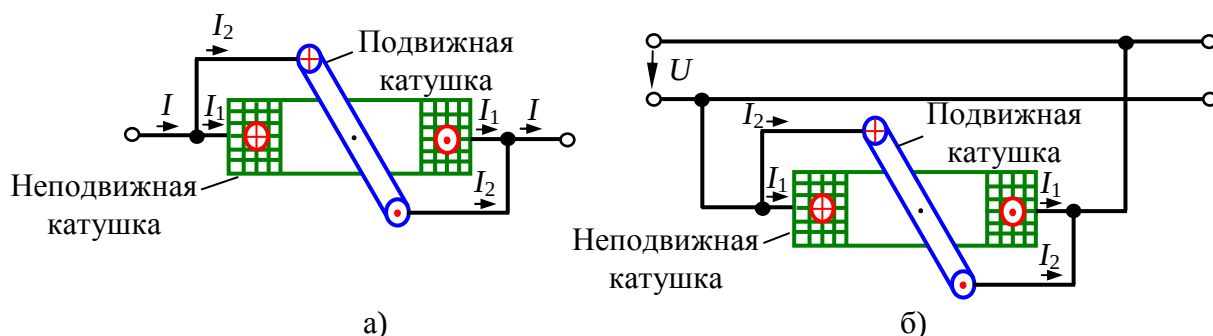


Рисунок 2.11 — Схемы включения электродинамического прибора в качестве амперметра (а) и вольтметра (б)

При включении обеих катушек прибора последовательно в цепь измеряемого тока ИМ будет работать в качестве амперметра. Если катушки ИМ подключить так, как показано на рисунке 2.11,б, то ИМ будет работать в качестве вольтметра. Вид круга в сечении неподвижной обмотки означает направление в ней тока. Если ток направлен к нам, то в изображении круга показана точка (“Острые стрелы”). При измерении токов до 0,5 А катушки включают последовательно, поэтому угол поворота стрелки механизма α будет равен [17]:

$$\alpha = S_{\text{им}} I^2,$$

где $S_{\text{им}}$ — чувствительность ИМ.

При измерении больших токов катушки включают параллельно. Кроме того, в цепи катушек включают такие добавочные резисторы, чтобы угол сдвига фаз между токами в катушках был равен нулю. В этом случае ток в каждой катушке пропорционален общему току в цепи [17]:

$$I_1 = k_1 I \text{ и } I_2 = k_2 I,$$

а угол отклонения стрелки прибора будет равен:

$$\alpha = S_{\text{им}} k_1 k_2 I^2 = S_I I,$$

где k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров катушек ИМ; $S_I = k_1 k_2 S_{\text{им}} I$ — чувствительность амперметра.

Из последнего выражения видно, что шкала ИМ является неравномерной. Для получения постоянной чувствительности ИМ в диапазоне измерения, катушки ИМ располагают особым образом по отношению друг к другу.

Количество секций в токовой катушке определяет количество пределов измерений по току. В этом случае, если токовая катушка состоит из двух секций, прибор имеет два предела измерений по току. При одном пределе измерений секции включают последовательно, а при другом (большем) — параллельно.

При измерении напряжения подвижную и неподвижную катушки прибора включают последовательно в сеть вместе с добавочным сопротивлением.

В цепи переменного тока угол сдвига фаз $\psi=0$, а $\cos\psi=1$, следовательно [17]:

$$\alpha = S_{\text{им}} I I = S_{\text{им}} I^2 = S_{\text{им}} U^2 / R^2 = S_U U,$$

где R — общее сопротивление цепи прибора, включающего добавочное сопротивление, $S_U = S_{\text{им}} U / R^2$ — чувствительность вольтметра в цепи переменного тока. Из последнего выражения видно, что прибором с электродинамическим ИМ можно измерять напряжение в цепях постоянного и переменного тока.

2.3.3 Включение электродинамического измерительного механизма для измерения мощности

На рисунке 2.12 изображена схема включения катушек электродинамического прибора в качестве ваттметра [10].

При измерении мощности в электрической цепи неподвижную катушку включают последовательно с нагрузкой. Эту катушку называют токовой катушкой ИМ.

Подвижную катушку (или катушку напряжения) включают параллельно нагрузке. Если ток нагрузки не больше допустимого тока катушки, то последнюю включают непосредственно в сеть.

Начальные выводы катушек напряжения и тока подключаются к общему зажиму сети и обозначаются на приборе звездочками (*).

Ток в подвижной катушке I_2 зависит только от значения приложенного напряжения ($I_2=kU$), а угол отклонения указательной стрелки прибора зависит от мощности [17]:

$$\alpha = S I_1 I_2 = S I_1 k U = S k I U = S_p I U = S_p P,$$

где S_p — чувствительность ваттметра (для данного прибора величина постоянная); k — постоянная величина.

Из последнего выражения видно, что при соответствующей градуировке шкалы ИМ, этим прибором с этим механизмом можно измерять мощность в цепи постоянного тока. При этом шкала прибора будет равномерной. При переменном токе угол сдвига фаз между токами i_1 и i_2 равен углу сдвига фаз между током в нагрузке и напряжением на ней. Поэтому угол отклонения указательной стрелки прибора будет пропорционален измеряемой активной мощности:

$$\alpha = k U I \cos\varphi = k P.$$

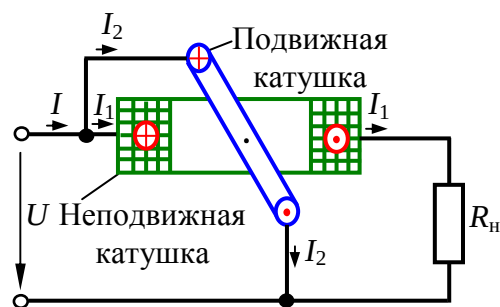


Рисунок 2.12 — Схема включения катушек электродинамического прибора в качестве ваттметра

2.3.4 Устройство и принцип работы электродинамического логометра

На рисунке 2.13 изображено конструктивное исполнение электродинамического логометрического механизма, входящего в состав прибора, называемого электродинамическим логометром.

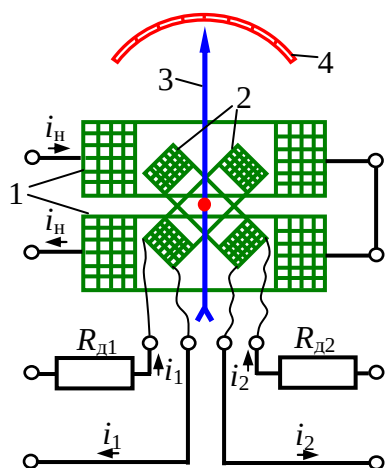


Рисунок 2.13 — Конструктивное исполнение электродинамического логометрического механизма

Электродинамические логометры нашли применение при изготовлении переносных и щитовых фазометров и частотомеров промышленной частоты.

ИМ электродинамического логометра имеет в своем составе две неподвижные катушки 1 и две подвижные катушки 2. Подвижные катушки укреплены на одной оси и получают питание через тонкие ленточки, не создающие противодействующего момента. Поэтому при отсутствии токов в катушках стрелка прибора занимает произвольное положение на шкале прибора. На этой же оси

закреплена указательная стрелка 3. Отсчет измеренных данных ведется по шкале 4 [18].

Неподвижные катушки 1 включаются в сеть последовательно с нагрузкой, а подвижные катушки 2 — параллельно нагрузке, но последовательно с добавочными сопротивлениями ($R_{д1}$, $R_{д2}$).

Значения сопротивлений $R_{д1}$, $R_{д2}$ разные по номиналу, поэтому токи i_1 и i_2 , протекающие через подвижные катушки, сдвинуты по фазе от напряжений на разные углы φ_1 и φ_2 , а, следовательно, и на разные углы относительно тока нагрузки (ψ_1 и ψ_2).

При взаимодействии тока неподвижной катушки с токами подвижных катушек i_1 и i_2 создаются два вращающих момента $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$.

Катушки прибора располагают так, что при определенном направлении токов i_1 и i_2 моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$ противоположны. Поэтому подвижная система прибора вместе со стрелкой отклоняется в сторону действия большего вращающего момента до тех пор, пока моменты не уравновесятся.

Уравнение шкалы электродинамического логометра имеет вид [18]:

$$\alpha = S_n \left(\frac{I_1 \cos \psi_1}{I_2 \cos \psi_2} \right),$$

где S_n — чувствительность прибора.

Из последнего выражения видно, что в электродинамических логометрах угол отклонения стрелки прибора зависит от отношения токов, протекающих по подвижным катушкам i_1 и i_2 , и от косинусов углов сдвига фаз этих токов относительно тока, протекающего в неподвижной катушке.

2.3.5 Применение электродинамических приборов

К достоинствам электродинамических приборов можно отнести следую-

щее:

- возможность измерения в цепях постоянного и переменного токов;
- высокая точность измерения постоянного тока (класс точности 0,05 и выше);
- возможность измерения мощности в цепях постоянного тока;
- возможность измерения активной и реактивной мощностей в цепях переменного тока;
- равномерность шкалы при измерении мощности;
- возможность использования для учета расходования электрической энергии в цепях постоянного тока.

К недостаткам электродинамических приборов относят:

- неравномерность шкалы при измерении токов и напряжений;
- большое собственное потребление;
- зависимость показаний приборов от влияния внешних магнитных полей, вследствие слабого собственного магнитного поля;
- зависимость показаний приборов от температуры окружающего воздуха и частоты измеряемого тока;
- ограниченность пределов измерений по току и напряжению из-за близкого расположения подвижной и неподвижной катушек.

Электродинамические приборы нашли применение в качестве точных лабораторных приборов, а также в качестве ваттметров и счетчиков электрической энергии в цепях постоянного тока.

2.3.6 Устройство и принцип работы ферродинамических приборов

На рисунке 2.14 изображено конструктивное исполнение ферродинамического ИМ, входящего в состав ферродинамического измерительного прибора.

Ферродинамический ИМ имеет следующее устройство. На полюсах ферромагнитного сердечника 1 размещена неподвижная катушка 2.

Применение магнитопровода дает значительное увеличение индукции магнитного поля в рабочем зазоре и вращающего момента и, в результате — увеличение чувствительности ИМ. В воздушном зазоре между полюсами сердечника 1 установлен цилиндрический сердечник 4 вокруг которого на оси вращается подвижная катушка 3 вместе с указательной стрелкой 5. Отсчет измеренного значения ведется по шкале 6.

При такой конструкции ИМ защищен от влияния внешних магнитных полей [19].

Принцип работы ИМ следующий. В результате взаимодействия магнитных полей неподвижной катушки 2 с током i_1 и подвижной катушки 3 с током i_2 , возникнет вращающий момент, действующий на подвижную катушку.

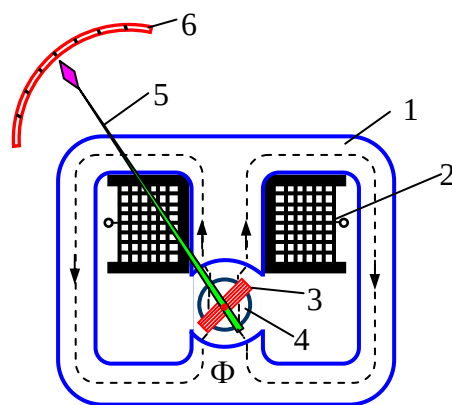


Рисунок 2.14 — Конструктивное исполнение ферродинамического ИМ

Результирующий вращающий момент, действующий на подвижную катушку 3, будет определяться по выражению [20]:

$$M_{\text{вр}} = k_1 I_1 I_2 \cos(\hat{i}_1 i_2),$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов i_1 и i_2 в неподвижной и подвижной катушках соответственно; $\cos(\hat{i}_1 i_2)$ — косинус угла между токами i_1 и i_2 .

Повороту подвижной катушки противодействует момент $M_{\text{пр}} = k_2 \alpha$.

Когда наступит момент равновесия ($M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$), указательная стрелка ИМ остановится на измеренном значении. При этом зависимость значения результирующего угла отклонения подвижной части ИМ α примет следующий вид [20]:

$$\alpha = (k_1/k_2) I_1 I_2 = k I_1 I_2 \cos(\hat{i}_1 i_2),$$

где $k = k_1/k_2$ — постоянная величина.

Ферродинамические ИМ используют в щитовых: амперметрах; вольтметрах; ваттметрах; частотомерах и фазометрах.

Приборы с ферродинамическим ИМ, хорошо работают в условиях тряски и вибраций. Их применяют в качестве самопишущих приборов, так как они имеют значительный вращающий момент, преодолевающий трение в записывающих устройствах (самописцах).

Приборы ферродинамической системы выпускаются для работы в сетях со стандартным значением частоты — 50 или 400 Гц.

Наибольшее применение ферродинамические ИМ нашли в схемах ваттметров.

В качестве примера, на рисунке 2.15 изображен однофазный переносной ваттметр Д5066 (Д50041) ферродинамической системы со стрелочным указателем и равномерной односторонней шкалой класса точности 0,5.



Рисунок 2.15— Однофазный переносной ваттметр Д5066

Ваттметр предназначен для измерения активной мощности в цепях переменного и постоянного токов.

Номинальный коэффициент мощности прибора равен 1. Диапазон частот работы ваттметра составляет 45...65 Гц. Номинальный ток прибора 0...5/10 А, а номинальное напряжение: 30; 75; 150; 300; 450; 600 В [55].

Однако, выпускаемые приборы с этим типом ИМ имеют класс точности не выше 0,5. Это, прежде всего связано с тем, что материал сердечника ИМ имеет нелинейную кривую намагничивания.

Кроме того, на точность работы ИМ влияют: температура, внешние магнитные поля и частота тока, протекающего по катушкам механизма.

2.3.7 Контрольные вопросы

1. Каково устройство электродинамического ИМ?
2. В чем заключается принцип работы электродинамического ИМ?
3. Как включают катушки электродинамического ИМ при измерении напряжения и тока?
4. Какие существуют особенности подключения катушек электродинамического ИМ при измерении мощности?
5. Как подключают ваттметр для измерения активной мощности в цепи переменного тока?
6. Какие достоинства и недостатки имеют электродинамические ИМ?
7. В чем особенность электродинамического логометра?
8. Где применяются электродинамические логометры?
9. Каково устройство ферродинамических ИМ?
10. В чем заключается принцип работы ферродинамических ИМ?

2.4 Электростатические и индукционные приборы

2.4.1 Устройство и принцип работы электростатических измерительных механизмов

Электростатические приборы используются для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока.

На рисунке 2.16 изображено конструктивное исполнение электростатического измерительного механизма (ИМ), включающего: 1 — подвижные пластины; 2 — неподвижные камеры; 3 — подвижная ось; 4 — пружина; 5 — стрелка; 6 — шкала [19].

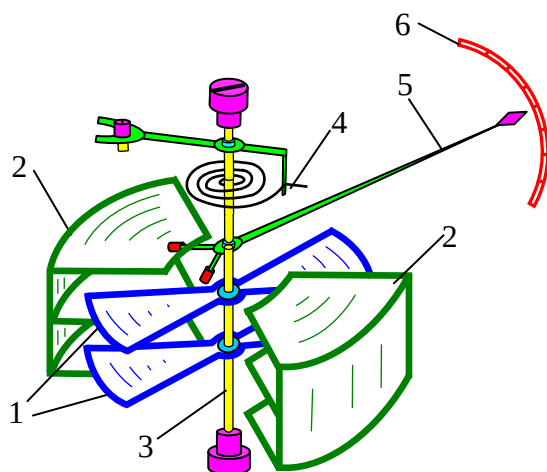


Рисунок 2.16 — Конструктивное исполнение электростатического измерительного механизма

Принцип работы электростатического ИМ следующий. Измеряемое напряжение прикладывается между подвижными пластинами 1 и неподвижными камерами 2, находящихся на достаточно малом расстоянии друг от друга. В результате взаимодействия зарядов, возникающих на электродах, подвижные пластины 1 втягиваясь в воздушные зазоры камер 2, создают вращающий момент. Вращающий момент повернет ось 3 с указательной стрелкой 5. В свою очередь, за счет спиральной пружины 4 создается противодействующий момент [19].

Стрелка ИМ будет поворачиваться до тех пор, пока не наступит равновесие вращающего и противодействующего моментов.

Шкала электростатического ИМ является неравномерной. Для удобства измерений шкала ИМ часто выполняется со световым указателем.

Достоинствами электростатического ИМ являются малое потребление энергии и независимость его показаний от частоты.

Для защиты ИМ от внешних электростатических полей устанавливаются электростатические экраны.

Показания ИМ соответствуют среднеквадратическому значению измеряемой величины.

Основная погрешность электростатических ИМ связана с частотой и температурой. В номинальной области частот погрешность обусловлена наличием собственной емкости ИМ и индуктивности проводов.

В ИМ с защитным сопротивлением при работе на высоких частотах появляется дополнительная погрешность за счет емкостного тока, ограничивающего применение защитного сопротивления до частот несколько сотен килогерц. Защитное сопротивление встраивается внутрь прибора и ограничивает ток при случайном замыкании подвижных пластин и неподвижных камер, которое может произойти при случайных толчках и ударах. Вольтметры на высокие на-

пряжения (от 600 В и выше) защитных сопротивлений не имеют, так как расстояния между электродами в этих приборах достаточно велики

Температурная погрешность ИМ вызвана изменениями емкости ИМ и упругости материала растяжек с изменением температуры. Для компенсации температурной погрешности применяются различные конструктивные меры, в том числе крепление растяжек на термобиметаллических пластинах. Кроме того, вследствие наличия перепада температур в объеме ИМ и применения разнородных проводниковых материалов в измерительной цепи, возникает дополнительная погрешность от термоЭДС.

На погрешность ИМ влияет контактная разность потенциалов, которая возникает при переходе с постоянного тока на переменный или при перемене полярности измеряемого постоянного напряжения. Для снижения контактной разности потенциалов поверхности камер и подвижных пластин специальным образом обрабатываются.

Для снижения погрешности, обусловленной поляризацией диэлектрика, применяют изоляционный материал с малым значением диэлектрической проницаемости и экранируют диэлектрик от подвижных пластин 1 путем металлизации свободной поверхности, обращенной к этим пластинам. Проводящее покрытие диэлектрика электрически соединяют с подвижной частью.

Дополнительная погрешность вносится из-за наличия трения в опорах ИМ и последствия упругости действия растяжек.

2.4.2 Применение электростатических приборов

Электростатические приборы имеют следующие достоинства. Ввиду протекания весьма малых токов утечки через изоляцию и емкости ИМ, а также кратковременности зарядного тока электростатические приборы имеют малое собственное потребление мощности на постоянном токе и низких частотах.

Приборы этой системы можно использовать в цепях постоянного и переменного токов.

Высоковольтные электростатические приборы выпускаются на напряжения от 7,5 до 300 кВ. Причем, для непосредственного измерения высоких напряжений (до 300 кВ) нет необходимости применения измерительных трансформаторов напряжения.

Эти приборы имеют широкий частотный диапазон (от 20 Гц до 35 МГц).

В настоящее время выпускаются щитовые электростатические вольтметры на напряжения от 30 В до 15 кВ классов точности 1,0 и 1,5 с частотным диапазоном от 20 Гц до 3 МГц.

Переносные вольтметры классов точности 0,5, 1,0 и 1,5 выпускаются на напряжения от 10 В до 3 кВ с частотным диапазоном до 35 МГц.

Вольтметры самой высокой точности (классов 0,05 и 0,1) имеют пределы измерения 50, 150 и 300 В и частотный диапазон от 20 Гц до 500 кГц.

Наряду с этим, электростатическим приборам свойственны и недостатки. Эти приборы имеют низкую чувствительность, а также неравномерную шкалу. Кроме того, эти приборы подвержены влиянию внешних электростатических полей, для защиты от которых в механизме устанавливаются электростатиче-

ские экраны.

Электростатические приборы могут использоваться также для измерения мощности, сопротивления, индуктивности. Кроме этого, ИМ электростатической системы могут применяться также во многих специальных приборах (компараторах, автокомпенсаторах и т.д.).

Для измерения высоких напряжений от 7,5 до 300 кВ используются специальные высоковольтные электростатические приборы.

На рисунке 2.17, в качестве примера, изображен электростатический киловольтметр марки С197, предназначенный для измерения высокого напряжения



Рисунок 2.17 — Электростатический киловольтметр С197

постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот. Этот прибор, имея три предела измерений (верхний предел до 30 кВ) и являясь переносным, имеет класс точности не хуже 1,0 [56].

Преимущество электростатических киловольтметров заключается в малом потреблении мощности от объекта измерения. Наиболее точные приборы этой системы имеют класс точности 0,05. Электростатические приборы высокой точности являются сложными и сравнительно дорогими приборами, поэтому выпускаются по специальному заказу.

2.4.3 Устройство и принцип работы индукционных измерительных механизмов

На рисунке 2.18 изображено конструктивное исполнение двухпоточного индукционного ИМ.

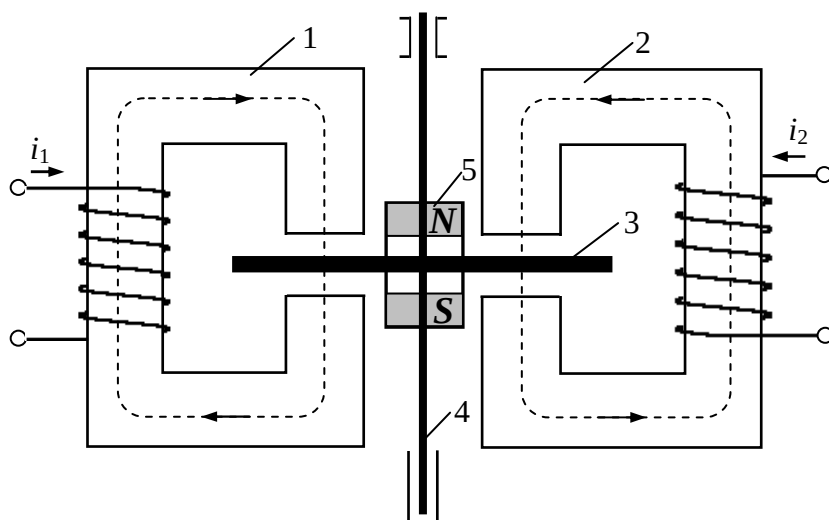


Рисунок 2.18 — Конструктивное исполнение двухпоточного индукционного ИМ

индукционного ИМ. Индукционный ИМ, входящий в состав индукционного прибора, состоит из одного или нескольких неподвижных электромагнитов и подвижной части, которая выполняется в виде алюминиевого диска, укрепленного на оси. Противодействующий момент в вольтметрах, амперметрах и ваттметрах создается спиральной пружи-

ной или растяжками (на рисунке не показаны). Индукционный ИМ, схема которого изображена на рисунке 2.18, содержит: магнитопроводы 1 и 2 с катушками, алюминиевый диск 3, размещенный на оси вращения 4, подковообразный постоянный магнит 5, предназначенный для успокоения подвижной системы ИМ [21].

Принцип работы индукционного ИМ следующий. При протекании переменных токов i_1 и i_2 по обмоткам электромагнитов в сердечниках 1 и 2 возбуждаются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , сдвинутые один относительно другого по фазе на угол ψ . Переменные магнитные потоки, направленные перпендикулярно плоскости диска, пронизывают алюминиевый диск 3 и наводят в последнем вихревые токи i_{B1} и i_{B2} [21].

На рисунке 2.19 изображено образование, в виде окружностей, вихревых токов i_{B1} и i_{B2} в диске ИМ. В результате взаимодействий вихревого тока i_{B1} с магнитным потоком Φ_2 и тока i_{B2} с магнитным потоком Φ_1 возникает результирующий вращающий момент $M_{вр}$, под влиянием которого происходит поворот подвижной части прибора.

Индуктивное сопротивление диска мало по сравнению с его активным сопротивлением. Вращающие моменты от взаимодействия потока Φ_1 и тока i_{B2} , а также потока Φ_2 и тока i_{B1} будут практически равны, но отличаться по знаку [21]:

$$M_{вр1} = -c_1 \Phi_1 I_{B2} \sin \psi; M_{вр2} = c_2 \Phi_2 I_{B1} \sin \psi,$$

где I_{B1} и I_{B2} — действующие значения токов i_{B1} и i_{B2} соответственно; c_1 и c_2 — постоянные величины для данного прибора, зависящие от конструкции электромагнитов и диска, числа витков катушек, материала обмоток и т.д. Моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$ действуют в одну сторону на подвижную часть механизма. Разные знаки у моментов указывают на то, что один контур тока втягивается в поле, а другой — выталкивается из соответствующего поля. Результирующий момент будет определяться через сумму вращающих моментов [21]:

$$M_{вр} = M_{вр2} + (-M_{вр1}) = (c_2 \Phi_2 I_{B1} + c_1 \Phi_1 I_{B2}) \sin \psi = (c_2 c_3 f \Phi_2 \Phi_1 + c_1 c_4 f \Phi_1 \Phi_2) \sin \psi$$

или

$$M_{вр} = c_5 \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi,$$

где $c_5 = (c_2 c_3 + c_1 c_4) f$; f — частота изменения потоков; ψ — угол сдвига фаз между потоками Φ_1 и Φ_2 .

По последнему выражению можно сделать следующие выводы:

- для создания вращающего момента необходимо иметь не менее двух переменных магнитных потоков или двух составляющих одного потока, сдвинутых по фазе и смещенных в пространстве;
- вращающий момент зависит от частоты;
- для получения наибольшего значения вращающего момента угол сдвига между потоками следует сделать равным 90° .

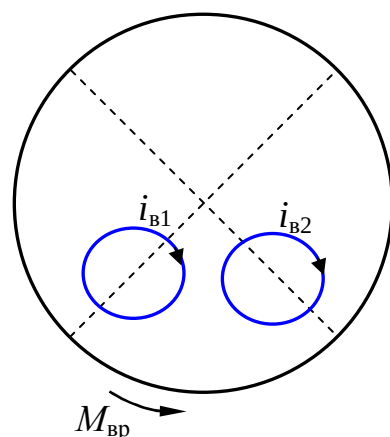


Рисунок 2.19 — Образование вихревых токов I_{B1} и I_{B2} в диске ИМ

Индукционные ИМ, так же как и электродинамические ИМ, могут быть использованы в схемах амперметров и вольтметров. При этом, катушки электромагнитов включаются в этих случаях так же, как и катушки электродинамического прибора.

В вольтметрах и амперметрах с индукционным ИМ средний вращающий момент будет пропорционален произведению действующих значений токов I_1 и I_2 , протекающих по катушкам электромагнитов, и, соответственно угол поворота стрелки α будет определяться этими величинами. В ваттметрах ток I_1 пропорционален току I в цепи, а ток I_2 — напряжению U , а угол $\psi=90^\circ - \varphi$ (φ — угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи).

Для того, чтобы прибор реагировал на активную мощность, необходимо выполнить условие:

$$\sin \psi = \cos \varphi.$$

При выполнении условия, что поток $\Phi_1=c_6I$ — магнитный поток, созданный обмоткой тока, а $\Phi_2=c_7U$ — часть магнитного потока, созданного обмоткой напряжения и проходящего через диск счетчика, вращающий момент будет пропорционален активной мощности нагрузки [22]:

$$M_{\text{вр}} = c_5 c_6 c_7 U I \cos \varphi = c_8 P,$$

где $c_8 = c_5 c_6 c_7$.

В свою очередь, противодействующий момент, создаваемый тормозным магнитом 5, пропорционален скорости вращения диска [22]:

$$M_{\text{пр}} = c_9 \frac{d\alpha}{dt}.$$

В установившемся режиме, когда $M_{\text{вр}}=M_{\text{пр}}$, диск ИМ вращается с постоянной скоростью. Приравняв два последних уравнения, получим уравнение относительно угла поворота диска [22]:

$$\alpha = \frac{c_8}{c_9} \int_0^t P dt = c_{10} W,$$

где W — энергия; $c_{10} = c_8/c_9$.

Таким образом, угол поворота диска счетчика пропорционален активной энергии. Следовательно, число оборотов диска n тоже пропорционально активной энергии.

Конструкция счетчика электрической энергии на базе индукционного ИМ рассмотрена в § 3.4.4.

2.4.4 Применение индукционных приборов

Индукционные ИМ нашли в основном применение в ваттметрах и счетчиках электрической энергии.

Достоинством индукционных приборов являются высокая стойкость к перегрузкам, большой вращающий момент и малая чувствительность к внешним магнитным полям. Еще одним важным достоинством индукционных ИМ является способность сохранять показания во время отключения питания.

К погрешностям индукционных приборов можно отнести следующие:

— погрешность, обусловленную трением: оси в опорах; в счетном механизме и подвижной части о воздух;

— погрешность из-за непропорциональности между токами и создаваемыми ими магнитными потоками, обусловленная нелинейностью характеристик материалов сердечников и потерь в них.

Для снижения погрешности от трения в индукционных приборах создается дополнительный компенсационный момент.

К недостаткам индукционных приборов можно отнести сравнительно невысокую точность и зависимость показаний от температуры и частоты переменного тока. Полностью усовершенствовать индукционный прибор не позволяет его конструкция, поэтому старые модели индукционных электросчетчиков не всегда в состоянии обеспечить точный и достоверный учет электроэнергии. Класс точности многих индукционных электросчетчиков равен 2,0 (2,5). В тоже время электронные электросчетчики обеспечивают достоверный и оперативный учет за счет более высокого класса точности 1,0 (2,0).

2.4.5 Контрольные вопросы

1. Каково устройство электростатического ИМ?
2. В чем заключается принцип работы электростатического ИМ?
3. Какие преимущества и недостатки свойственны электростатическим приборам?
4. Где нашли применение электростатические приборы?
5. Каково устройство индукционного ИМ?
6. В чем заключается принцип работы индукционного ИМ?
7. Какие элементы индукционного ИМ создают вращающий момент?
8. Какие погрешности свойственны индукционным ИМ?
9. Какие достоинства и недостатки имеют индукционные приборы?
10. Где нашли применение индукционные приборы?

Часть 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

3.1 Измерение постоянных токов и напряжений аналоговыми приборами

3.1.1 Расширение пределов измерений амперметров и вольтметров в цепях постоянного тока

Амперметр — это прибор для измерения силы тока в амперах. В электрическую цепь **амперметр включается последовательно** с тем участком электрической цепи, силу тока в котором измеряют. Для того чтобы включение амперметра не оказывало влияния на работу электрических установок и прибор не создавал больших потерь энергии, амперметры выполняют с малым внутренним сопротивлением. Если амперметр подключить непосредственно к источнику, то через катушку прибора пойдет очень большой ток (так как сопротивление амперметра мало) и она сгорит.

Для расширения пределов измерений амперметров используются **шунты**.

Шунт — устройство, которое позволяет электрическому току протекать в обход какого-либо участка схемы.

Шунты делятся на внутренние (позволяющие измерять токи до 50 А) и наружные (для измерения токов более 50 А).

Шунты, применяемые только с градуированным механизмом, называются индивидуальными. В свою очередь, калиброванные шунты рассчитаны на номинальные токи и пригодны для любой измерительной системы.

Если прибор предназначен для постоянной работы с шунтом, то шкала его градуируется в значениях измеряемого тока с учетом коэффициента шунтирования. В этом случае никаких расчетов для определения тока выполнять не требуется.

При применении наружных (отдельных от приборов) шунтов на них указывают номинальный ток, на который они рассчитаны, а также номинальное напряжение на зажимах (калиброванные шунты). Согласно стандартам это напряжение может быть равно 45, 75, 100 и 150 мВ. Шунты подбирают к приборам так, чтобы при номинальном напряжении на зажимах шунта стрелка прибора отклонялась на всю шкалу. Следовательно, номинальные напряжения прибора и шунта должны быть одинаковыми. Индивидуальные шунты, предназначены для работы с определенным прибором.

Шунты делят на пять классов точности: 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5. Обозначение класса точности соответствует допустимой погрешности в процентах. Для того чтобы повышение температуры шунта при прохождении по нему тока не оказывало влияния на показания прибора, шунты изготавливают из материалов с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (константан, манганин, никелин и др.).

Для уменьшения влияния температуры на показания амперметра последовательно с катушкой прибора в некоторых случаях включают добавочный резистор.

Сопротивление шунта определяется по выражению [23]:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{пр}}}{n_A - 1},$$

где $n_A = I_x / I_{\text{пр}}$ — коэффициент шунтирования.

Различают шунты однопредельные и многопредельные. На рисунке 3.1 изображены схемы включения шунтов: а) — однопредельного, б) — многопредельного.

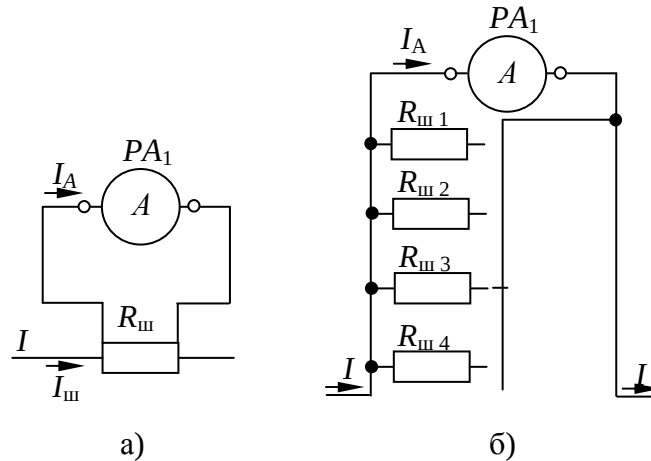


Рисунок 3.1 — Схемы включения шунтов:
а) — однопредельного, б) — многопредельного

Вольтметр — это измерительный прибор, предназначенный для измерения ЭДС или напряжения в электрических цепях. Прибор подключается параллельно нагрузке или источнику электрической энергии.

Для расширения пределов измерения вольтметров применяют **добавочные сопротивления**.

На рисунке 3.2 показана схема подключения добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ к вольтметру с внутренним сопротивлением $R_{\text{пр}}$. Сделаем расчет добавочного сопротивления. Учитывая, что $I_{\text{пр}} = I_{\text{доб}}$ получим [24]:

$$\frac{U_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}}} = \frac{U_{\text{доб}}}{R_{\text{доб}}}.$$

Откуда

$$R_{\text{доб}} = \frac{R_{\text{пр}} \cdot U_{\text{доб}}}{U_{\text{пр}}} = R_{\text{пр}} \cdot \frac{U_x - U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}}} = R_{\text{пр}} \cdot (m_V - 1),$$

где $m_V = \frac{U_x}{U_{\text{пр}}}$ — реостатирующий множитель.

Добавочный резистор может встраиваться в прибор и одновременно использоваться для уменьшения влияния температуры окружающей среды на показания прибора. Для этой цели резистор выполняется из материала, имеющего малый температурный коэффициент. По точности добавочные резисторы подразделяются на аналогичные классы точности, что и шунты.

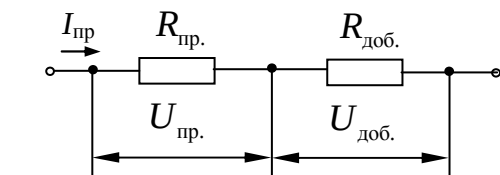


Рисунок 3.2 — Схема подключения добавочного сопротивления

На рисунке 3.3,а — 3.3,в изображены схемы делителей электрического напряжения. В качестве таких делителей, как показано на рисунке 3.3,а и 3.3,б, используются реостаты и резисторы с подвижным отводным контактом (движком), так называемые потенциометры. Самая простая схема преобразования напряжения — это схема с использованием резистора с подвижным движком (реостата) (рисунок 3.3,а и 3.3,б). На этом принципе работают делители напряжения, которые рассчитаны так, что позволяют на выходе снять величину, меньшую, чем входное напряжение в определенное число раз. Схема делителя напряжения, изображенная на рисунке 3.3,в, используется в комбинированных многопредельных магнитоэлектрических приборах.

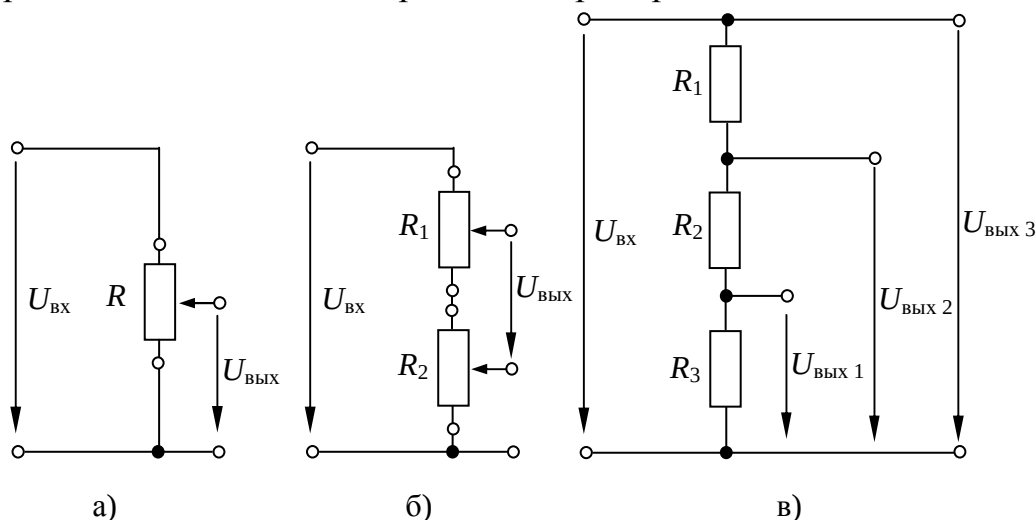


Рисунок 3.3 — Схемы делителей электрического напряжения

3.1.2 Измерение малых значений постоянных токов и напряжений

Для измерения малых значений постоянных токов можно использовать как прямые, так и косвенные методы измерений.

При проведении прямых измерений используют стрелочные магнитоэлектрические приборы. Наименьший ток, который можно измерить стрелочным магнитоэлектрическим прибором, составляет $\approx 10^{-10}$ А. Для повышения чувствительности в схему прибора включается усилитель постоянного тока. В целях точного измерения значений малых токов можно использовать также цифровые пикоамперметры. Приведенная погрешность таких приборов не превышает 0,5 %.

Для измерения токов порядка $\approx 10^{-8}$ А можно применять косвенный метод, заключающийся в измерении падения напряжения на образцовом резисторе при помощи потенциометра постоянного тока.

Измерение значений напряжений порядка $\approx 10^{-6} \dots 10^{-7}$ В можно осуществить с помощью нановольтметров, включающих фотогальванометрический усилитель, к выходу которого присоединен ИМ магнитоэлектрической системы. Класс точности таких приборов не хуже 1,5. Кроме нановольтметров, для измерения напряжений этого порядка используют: магнитоэлектрические гальванометры, потенциометры постоянного тока, цифровые микровольтметры и стрелочные магнитоэлектрические приборы в сочетании с усилителем.

Потенциометры постоянного тока и цифровые микровольтметры применяются для измерения напряжений, начиная от значений порядка ≈ 10 мкВ с приведенной

погрешностью 0,5 %. Микровольтметры, состоящие из электронного усилителя с подключенным к его выходу ИМ магнитоэлектрической системы, имеют приблизительно аналогичные характеристики по точности с потенциометрами, но обладают более высоким входным сопротивлением и несколько меньшей чувствительностью. Для измерения напряжений от 1 мВ чаще всего применяют милливольтметры магнитоэлектрической системы, имеющие класс точности не хуже 0,5.

3.1.3 Измерение средних значений постоянных токов и напряжений

К средним значениям токов условно относят токи в диапазоне от 10 мА до 50...100 А, а напряжений — в диапазоне от 10 мВ до 600 В.

Для измерения средних значений постоянных токов используют прямые и косвенные измерения, а для измерения напряжений — только прямые измерения. При прямых измерениях ток и напряжение измеряют приборами: магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем, а также электронными и цифровыми приборами. Кроме того, для измерений напряжения используют приборы электростатической системы и потенциометры постоянного тока. Рассмотрим применение приборов различных систем для измерения постоянных токов и напряжений.

Приборы электродинамической системы имеют диапазоны измеряемых токов от 10 мА до 100 А, а напряжений — от 100 мВ до 600 В. Точность этих приборов сравнима с точностью приборов магнитоэлектрической системы.

В качестве недостатков следует отметить, что эти приборы имеют значительную потребляемую мощность и неравномерную шкалу.

Вследствие низкой точности и большой потребляемой мощности, **приборы ферродинамической системы** для проведения измерений применяются реже.

Для измерения токов от 10 мА до 200 А, а напряжений — от 1 В до 75 В используют **приборы электромагнитной системы**. Приборы электромагнитной системы имеют низкую стоимость и классы точности не хуже 0,2.

При измерении напряжений, не превышающих значения 600 В, применяют **вольтметры электронной системы**. Одно из преимуществ этих приборов заключается в низком потреблении мощности. Лучшие электронные вольтметры постоянного тока имеют классы точности не хуже 0,5.

Приборами магнитоэлектрической системы можно измерять постоянные токи от 1 мкА до 6 кА, а напряжения — от 1 мВ до 1,5 кВ. В микро- и миллиамперметрах этой системы весь ток протекает через рамку ИМ. Как правило, этот ток, не превышает 20...50 мА. Поэтому, для расширения пределов измерения ИМ по току используют шунты, а по напряжению — добавочные резисторы. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы, обладая высокой точностью, имеют малое потребление мощности и равномерную шкалу. Наиболее точные приборы магнитоэлектрической системы, предназначенные для измерения средних токов и напряжений, имеют класс точности не хуже 0,1.

В тех случаях, когда необходимо измерить напряжение или ток с высокой точностью, следует использовать потенциометры постоянного тока, а также

цифровые вольтметры и амперметры. Потенциометры имеют классы точности не хуже 0,001, а цифровые вольтметры и амперметры — 0,002 и 0,02 соответственно. С помощью цифровых вольтметров можно измерять напряжение до нескольких тысяч вольт, а цифровых амперметров — ток до нескольких ампер.

Потенциометрами постоянного тока, при использовании делителей напряжения, можно измерять напряжение до 1000 В.

3.1.4 Измерение больших значений постоянных токов и напряжений

Для измерения постоянных токов до 6 кА можно использовать приборы магнитоэлектрической системы с шунтами.

На рисунке 3.4 изображен шунт марки В6 с номинальным током до 15 кА и падением напряжения 100 мВ. Шунты на большие токи имеют большие: вес, стоимость и мощность потерь. Вследствие этого, для измерения больших постоянных токов применяются трансформаторы постоянного тока, изготавливаемые на номинальные первичные токи от 7,5 до 70 кА при вторичном токе 5А [57].



Рисунок 3.4 — Шунт В6 с номинальным током до 15кА и падением напряжения 100 мВ

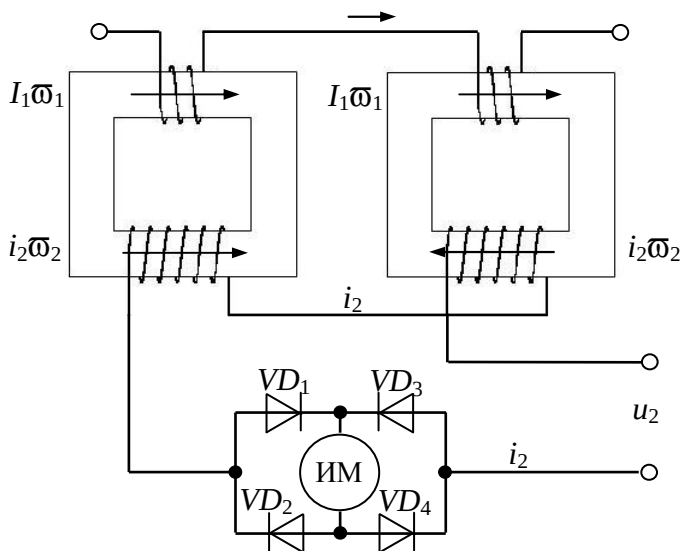


Рисунок 3.5 — Схема измерительного трансформатора постоянного тока

На рисунке 3.5 изображена схема измерительного трансформатора постоянного тока [57].

Трансформатор постоянного тока состоит из двух одинаковых замкнутых пермалловых сердечников, на каждом из которых находится по две обмотки.

По первичным обмоткам, соединенным последовательно, проходит измеряемый постоянный ток. Вторичные обмотки трансформатора тока, соединенные между собой последовательно (или параллельно), через мостовую схему выпрямителя $VD_1 — VD_4$ присоединены к источнику питания с переменным напряжением u_2 . В диагональ моста включен измерительный механизм ИМ. Общий принцип работы измерительного трансформатора постоянного тока следующий. В течение первого полупериода переменного тока i_2 магнитодвижущая сила во вторичной обмотке в первом сердечнике имеет встречное направление по отношению к магнитодвижущей силе

$I_1 \omega_1$ в первичной обмотке, а во втором сердечнике направления первичной и вторичной магнитодвижущих сил совпадают. В течение второго полупериода, в первом сердечнике направления магнитодвижущих сил совпадают, а во втором они будут иметь встречные направления.

На рисунке 3.6 изображены характеристики трансформатора тока. При наличии в первичной цепи трансформатора постоянного измеряемого тока, во вторичной цепи будет переменный ток с прямоугольной формой кривой, а в диагонали мостового выпрямителя с ИМ — постоянный ток. Зная измеренное значение тока, протекающего через вторичные обмотки и коэффициент трансформации, можно определить значение постоянного тока.

Для измерения напряжения в высоковольтных цепях постоянного тока в основном применяют следующие типы приборов:

- вольтметры магнитоэлектрической системы, изготавливаемые на номинальное напряжение до 6 кВ;
- вольтметры электростатической системы, изготавливаемые на номинальное напряжение до 6 кВ;
- измерительные трансформаторы напряжения постоянного тока.

На рисунке 3.7 изображена схема измерительного трансформатора напряжения постоянного тока. На этой схеме первичные обмотки, расположенные на магнитопроводе трансформатора, соединены последовательно с добавочным сопротивлением к измеряемому напряжению U_1 . Вторичные обмотки, соединенные параллельно, через выпрямитель присоединены к источнику питания с переменным напряжением u_2 [57].

ИМ включен в диагональ выпрямительного моста, состоящего из диодов $VD_1 — VD_4$.

Первичные обмотки трансформатора соединены последовательно. Через добавочное сопротивление R_d первичные обмотки подключаются к измеряемому напряжению. Вторичные обмотки сердечников трансформатора соединены па-

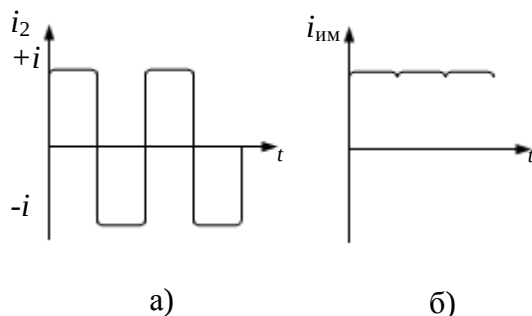


Рисунок 3.6 — Характеристики трансформатора тока:

а) — кривая тока во вторичной цепи;
б) — кривая тока в ИМ

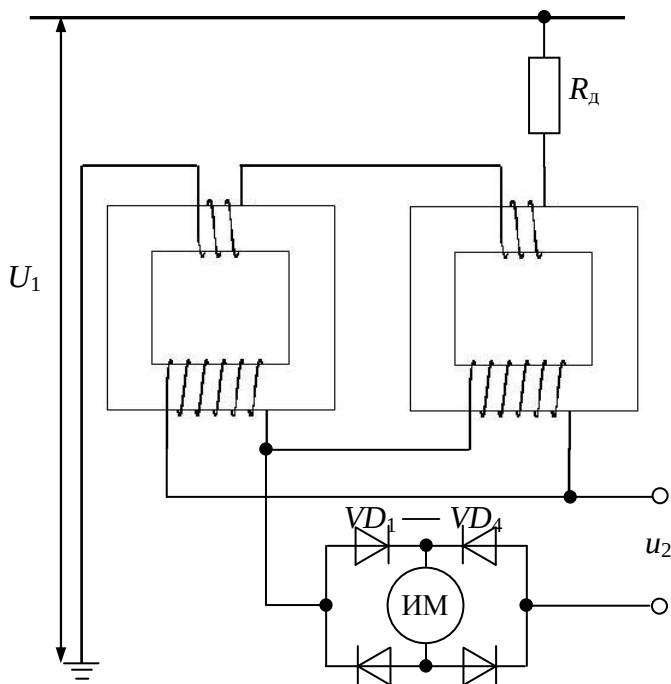


Рисунок 3.7 — Схема измерительного трансформатора напряжения постоянного тока

раллельно и встречно для взаимной компенсации в первичных обмотках индуктированных ЭДС, значения которых могут достигнуть значительной величины из-за большого числа витков первичных обмоток.

Погрешность трансформаторов напряжения постоянного тока, так же как и трансформаторы постоянного тока связана с погрешностью коэффициента трансформации, зависящая главным образом от характеристик материала сердечников.

3.1.5 Электронные вольтметры постоянного тока

Электронные вольтметры нашли широкое применение при проведении электрических измерений. Достоинствами электронных вольтметров являются: высокая чувствительность; широкий диапазон измеряемых напряжений и большое входное сопротивление (порядка $1 \dots 10$ МОм).

Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока изображена на рисунке 3.8. На этом рисунке введены следующие обозначения: ВД — входной делитель напряжения; УПТ — усилитель постоянного тока; ИМ — магнитоэлектрический измерительный механизм [25]. В этом приборе измеряемое напряжение U_x вначале подается на ВД, затем усиливается с помощью УПТ и подается на магнитоэлектрический ИМ, имеющий шкалу, проградуированную в единицах напряжения. Высокая чувствительность и многопредельность прибора достигаются за счет изменения в широких пределах коэффициента преобразования ВД ($k_{ВД}$) и коэффициента усиления УПТ ($k_{УПТ}$) электронного вольтметра.

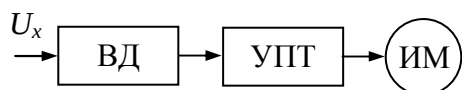


Рисунок 3.8 — Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока

напряжение U_x вначале подается на ВД, затем усиливается с помощью УПТ и подается на магнитоэлектрический ИМ, имеющий шкалу, проградуированную в единицах напряжения. Высокая

чувствительность и многопредельность прибора достигаются за счет изменения в широких пределах коэффициента преобразования ВД ($k_{ВД}$) и коэффициента усиления УПТ ($k_{УПТ}$) электронного вольтметра.

Угол отклонения указателя ИМ определяется по выражению [25]:

$$\alpha = k_{ВД} k_{УПТ} S_U U_x,$$

где S_U — чувствительность по напряжению измерительного механизма.

В целях повышения чувствительности вольтметров постоянного тока до уровня порядка $\approx 10^{-6}$ В, применяют схему вольтметра постоянного тока с УПТ, построенным по схеме модулятор — демодулятор, изображенную на рисунке 3.9. На этом рисунке введены следующие обозначения: М — модулятор; ДМ — демодулятор; Г — генератор; У — усилитель переменного тока.

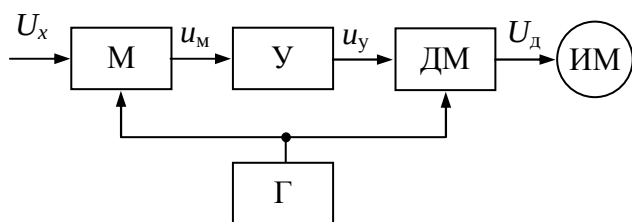


Рисунок 3.9 — Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока с УПТ, построенным по схеме модулятор — демодулятор

На рисунке 3.10 изображены временные диаграммы напряжений на выходе блоков электронного вольтметра постоянного тока с УПТ со схемой модулятор — демодулятор [25].

Рассмотрим принцип работы данной схемы.

Измеряемое постоянное напряжение с помощью модулятора,

управляемого генератором Г преобразуется в переменное напряжение прямоугольной формы, амплитуда которого пропорциональна измеряемому напряжению. Переменная составляющая этого сигнала усиливается усилителем У, а затем выпрямляется демодулятором, управляемым генератором Г. Демодулятор синхронизирован по фазе с сигналом на входе усилителя. Выпрямленное напряжение подается на магнитоэлектрический ИМ. Конвертирование постоянного напряжения в переменное позволяет устранить дрейф напряжения (дрейф нуля), характерный для усилителей постоянного тока при изменении температуры. С другой стороны, использование усилителя переменного напряжения позволяет достичь высокого и стабильного коэффициента усиления.

Среднее значение напряжения выходного сигнала пропорционально входному напряжению [25]:

$$U_{\text{д}} = k_{\text{у}} U_{\text{х}},$$

где $k_{\text{у}}$ — коэффициента усиления усилителя.

Для устойчивости работы, усилитель охвачен глубокой отрицательной обратной связью (ООС) (на схеме не показана). Изменение глубины ООС отражается на коэффициенте усиления усилителя. Переключение пределов измерения осуществляется за счет регулируемого ступенчатого делителя, собранного на резисторах в цепи обратной связи усилителя.

Основными источниками погрешности данных приборов являются:

- неравномерность шкалы;
- нестабильность канала преобразования;
- наличие собственных шумов.

3.1.6 Потенциометры постоянного тока

Потенциометры — это приборы, предназначенные для измерения методом сравнения: ЭДС, напряжений, токов, сопротивлений и других физических величин.

Основное достоинство потенциометра постоянного тока состоит в том, что с его помощью можно производить измерения с высокой точностью, не нагружая при этом объект измерения. Эти приборы не потребляют мощности от ис-

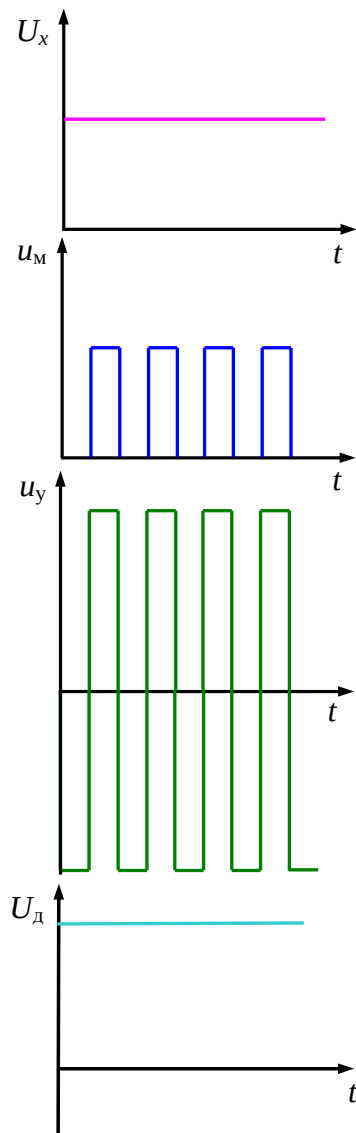


Рисунок 3.10 — Временные диаграммы напряжений на выходе блоков электронного вольтметра постоянного тока

точника измеряемой величины в момент компенсации, что позволяет измерять величину ЭДС. Если необходимо измерить высокие напряжения, то схему потенциометра дополняют делителем напряжения.

Потенциометры бывают с ручным и автоматическим уравниванием.

На рисунке 3.11 изображена схема потенциометра постоянного тока с ручным уравниванием. На этом рисунке введены обозначения: E_x — измеряемая ЭДС; E_n — нормальный элемент с точно известным значением ЭДС; U_n — вспомогательный источник напряжения; R_n — образцовый резистор, значение которого выбирается в зависимости от рабочего тока потенциометра; R — резистор с точно известным регулируемым сопротивлением; R_n — реостат; НИ — нуль-индикатор, в качестве которого может применяться магнитоэлектрический гальванометр.

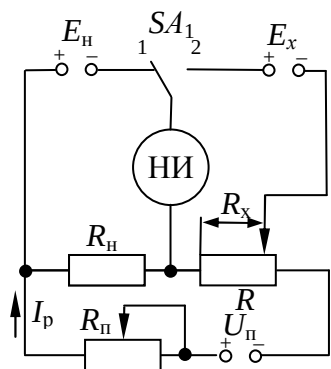


Рисунок 3.11 — Схема потенциометра постоянного тока

Рассмотрим принцип работы этого прибора при измерении E_x [26].

Процесс измерения проходит в два этапа. На первом этапе, поставив переключатель SA_1 в положение “1”, необходимо изменяя сопротивление резистора R_n

и добиваясь нулевых показаний НИ, а это будет выполнено при условии $I_p R_n = E_n$, установить значение рабочего тока $I_p = E_n / R_n$ [26].

На втором этапе, переведя SA_1 в положение “2” и, изменяя сопротивление резистора R_x , следует снова добиться равенства нулю показаний нуль-индикатора. Значение сопротивления R_x , при известном и ранее установленном рабочем токе, позволит определить значение искомой ЭДС $E_x = E_n R_x / R_n$.

Для удобства измерений удобно выбрать значение сопротивления R_n таким, чтобы отношение E_n / R_n было кратным числом в виде 10^{-n} , где n — целое (например, при $n=3$ $E_n / R_n = 10^{-3}$, тогда значение ЭДС можно рассчитать, как $E_x = 0,001 R_x$). Проградуировав сопротивление R_x в единицах напряжения, окончательно можно определить значение E_x .

Для измерения тока I_x с помощью потенциометра, в его цепь включают образцовый резистор R_n . Определив с помощью прибора падение напряжения $U_x = I_x R_n$, можно определить искомый ток I_x .

Точность потенциометров постоянного тока обусловлена высокой чувствительностью гальванометра, наличием прецизионных резисторов с разбросом номиналов не более 0,001 %, а также стабильностью вспомогательного источника питания U_n .

Классы точности потенциометров постоянного тока имеют диапазон от 0,0005 до 0,5. При использовании нормального элемента верхний предел измерения напряжения не превосходит 2,5 В.

Для увеличения верхнего предела измерений до десятков вольт, следует вместо нормального элемента использовать стабилизированный источник питания.

На рисунке 3.12, в качестве примера, изображен потенциометр постоянного тока типа ПП-63.

С помощью этого потенциометра компенсационным методом можно определить значения измеряемых напряжения и ЭДС. Если потенциометр применять совместно с дополнительными измерительными преобразователями, то с его помощью можно измерить: давление, температуру, ток, мощность и другие параметры.

Потенциометр ПП-63 позволяет получить плавно изменяемое точное напряжение [58].

Основные технические характеристики потенциометра постоянного тока ПП-63 следующие [58]:

- класс точности 0,05;
- пределы измерения, В: от 0 до 111,1;
- контур I: 10 ступеней по 10 мВ, 10 ступеней по 1 мВ;
- контур II: 10 ступеней по 0,1 мВ, 10 ступеней по 0,01 мВ.

Прибор нашел свое применение при проведении измерений в научных исследованиях, а также в поверочных лабораториях.



Рисунок 3.12 — Потенциометр постоянного тока ПП-63

3.1.7 Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы измерений постоянного тока и напряжения?
2. Каково устройство и назначение электронного вольтметра?
3. Для каких значений напряжений могут применяться электродинамические приборы?
4. С какой целью применяются шунты?
5. Для чего применяются добавочные сопротивления?
6. Как определяется сопротивление шунта?
7. Каким образом можно использовать резисторы для преобразования электрического напряжения?
8. Как рассчитать добавочное сопротивление?
9. Какие приборы следует применять для измерения средних и высоких значений напряжений?
10. Каково устройство и назначение потенциометра постоянного тока?

3.2 Измерение переменных токов и напряжений аналоговыми приборами

3.2.1 Параметры электрических сигналов

Синусоидальный, или гармонический ток, представляет ток, изменяющийся синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где I_m — наибольшее значение тока, или его амплитуда; ω — угловая частота; $(\omega t + \varphi)$ — фаза, а φ — начальная фаза. График синусоидально изменяющегося тока изображен на рисунке 3.13.

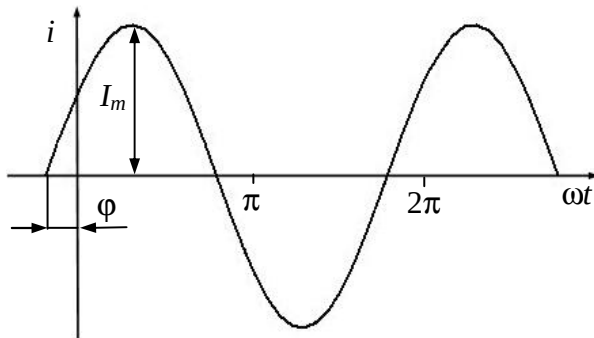


Рисунок 3.13 — График синусоидально изменяющегося тока

Под действующим (среднеквадратическим или эффективным) значением тока понимают [15]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

По аналогии можно записать выражение действующего значения напряжения, как:

$$U = 0,707 U_m,$$

где U_m — амплитуда напряжения.

Действующее значение тока измеряют приборами электродинамической, электромагнитной и тепловой систем.

Под средним значением синусоидально изменяющейся электрической величины понимают среднее ее значение за половину периода [1,27]:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2 I_m}{\pi} \cong 0,637 I_m.$$

По аналогии можно записать выражение среднего значения напряжения, как:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2 U_m}{\pi}.$$

В случае если проводят измерения периодических **несинусоидальных** токов или напряжений, в данные измерений необходимо ввести коэффициенты, учитывающие отличия законов изменения измеряемых величин от синусоидального закона.

Связь между амплитудным и действующим значениями измеряемой величины определяется через коэффициент амплитуды k_a по выражению [27]:

$$k_a = \frac{U_m}{U}.$$

Отношение действующего значения напряжения периодической изменяющейся электрической величины к среднему значению этой величины называется коэффициентом формы k_Φ [27]:

$$k_\Phi = \frac{U}{U_{\text{ср}}}.$$

Для синусоидально изменяющегося напряжения коэффициенты формы и амплитуды имеют значения $k_f=1,11$, а $k_a=1,41$ соответственно, поэтому, измерив одно из трех указанных выше значений напряжения, можно определить остальные.

В случае, если необходимо по показанию прибора, измеряющего действующее значение, определить среднее или амплитудное значений напряжения (тока), имеющих периодическую, часто встречающуюся несинусоидальную форму, значения коэффициентов k_f и k_a следует взять из электротехнического справочника.

В качестве примера, на рисунке 3.14 изображены графики периодического несинусоидального напряжения формы: а) — треугольной; б) — прямоугольной. Для кривой периодического напряжения треугольной формы коэффициенты формы и амплитуды соответственно равны $k_f=2/\sqrt{3}$ и $k_a=\sqrt{3}$, а для кривой периодического напряжения прямоугольной формы — $k_f=1$ и $k_a=1$ [28].

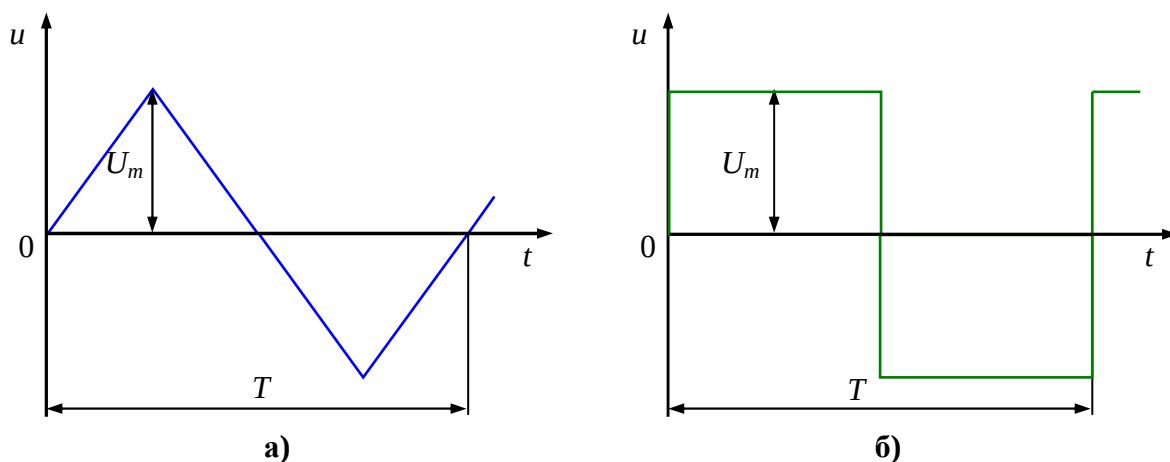


Рисунок 3.14 — Графики периодического несинусоидального напряжения формы: а) — треугольной; б) — прямоугольной

3.2.2 Способы измерения переменных токов и напряжений

Аналоговые вольтметры по структурной схеме могут быть разделены на вольтметры прямого преобразования и вольтметры сравнения. По элементной базе аналоговые вольтметры делятся на электронные и электромеханические.

В зависимости от типа измерительного преобразователя, аналоговые приборы могут реагировать на: действующее, средневыпрямленное или амплитудное значение измеряемой величины.

Приборы электродинамической, ферродинамической, электромагнитной и термоэлектрической систем реагируют на действующее значение измеряемой величины при синусоидальной форме тока.

Для измерения средних значений (по величине) токов и напряжений используют магнитоэлектрические приборы.

При измерении переменных токов до 10 мкА применяют электронные микроамперметры. Эти приборы состоят из усилителя переменного тока и миллиамперметра. Электронные микроамперметры имеют классы точности не хуже 1,5.

Для измерения переменных токов свыше 10 мкА используют цифровые микро-

амперметры, имеющие приведенную погрешность не более 0,5 % в диапазоне частот до 5 кГц.

Токи свыше 100 мкА измеряют миллиамперметрами выпрямительной системы, а также миллиамперметрами термоэлектрической системы с промежуточным усилителем постоянного тока, подключенным к выходу термоэлектрического преобразователя. Классы точности этих приборов составляют не хуже 1,0.

В целях измерения токов порядка более 1 мА используют ферродинамические миллиамперметры. Класс точности ферродинамических миллиамперметров может достигать значения 0,5.

Измерение малых переменных токов промышленной частоты, можно производить путем определения падения напряжения на образцовом резисторе при помощи вольтметра.

Для точного измерения напряжения можно применять потенциометры переменного тока или цифровые вольтметры переменного тока.

Измерение напряжений на уровне микровольт производят аналоговыми электронными милливольтметрами, имеющими приведенную погрешность не хуже 4 %.

Существенно более высокую точность, но меньшую чувствительность, имеют потенциометры переменного тока и цифровые вольтметры. С помощью потенциометров переменного тока можно измерять напряжения от 1,0 мВ с погрешностью порядка десятых долей процента.

В тех случаях, когда необходима высокая точность измерения, применяют приборы электродинамической системы.

Цифровые электронные милливольтметры, имеющие приведенную погрешность не хуже 0,1 %, позволяют измерять напряжения, начиная с 10 мВ. С увеличением измеряемой величины точность приборов возрастает.

Для измерения больших токов и напряжений используют те же приборы, что и для измерения средних значений токов и напряжений, но амперметры включают через измерительные трансформаторы тока, а вольтметры — через измерительные трансформаторы напряжения.

Измерительные трансформаторы служат для преобразования значений больших токов и напряжений в такие значения, которые могут быть непосредственно измерены приборами переменного тока.

Кроме того, при помощи трансформаторов измерительные приборы изолируются от первичной цепи, которая часто находится под высоким напряжением.

Применение измерительных трансформаторов напряжения устраняет опасность для обслуживающего персонала при работе с измерительными приборами, присоединенными непосредственно к проводам высокого напряжения.

Измерения больших переменных токов, производятся, как правило, амперметрами: электромагнитной; ферродинамической и электродинамической систем, включаемых через измерительные трансформаторы тока, изготавливаемые на номинальные первичные токи до 25 кА. При этом следует учесть, что включение амперметров непосредственно в рассечку проводов или шин (без трансформаторов тока) при напряжениях в цепи выше 500 В должно быть выполнено так, чтобы обеспечивались **безопасность для обслуживающего персонала** и удобство наблюдения за показаниями прибора.

3.2.3 Схемы трансформаторных преобразователей напряжения

Для преобразования одного значения переменного напряжения в другое используются автотрансформаторы и измерительные трансформаторы напряжения. На рисунке 3.15,а и 3.15,б изображены схемы трансформаторных преобразователей напряжения. Автотрансформаторы имеют одну обмотку, расположенную на магнитопроводе. Все витки этой обмотки являются витками первичной обмотки автотрансформатора и рассчитаны на определенное первичное напряжение (в лабораторных автотрансформаторах обычно на 220 В). Часть витков этой обмотки, отделяемая при помощи движка, является одновременно витками вторичной обмотки автотрансформатора.

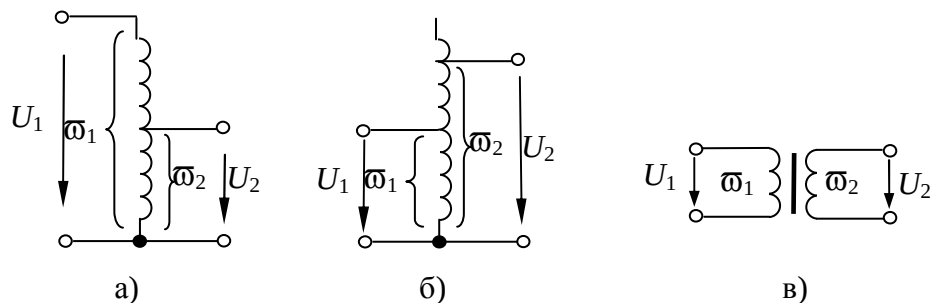


Рисунок 3.15 — Схемы трансформаторных преобразователей напряжения:
а, б — автотрансформатора; в — трансформатора напряжения

Если плавно изменять число витков во вторичной обмотке при помощи движка, то на выходе трансформатора можно изменять напряжение от нуля до значения меньше входного (рисунок 3.15,а), или от нуля до значения большего, чем входное (рисунок 3.15,б). Недостатком автотрансформаторов является наличие гальванической связи между источником и нагрузкой.

На рисунке 3.15,в изображен трансформатор напряжения. Трансформатор напряжения состоит из магнитопровода, на котором укреплены 2 катушки. Значение выходного напряжения определяется величиной коэффициента трансформации. Если трансформатор является понижающим входное напряжение, то количество витков первичной обмотки ϖ_1 больше числа витков вторичной обмотки ϖ_2 .

3.2.4 Измерительные трансформатора тока

Измерительные трансформаторы, предназначенные для проведения измерений, применяют для расширения пределов измерения измерительных приборов и для электрической изоляции цепей измерительных приборов.

Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

По назначению измерительные трансформаторы применяют как измерительные трансформаторы для проведения измерений и, как измерительные трансформаторы для защиты.

К трансформаторам тока предъявляют высокие требования по точности. Как правило, трансформатор тока выполняют с двумя и более группами вторичных обмоток, при этом одна обмотка используется для подключения устройств защиты, а другая, более точная обмотка — для подключения средств

учёта (например, электрических счётчиков) и измерения.

Измерительные трансформаторы используют принципы преобразования тока в ток, тока в напряжение (например, магнитные трансформаторы тока), а также тока в неэлектрическую величину (например, в световой поток).

В настоящее время измерительная информация с измерительных трансформаторов может представляться как в аналоговом, так и в цифровом виде.

По роду установки измерительные трансформаторы могут быть предназначены для работы:

- на открытом воздухе;
- в закрытых помещениях;
- в полости электрооборудования;
- в специальных установках.

По способу установки различают следующие типы измерительных трансформаторов:

- проходные измерительные трансформаторы, устанавливаемые в проемах стен, потолков или в металлических конструкциях;
- опорные, предназначенные для установки на опорной плоскости;
- встраиваемые измерительные трансформаторы, устанавливаемые в полости электрооборудования.

Измерительные трансформаторы изготавливаются с одним коэффициентом трансформации или с несколькими. В последнем случае изменение коэффициента трансформации достигается изменением числа витков первичной или вторичной обмоток, или обеих обмоток, а также применением нескольких вторичных обмоток с различным числом витков, соответствующим различному номинальному вторичному току.

По числу ступеней трансформации различают одноступенчатые и многоступенчатые измерительные трансформаторы. На рисунке 3.16 изображена схема измерительного трансформатора тока, а на рисунке 3.17 – схема включения измерительного трансформатора тока в сеть.

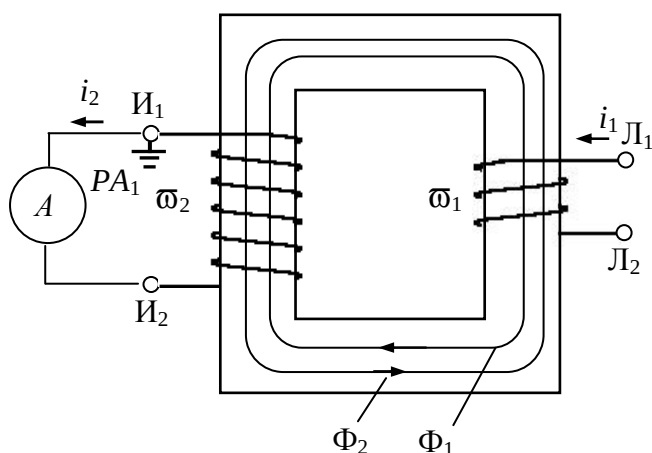


Рисунок 3.16 — Схема измерительного трансформатора тока

Измерительный трансформатор тока состоит из стержневого или кольцевого магнитопровода, набранного из тонких изолированных листов высокосортной трансформаторной стали. На одном стержне магнитопровода намотана первичная обмотка, выполненная из толстого провода с малым числом витков ϖ_1 . В свою очередь, на другом стержне магнитопровода намотана вторичная обмотка, имеющая число витков ϖ_2 большим числа витков

первичной обмотки ϖ_1 . Число витков вторичной обмотки выбирается таким образом, чтобы можно было к ней подключить стандартный амперметр с пределом шкалы тока 5 А.

Принцип работы трансформатора тока следующий. При прохождении по первичной обмотке тока i_1 в последней создается намагничивающая сила $I_1 \varpi_1$, где I_1 — действующее значение тока i_1 . Эта намагничивающая сила вызывает в сердечнике появление переменного магнитного потока Φ_1 .

Поток Φ_1 , пронизывая витки вторичной обмотки, наводит в ней ЭДС E_2 , и приводит к появлению тока i_2 (если подключен прибор).

Ток i_2 , в свою очередь, создает намагничивающую силу $I_2 \varpi_2$ и свой магнитный поток Φ_2 . Так как, согласно закону Ленца этот поток направлен навстречу потоку Φ_1 , результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора будет небольшой. Поэтому во вторичной обмотке наводится небольшая ЭДС, вызывающая появление сравнительно небольшого вторичного тока i_2 практически при замкнутой накоротко вторичной обмотке. Таким образом, трансформатор тока нормально работает в режиме короткого замыкания и не допускает работы вхолостую.

При работе с измерительными трансформаторами тока необходимо следить за тем, чтобы вторичная обмотка не оставалась разомкнутой, при подключенной первичной. Причина этого заключается в том, что при размыкании вторичной цепи, например, при отключении амперметра, исчезает встречный магнитный поток Φ_2 . В результате по сердечнику начинает проходить большой переменный поток Φ_1 , вызывающий вследствие большого числа витков во вторичной обмотке трансформатора наведение ЭДС больших значений (порядка до тысячи вольт). Наличие этой ЭДС является во-первых, опасным для обслуживающего персонала, а во-вторых может привести к пробой изоляции вторичной обмотки. Пробой изоляции вызывается возникновением большого потока Φ_1 в сердечнике, вследствие наведения больших вихревых токов, приводящих к сильному его нагреву и, в конечном итоге выходу из строя изоляция обмоток трансформатора.

Для качественного проведения измерений с измерительным трансформатором тока, при отключении измерительного прибора, необходимо сначала замкнуть вторичную, либо первичную обмотку трансформатора. Амперметры, предназначенные для постоянной работы совместно с трансформаторами тока, градуируют на заводе с учетом коэффициента трансформации, и значения измеряемого тока i_1 могут быть непосредственно отсчитаны по шкале прибора.

Для предотвращения опасности поражения обслуживающего персонала электрическим током в случае повреждения изоляции трансформатора один из зажимов вторичной обмотки и кожух трансформатора необходимо заземлить.

Измерительные трансформаторы тока по выполнению первичной обмотки различают одновитковые и многovitковые.

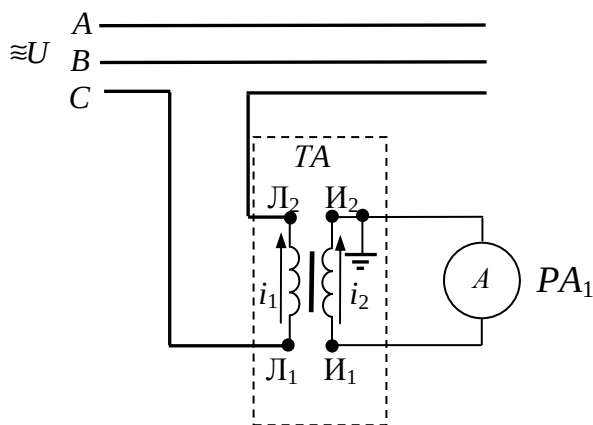


Рисунок 3.17 — Схема включения измерительного трансформатора тока в сеть

Одновитковые измерительные трансформаторы тока могут иметь и не иметь собственную первичную обмотку. В последнем случае одновитковые измерительные трансформаторы выполняются: встроенными, шинными или разъемными.

Встроенный измерительный трансформатор тока представляет собой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой. Роль первичной обмотки выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. Этот измерительный трансформатор тока не имеет изоляционных элементов между первичной и вторичной обмотками. Их роль выполняет изоляция проходного изолятора.

В шинном измерительном трансформаторе тока роль первичной обмотки выполняют одна или несколько шин распределительного устройства, пропускаемых при монтаже оборудования через полость проходного изолятора, изолирующего первичную обмотку от вторичной.

На рисунке 3.18 изображена схема шинного трансформатора тока марки ТШЛ-СЭЩ 0,66 кВ, предназначенного для передачи сигнала измерительной информации приборам измерения, защиты автоматики, сигнализации и управ-

ления в электрических цепях переменного тока на напряжение до 0,66 кВ частотой 50 Гц [59]. Трансформатор устанавливается в комплектные распределительные устройства.



Рисунок 3.18 — Шинный трансформатор тока марки ТШЛ-СЭЩ 0,66 кВ

Магнитопровод разъемного измерительного трансформатора состоит из двух частей, стягиваемых болтами. Он может размыкаться и смыкаться вокруг проводника с током, являющимся первичной обмоткой этого измерительного трансформатора. Одновитковые измерительные трансформаторы тока, имеющие собственную первичную обмотку, выполняются со стержневой первичной обмоткой или с U-образной.

В свою очередь, многовитковые измерительные трансформаторы тока изготавливаются: с петлевой первичной обмоткой; с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод; со звеньевой первичной обмоткой, распределенной между первичной и вторичной обмотками и с рымовидной первичной обмоткой, выполненной таким образом, что внутренняя изоляция трансформатора тока нанесена в основном только на первичную обмотку, имеющую форму рыма.

На рисунке 3.19 изображена схема проходного измерительного трансформатора тока марки ТПОЛ-10М. В этом трансформаторе магнитопровод и вторичная обмотка смонтированы на проходном изоляторе, а роль первичной обмотки трансформатора выполняет металлический стержень, проходящий внутри изолятора. Трансформаторы предназначены для встраивания в распределительные устройства и токопроводы.

Трансформаторы этого типа предназначены для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам, устройствам защиты и управления, а также для изолирования цепей вторичных соединений от высокого на-

пряжения в электрических установках переменного тока частоты 50 Гц на класс напряжений до 10 кВ и номинальный первичный ток до 3 кА [60].

При включении приборов посредством измерительных трансформаторов возникают погрешности двух видов: погрешность в коэффициенте трансформации и погрешность, связанная с отклонением угла сдвига фаз между первичным и вторичным напряжениями. При увеличении нагрузки трансформатора эти погрешности возрастают свыше номинальных.

К основным характеристикам измерительного трансформатора тока относят следующие.

1. Номинальное напряжение, под которым понимают действующее значение линейного напряжения, при котором должен работать измерительный трансформатор тока. Существует следующая шкала номинальных напряжений, (кВ): 0,66, 6, 10, 15, 20, 24, 27, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150.

2. Номинальное действующее значение первичного тока $I_{1н}$. Для измерительных трансформаторов тока принята шкала номинальных первичных токов от 1 до 40000 ампер.

3. Номинальное действующее значение вторичного тока $I_{2н}$, под которым понимают ток, проходящий по вторичной обмотке. Значение номинального вторичного тока принимается равным 1 или 5 А, причем ток 1 А допускается только для измерительных трансформаторов тока с номинальным первичным током до 4 кА.

4. Номинальный коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока, определяемый следующим образом [29]:

$$K_{In} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}}.$$

6. Класс точности. Измерительные трансформаторы тока разделены на пять классов точности: 0,2, 0,5, 1, 3, 10.

Наименование класса точности соответствует предельной токовой погрешности трансформатора тока при первичном токе, равном 1...1,2 номинального. Для присоединения щитовых измерительных приборов используют измерительные трансформаторы тока классов 1 и 3, для присоединения счетчиков электрической энергии — трансформаторы тока класса 0,5, а для проведения лабораторных измерений — трансформаторы тока класса 0,2.



Рисунок 3.19 — Проходной измерительный трансформатор тока типа ТПОЛ-10М

3.2.5 Измерительные трансформаторы напряжения

Применение измерительных трансформаторов напряжения позволяет расширить пределы измерения напряжений и использовать стандартные измерительные приборы для измерения высоких напряжений и стандартные реле,

предназначенные для защиты. Кроме того, трансформатор напряжения изолирует измерительные приборы и реле защиты от высокого напряжения, обеспечивая безопасность обслуживающего персонала.

Первичная обмотка измерительного трансформатора напряжения имеет, как правило, большее количество витков. Число витков рассчитывают так, чтобы при номинальном первичном напряжении на зажимах вторичной обмотки можно было получить номинальное напряжение: 380, 500, 6000, 10000 В. Вторичная обмотка имеет малое количество витков, которое рассчитывают так, чтобы при номинальном первичном напряжении на зажимах вторичной обмотки можно было получить вторичное напряжение, равное верхнему пределу шкалы стандартных вольтметров, измеряющих напряжения, как правило, 100...600 В. Таким образом, измерительный трансформатор напряжения понижает напряжение, подаваемое с первичной обмотки, в определенное число раз.

Промышленность выпускает стационарные трансформаторы напряжения классов точности: 0,2, 0,5, 1,0. Лабораторные трансформаторы напряжения выпускаются классов точности: 0,05, 0,1, 0,2 [33].

Стационарные трансформаторы изготавливают одно и трехфазные на номинальные первичные напряжения до 100 кВ при вторичном напряжении: 150 В, 100 В и 173 В [33].

Конструкция измерительного трансформатора напряжения состоит из стального сердечника, набранного из пластин листовой электротехнической стали, первичной обмотки и одной или двух вторичных обмоток.

На рисунке 3.20 изображена схема трансформатора напряжения с одной вторичной обмоткой. На этой схеме на первичную обмотку подается высокое напряжение u_1 , а на напряжение вторичной обмотки u_2 подключен вольтметр. Начала первичной и вторичной обмоток обозначены буквами A и a , концы — X и x , соответственно [33].

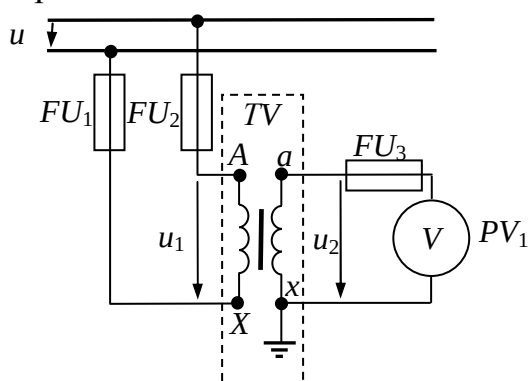


Рисунок 3.20 — Схема измерительного трансформатора напряжения

Напряжение u_1 , а на напряжение вторичной обмотки u_2 подключен вольтметр. Начала первичной и вторичной обмоток обозначены буквами A и a , концы — X и x , соответственно [33].

Отношение первичного номинального напряжения к вторичному номинальному напряжению называется номинальным коэффициентом трансформации трансформатора напряжения [33]:

$$K_{УН} = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}},$$

где $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$ — действующие значения напряжений u_1 и u_2 соответственно.

Измерительные трансформаторы напряжения подразделяются по числу фаз на однофазные и трехфазные.

По способу охлаждения измерительные трансформаторы делятся на масляные и сухие.

Измерительные трансформаторы напряжения изготавливают для наружной и внутренней установки.

Измерительные трансформаторы напряжения, предназначенные для внутренней установки и измерения однофазного напряжения 6 — 10 кВ выпускают

в основном с изоляцией, залитой эпоксидной смолой. Обмотки измерительных трансформаторов напряжения, предназначенные для наружной установки и измерения напряжений выше 6 — 10 кВ помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом.

На рисунке 3.21 изображен измерительный однофазный трансформатор напряжения типа НОЛ.12–0.38. Трансформатор рассчитан на номинальное напряжение первичной обмотки, 380 В, а вторичной — 127 В. При этом, при номинальной мощности 30 В·А, класс точности трансформатора составляет 1,0. Трансформатору соответствует схема и группа соединения обмоток 1/1-0. Трансформатор напряжения типа НОЛ.12-0.38 предназначен для применения в судовых электроустановках переменного тока частоты 50 Гц для питания электротехнических измерительных приборов и защитных устройств, а также питания цепей автоматики, сигнализации и управления.



Рисунок 3.21 — Измерительный однофазный трансформатор напряжения типа НОЛ.12–0.38

Трансформаторы этого типа изготавливаются в климатическом исполнении «ОМ» категории размещения 3 по ГОСТ 15150 и предназначены для эксплуатации при температуре окружающего воздуха от – 40 °С до + 45 °С [61].

По числу обмоток измерительные трансформаторы напряжения делятся на двухобмоточные и трехобмоточные.

Измерительные трансформаторы напряжения изготавливают только, как понижающие с классами точности 0,2, 0,5, 1 и 3, указывающими предельно допустимую погрешность в процентах, которую вносит трансформатор в номинальное значение коэффициента трансформации.

В целях компенсации погрешности по напряжению в конструкции трансформатора делают некоторое уменьшение числа витков первичной обмотки, а также компенсацию погрешности за счет специальных компенсирующих обмоток.

Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения измерительных трансформаторов напряжения соответствуют стандартным напряжениям электрических сетей (кВ): 0,38, 0,66, 3, 6, 10, 20, 35, 110 и т.д. Номинальные напряжения обмоток низшего напряжения выбирают равными следующим значениям: 100; $100/\sqrt{3}$ или $100/3$ В. Обозначения измерительных трансформаторов напряжения состоят из следующих букв и цифр: Н — напряжение; О — однофазный; Т — трехфазный; М — масляный; С — сухой; К — каскадный или с компенсационной обмоткой; З — с заземленным вводом высшего напряжения; И — с обмоткой для контроля изоляции; Ф — в фарфоровом корпусе; первая цифра после букв обозначает напряжение, а вторая — год разработки [61].

На щитках трансформатора дробью указывают: в числителе — мощность, кВА; в знаменателе — напряжение, кВ. Например, обозначение ЗНОМ-20 озна-

чает, что это однофазный, масляной трансформатор напряжения с заземленным вводом высшего напряжения и предназначен для работы в сетях до 20 кВ.

На рисунке 3.22,а изображена схема измерения междофазных напряжений с применением: а) — трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения с обмотками, соединенными в звезду; б) — двух однофазных двухобмоточных трансформаторов, соединенных по схеме открытого треугольника.

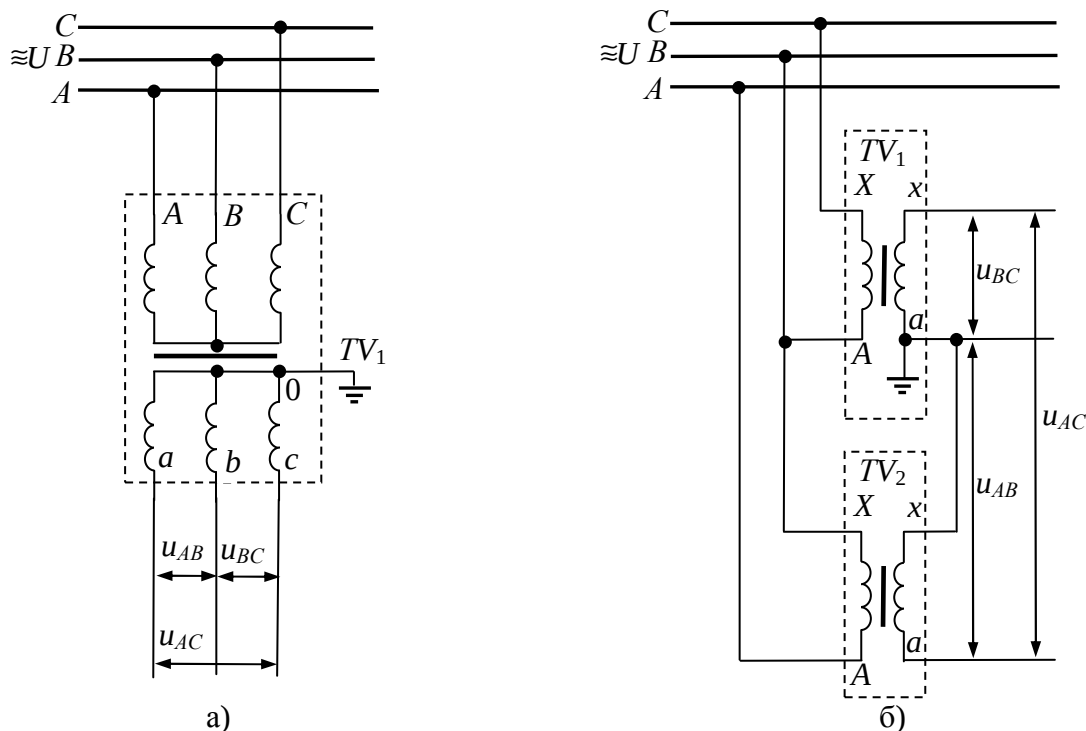


Рисунок 3.22 — Схема измерения междофазных напряжений с применением:
 а) — трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения с обмотками, соединенными в звезду;
 б) — двух однофазных двухобмоточных трансформаторов, соединенных по схеме открытого треугольника

3.2.6 Вольтметры прямого преобразования и сравнения

Обобщенная структурная схема вольтметра прямого преобразования показана на рисунке 3.23. Измеряемое напряжение подается на входное устройство

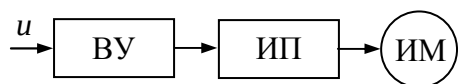


Рисунок 3.23 — Структурная схема вольтметра прямого преобразования

(ВУ). С выхода ВУ сигнал поступает на измерительный преобразователь (ИП), выполняющий функцию преобразователя переменного напряжения в постоянное напряжение и, далее, на измерительный механизм (ИМ). В качестве входного

устройства используются делители и трансформаторы напряжения, а измерительного механизма — магнитоэлектрические ИМ.

Наряду с вольтметрами прямого преобразования, применяются **вольтметры сравнения** (компенсационные вольтметры).

На рисунке 3.24 изображена структурная схема компенсационного вольтметра, состоящего из входного устройства ВУ, компенсационного преобразователя и вольтметра постоянного напряжения В [34].

В свою очередь, компенсационный преобразователь, состоит из: диода VD с нагрузкой R ; усилителя Y ; индикатора $И$ с двумя устойчивыми состояниями и регулируемого источника постоянного компенсирующего напряжения U_k .

Принцип работы компенсационного вольтметра изображен на рисунке 3.25. Принимая ВАХ диода VD идеализированной, можно считать, что при значении измеряемого напряжения $u_x=0$ ток через диод не протекает. При отсутствии измеряемого напряжения индикатор $И$ находится в первом устойчивом состоянии.

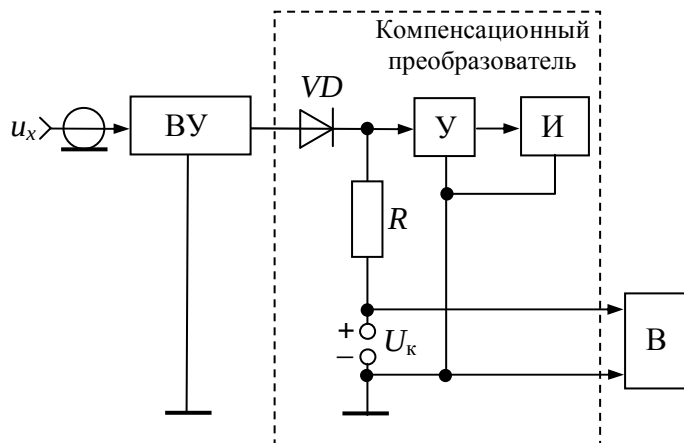


Рисунок 3.24 — Структурная схема компенсационного вольтметра

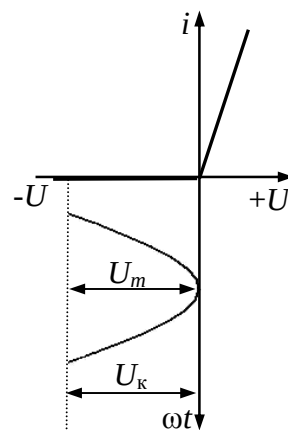


Рисунок 3.25 — Принцип работы компенсационного вольтметра

При подключении переменного напряжения $u_x = U_m \sin \omega t$ и подаче отрицательного напряжения смещения (компенсационного) U_k , величину напряжения U_k постепенно увеличивают до тех пор, пока индикатор не перейдет во второе устойчивое состояние, при этом ток через диод исчезнет.

Значение напряжения U_k , соответствующее моменту перехода, измеряется вольтметром постоянного тока и является мерой поданного измеряемого напряжения $U_m = U_k$.

3.2.7 Аналоговые электронные вольтметры

Электронным называется прибор, имеющий в своем составе источник питания. Рассмотрим классификацию и характеристики электронных вольтметров.

Электронные вольтметры различаются по:

- назначению: постоянного и переменного тока, импульсные, фазочувствительные, селективные, универсальные;
- типу отсчетного устройства: аналоговые (возможность контроля постоянства, более высокая скорость считывания показаний) и цифровые (высокой точностью);
- методу измерения: прямого сравнения с мерой и компенсационного;
- измеряемым параметрам напряжения: амплитудные, среднеквадратические значения;
- частотному диапазону: низкочастотные; высокочастотные и широкодиапазонные.

При измерении напряжений переменного тока находят значение какого-либо его параметра:

- пиковое;
- среднее (постоянная составляющая);
- среднее выпрямленное;
- среднее квадратическое.

Чаще всего в электротехнике напряжение измеряют аналоговыми (стрелочными) или цифровыми электронными вольтметрами.

К достоинствам электронных вольтметров следует отнести следующее:

- высокая чувствительность;
- большое входное сопротивление и малая входная ёмкость;
- широкий диапазон частот;
- способность выдерживать перегрузки.

На рисунке 3.26 изображены структурные схемы электронных вольтметров переменного тока в зависимости от типа применяемого усилителя.

Принцип действия аналогового электронного вольтметра состоит в преобразовании переменного напряжения в постоянное, которое измеряется стрелочным электромеханическим прибором.

В схеме вольтметра, изображенного на рисунке 3.26,а, измеряемое переменное напряжение с помощью детектора (Д) вначале преобразуется в постоянное, затем усиливается усилителем постоянного тока (УПТ) и измеряется измерительным устройством (ИУ), в качестве которого применяется вольтметр постоянного тока [34]. Вольтметры этого типа имеют недостаточно высокую чувствительность и точность.

В случае если необходимо измерить амплитудные значения напряжения, применяют электронные амплитудные вольтметры во входном устройстве устанавливают преобразователь амплитудных (пиковых) значений. Такие вольтметры позволяют измерять амплитуду импульсов с минимальной длительностью от десятых долей микросекунды и скважностью 2...500. Диапазон измерения вольтметров этого типа составляет от 100 мВ до 1000 В, а частотный диапазон — от 20 Гц до 1000 МГц [34].

В вольтметре, построенном по схеме (рисунок 3.26,б), измеряемое напряжение сначала усиливается усилителем переменного тока (У), а затем выпрям-

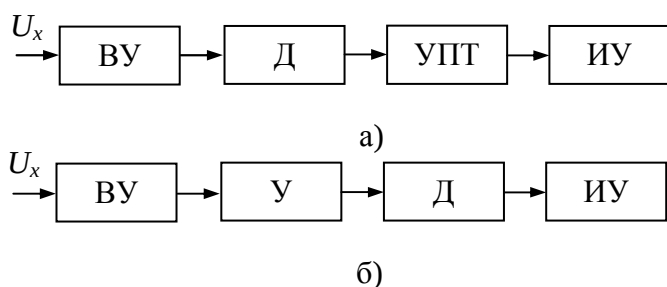


Рисунок 3.26 — Структурные схемы электронного вольтметра с усилителем:
а) — постоянного тока; б) — переменного тока

ляется с помощью детектора (Д) и измеряется измерительным устройством (ИУ). Вольтметры этого типа имеют с одной стороны более узкий частотный диапазон (до 50 МГц), ограниченный полосой пропускания усилителя переменного тока, а с другой стороны — более высокую

чувствительность, вследствие того, что усилители переменного тока имеют

большой коэффициент усиления, чем УПТ. Шкала вольтметра градуируется, как правило, в действующих значениях для синусоидального напряжения [34].

На рисунке 3.27, в качестве примера, изображен аналоговый милливольтметр ВЗ-56. Прибор предназначен для измерения среднеквадратического значения напряжения переменного тока синусоидальной формы и линейного преобразования его в напряжение постоянного тока.

Шкалы прибора ВЗ-56 проградуированы в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения и в децибелах.

Основные технические характеристики прибора ВЗ-56 [62]:

- диапазон частот: 10 Гц...15 МГц;
- диапазон напряжений: 0,1 мВ...300 В;
- пределы основной погрешности измерения напряжения (в % от конечного значения поддиапазона): $\pm 2,5$ и ± 4 с делителем.

Для измерения амплитуд периодических сигналов с большой скважностью и амплитуд одиночных импульсов применяют **электронные импульсные вольтметры**.

Структурная схема импульсного вольтметра изображена на рисунке 3.28.

Эти приборы имеют в своем составе: преобразователь амплитуды импульсов в постоянное напряжение (ПАИ); усилитель постоянного тока (УПТ) и ИУ [35].

В качестве измерительного устройства используется магнитоэлектрический индикатор.

Для увеличения верхнего предела измеряемого напряжения на входе вольтметра устанавливается калиброванный делитель напряжения.

В зависимости от вида преобразования показание вольтметра может быть пропорционально амплитудному (пиковому), средневыпрямленному или среднеквадратическому значению измеряемого напряжения. Однако, шкалу импульсных вольтметров градуируют в амплитудных значениях, а шкалу любого другого электронного вольтметра градуируют в действующих значениях напряжения синусоидальной формы.

Погрешность электронных импульсных вольтметров составляет 0,5 % и более, рабочий диапазон частот — от 20 Гц до 1 ГГц; нижний предел измерения составляет 1 мкВ [35].

Для измерения постоянных и переменных напряжений используются **универсальные электронные вольтметры**. В этих приборах, совмещаются функции измерения постоянных и переменных напряжений.

Структурная схема универсального электронного вольтметра изображена



Рисунок 3.27 — Аналоговый милливольтметр ВЗ-56

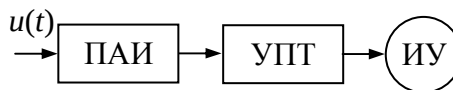


Рисунок 3.28 — Структурная схема импульсного вольтметра

на рисунке 3.29 [36]. В этом приборе выбор измеряемого рода тока осуществляется с помощью переключателя П.

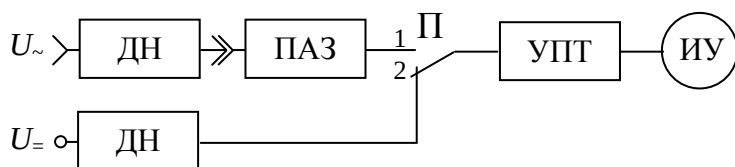


Рисунок 3.29 — Структурная схема универсального электронного вольтметра

При измерении постоянного напряжения измеряемая величина через делитель напряжения (ДН) и переключатель П подается на вход усилителя постоянного тока (УПТ), а затем на измерительное устройство (ИУ). В качестве ИУ выступает магнитоэлектрический микроамперметр.

При измерении переменных напряжений измеряемая величина через выносной ДН поступает вначале на вход преобразователя амплитудных значений (ПАЗ), преобразующего переменное напряжение в постоянное напряжение, а затем подается на вход УПТ и измеряется ИУ.

В универсальных вольтметрах используется главным образом схема ПАЗ с закрытым входом, в результате чего, напряжение на ее выходе не зависит от постоянной составляющей напряжения на входе.

Универсальные вольтметры позволяют измерять постоянные напряжения от десятков милливольт до 300 В с погрешностью 2,5...4 %, а переменные напряжения — в диапазоне от сотен милливольт до 300 В при частоте входного напряжения от 20 Гц до 1000 МГц с погрешностью 4...6 %.

Универсальные вольтметры позволяют измерять постоянные напряжения от десятков милливольт до 300 В с погрешностью 2,5...4 %, а переменные напряжения — в диапазоне от сотен милливольт до 300 В при частоте входного напряжения от 20 Гц до 1000 МГц с погрешностью 4...6 %.

Применение масштабных преобразователей позволяет расширить диапазон измерения до 1000 В.

На рисунке 3.30 изображен вольтметр универсальный В7-26. Этот прибор измеряет напряжение постоянного и переменного тока, сопротивление постоянному току.

Общие технические характеристики прибора следующие [63].



Рисунок 3.30 — Вольтметр универсальный В7-26

1. Диапазон измеряемых прибором постоянных напряжений составляет от 10 мВ до 300 В. С помощью внешнего делителя ДН-518 можно измерять напряжения до 1000 В.

2. Диапазон измеряемых прибором переменных напряжений по низкочастотному входу составляет в пределах от 200 мВ до 300 В в области частот от 20 Гц до 20 кГц. С помощью внешнего делителя ДН-518 в области частот от 20 Гц до 3 кГц можно измерять напряжения до 1000 В.

3. Диапазон измеряемых прибором переменных напряжений по высокочастотному входу в области частот от 1 кГц до 1000 МГц составляет от 200 мВ до 100 В. С помощью внешнего делителя ДН-519 в области частот от 3 кГц до 300 МГц можно измерять напряжения

до 1000 В.

4. Диапазон измеряемых прибором сопротивлений постоянному току составляет от 10 Ом до 1000 МОм.

5. Предел допускаемой приведенной основной погрешности прибора при измерении постоянного напряжения, выраженная в процентах от конечного значения, установленного поддиапазона, не превышает $\pm 2,5 \%$ на поддиапазонах с верхними пределами 0,1...300 В и $\pm 4,0 \%$ с применением внешнего делителя ДН-518.

6. Предел допускаемой приведенной основной погрешности прибора при измерении переменного напряжения, выраженной в процентах от конечного значения установленного поддиапазона, значений не превышает $\pm 4,0 \%$.

7. Предел допускаемой основной погрешности прибора при изменении сопротивления постоянному току, выраженный в процентах от длины рабочей части шкалы, не превышает $\pm 2,5 \%$.

Для измерения гармонических напряжений в условиях действия помех используют **электронные селективные вольтметры**.

На рисунке 3.31 изображена схема селективного вольтметра. Селективные вольтметры предназначены для измерения синусоидального напряжения в узкой полосе частот. Вольтметры этого типа строят по схеме супергетеродинного приемника [36].

Для измерения напряжений осуществляется частотная селекция входного сигнала с помощью перестраиваемого гетеродина (Г), смесителя (См) и узкополосного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), который обеспечивает требуемую избирательность и высокую чувствительность.

Для настройки прибора в схеме предусмотрен калибратор (К).

Калибратор — это образцовый источник (генератор) переменного напряжения определенного уровня, позволяющий исключить систематические погрешности из-за изменения коэффициентов передачи узлов прибора.

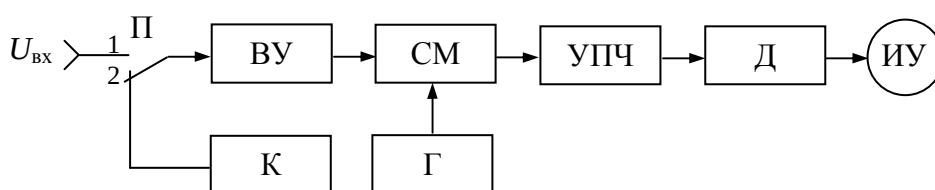


Рисунок 3.31 — Структурная схема селективного вольтметра

Для калибровки переключатель П устанавливается в положение 2. Кроме того, в селективных вольтметрах обязательно наличие системы автоматической подстройки частоты (на схеме не показана).

Сигнал после УПЧ выпрямляется детектором (Д) и измеряется измерительным устройством (ИУ). Шкала вольтметра обычно градуируется в средних квадратических значениях.

На рисунке 3.32, в качестве примера, изображен микровольтметр селективный В6-9.

Прибор В6-9 измеряет среднеквадратические значения напряжения и уси-

ливает малые синусоидальные напряжения в селективном и широкополосном режимах работы.



Рисунок 3.32 — Микровольтметр селективный В6-9

Микровольтметр используется для измерения шума и фона выпрямительных и стабилизирующих устройств, настройки низкочастотных фильтров, акустических измерений, а также для визуальной проверки формы измеряемого сигнала на внешнем осциллографе. Диапа-

зон измеряемых напряжений микровольтметра составляет 30 мкВ...10 В, а диапазон частот — 20 Гц...200 кГц измеряемых напряжений в широкополосном режиме [64]. Погрешность от конечного значения, установленного поддиапазона в широкополосном режиме, составляет $\pm 6\%$.

3.2.8 Измерительные преобразователи

Способность аналогового вольтметра измерять амплитудное (пиковое), среднеквадратическое или средневыпрямленное значения переменного напряжения определяется применением того или иного типа преобразователя переменного тока в постоянный.

В качестве преобразователей переменного напряжения в постоянное напряжение используются: амплитудные (пиковые) детекторы; детекторы среднеквадратического и средневыпрямленного значений напряжения.

Наиболее распространенными являются выпрямительные и термоэлектрические измерительные преобразователи.

Выпрямительные преобразователи используют принцип выпрямления (детектирования) переменного тока с помощью полупроводниковых диодов, а термоэлектрические измерительные преобразователи используют принцип получения термоЭДС, возникающей вследствие нагрева переменным током горячего спая термопары.

Рассмотрим принципы работы выпрямительных преобразователей. Одним из распространенных типов преобразователей является пиковый детектор.

Пиковый (амплитудный) детектор — это измерительный преобразователь, на выходе которого постоянная составляющая выходного напряжения соответствует пиковому значению напряжения на входе.

На рисунке 3.33 изображены схемы пиковых детекторов: а) — последовательный детектор с открытым входом; б) — параллельный детектор с закрытым входом [37].

Принцип работы пиковых детекторов следующий. При измерении напряжений, не содержащих постоянной составляющей, преобразователи с открытым и закрытым входом дают одинаковые результаты: напряжения на конденсаторах в обоих случаях близки к амплитудному значению U_m , а показания обоих вольтметров пропорциональны амплитуде измеряемого напряжения.

На рисунке 3.34 изображены диаграммы напряжений в пиковых детекторах: а) — с открытым входом; б) — с закрытым входом [37].

В случае если напряжение на входе пикового детектора содержит постоянную составляющую, то на выходе детектора с открытым входом будет присутствовать постоянная составляющая входного напряжения.

В свою очередь, у детектора с закрытым входом выходное постоянное напряжение будет пропорционально амплитуде напряжения на входе детектора.

При подаче на вход детектора синусоидального напряжения во время положительных полупериодов через сопротивление диода и внутреннее сопротивление источника происходит заряд конденсатора.

Во время отрицательных полупериодов синусоидального напряжения конденсатор разряжается.

В пиковом детекторе с открытым входом разряд конденсатора идет через сопротивление нагрузки R , а в пиковом детекторе с закрытым входом — через сопротивление нагрузки R и внутреннее сопротивление источника. Значение постоянной времени разряда много больше значения постоянной времени заряда. Если на вход схемы пикового детектора с открытым входом подать напряжение синусоидальной формы, то напряжение на конденсаторе возрастет и через несколько периодов на его обкладках установится постоянное напряжение на конденсаторе U_C , почти равное амплитуде входного напряжения U_m .

Поскольку напряжение

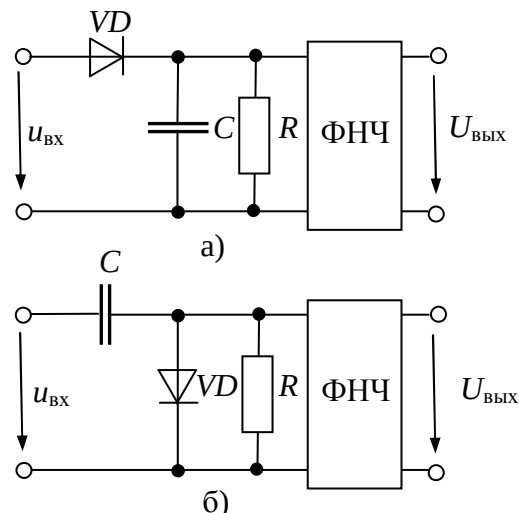


Рисунок 3.33 — Схемы пиковых детекторов:
а) — последовательный детектор с открытым входом;
б) — параллельный детектор с закрытым входом

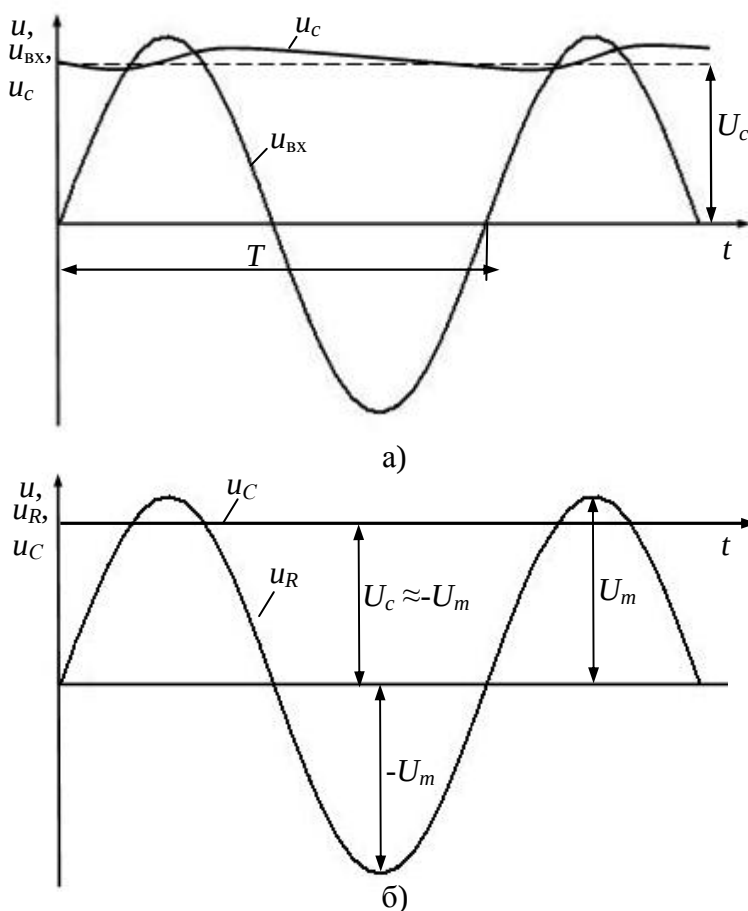


Рисунок 3.34 — Диаграммы напряжений в пиковых детекторах: а) — с открытым входом; б) — с закрытым входом

на конденсаторе U_C не намного меньше напряжения U_m , вследствие разряда конденсатора во время отрицательного полупериода, то в течение времени, когда $u_{вх} > U_C$, через диод будут проходить импульсы тока, пополняющие заряд конденсатора.

При подаче на вход схемы пикового детектора с открытым входом напряжения, в котором содержится кроме переменной еще и постоянная составляющие, конденсатор C зарядится до напряжения, определяемого суммой постоянной и амплитуды переменной составляющих, т. е. до пикового значения напряжения.

В результате на выходе пикового детектора с открытым входом будет постоянное напряжение U_C , учитывающее переменную и постоянную составляющие напряжения на входе схемы.

В пиковом детекторе с закрытым входом, вследствие того, что постоянная времени разряда намного больше постоянной времени заряда, напряжение на конденсаторе за время отрицательного полупериода синусоидального напряжения изменится очень мало. Так как значение постоянной времени цепи разряда большое, то напряжение на конденсаторе U_C будет изменяться незначительно. В этой схеме заряженный конденсатор выполняет роль источника постоянного напряжения $U_C \approx U_m$. Пульсирующее напряжение, выделяющееся на резисторе, будет приблизительно равно амплитудному значению входного напряжения U_m .

При подаче на вход схемы напряжения $u_{вх} = U_m \sin \omega t$ изменение напряжения на нагрузочном резисторе R будет принимать значение [38]:

$$u_R \approx u_{вх} - U_C = U_m \sin \omega t - U_C.$$

В результате, как только синусоидальное напряжение достигнет положительного максимума, напряжение на сопротивлении будет $u_R \approx 0$, а при достижении отрицательного максимума, так как $U_C \approx U_m$ — $u_R \approx -2U_m$.

Для исключения пульсаций выходного напряжения на выходе включается фильтр нижних частот (ФНЧ), который пропускает постоянную составляющую $U_C \approx U_m$ пульсирующего напряжения.

Следующим типом преобразователя является преобразователь среднего квадратического значения.

Преобразователь среднего квадратического значения — это измерительный преобразователь, на выходе которого значение выходного напряжения (тока) преобразователя получается пропорциональным квадрату среднеквадратического значения напряжения (СКЗ), подведенного к входу преобразователя.

При измерении СКЗ напряжения выполняются три операции: квадрирование (возведение напряжения переменного тока в квадрат); усреднение и извлечение квадратного корня из результата усреднения. Извлечения квадратного корня осуществляется за счет схемной реализации, либо путем соответствующей градуировки шкалы вольтметра. Таким образом, преобразователь должен обладать квадратичной характеристикой преобразования. При включении в выходную цепь такого преобразователя схемы ФНЧ, магнитоэлектрический ИМ будет измерять постоянную составляющую (среднее значение) выходного тока или напряжение пропорциональное квадрату СКЗ напряжения на входе преобразователя.

В электронных вольтметрах применяются две основные схемы квадратичных

преобразователей [38]:

- преобразователи, работающие на принципе преобразования электрической энергии в тепловую энергию;
- преобразователи, у которых выходное напряжение представляет собой квадратичную функцию от входного напряжения.

На рисунке 3.35 изображена схема термоэлектрического преобразователя СКЗ напряжения.

Принцип работы преобразователя следующий. К выходу высокоточного широкополосного усилителя (ШУ), т. е. в цепь измеряемого напряжения подключен нагреватель первого термопреобразователя ТП₁.

В широкополосном усилителе ШУ, имеющим высокоточный коэффициент $K = I_x / U_x$, измеряемое напряжение u_x преобразуется в ток i_x . За счет высокой точности значения коэффициента передачи, значение термоЭДС, возникающей в термопреобразователе ТП₁ будет мерой СКЗ измеряемого напряжения u_x . Нагреватель второго термопреобразователя ТП₂, в цепи которого протекает ток I_k , подключен через цепь обратной связи (сопротивление R) к выходу дифференциального усилителя (ДУ). Номинал сопротивления много больше сопротивления нагревателя термопреобразователя ТП₂ [1].

С учетом коэффициента преобразования a_T , значение термоЭДС первого преобразователя будет равным $E_1 = a_T U_x^2$, а второго — $E_2 = a_T U_{\text{вых}}^2$, где $U_{\text{вых}}$ — среднеквадратическое значение выходного напряжения. Второй термопреобразователь ТП₂, по нагревателю которого протекает ток I_k , включен последовательно с ТП₁. Выходные напряжения термопреобразователей имеют противоположную полярность, поэтому напряжение на входе дифференциального усилителя ДУ равно разности этих двух термоЭДС. При достаточно большом коэффициенте усиления ДУ и, как следствие достаточно большом выходном напряжении $U_{\text{вых}}$, разность термоЭДС этих двух термопреобразователей $\Delta E = E_1 - E_2$ окажется равной нулю. С учетом коэффициента согласованности $\alpha_{\text{ТП}}$ термопреобразователей ТП₁ и ТП₂, выходное напряжение будет равным [1]:

$$U_{\text{вых}} = I_k \cdot R = \alpha_{\text{ТП}} \cdot I_x \cdot R = \alpha_{\text{ТП}} \cdot K \cdot U_x \cdot R,$$

т.е. выходное напряжение преобразователя связано линейной зависимостью со среднеквадратическим значением измеряемого напряжения.

Из-за наличия разброса параметров термопреобразователей приведенная погрешность преобразователя составляет не более 2,5...4 %.

Для преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение, пропорциональное СКЗ переменного напряжения, можно применить цепочную схему соединения диодов, имеющую квадратичную ВАХ. Одиночные диоды не применяют в такой схеме так как, диоды имеют разброс ВАХ, приводящий к по-

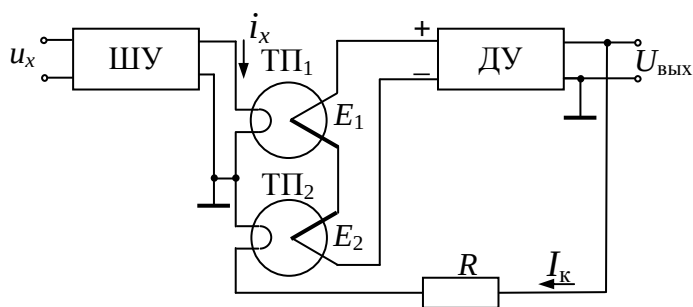


Рисунок 3.35 — Схема термоэлектрического преобразователя среднеквадратического значения напряжения

грешности. Схема квадратичного преобразователя с диодной цепочкой изображена на рисунке 3.36 [1].

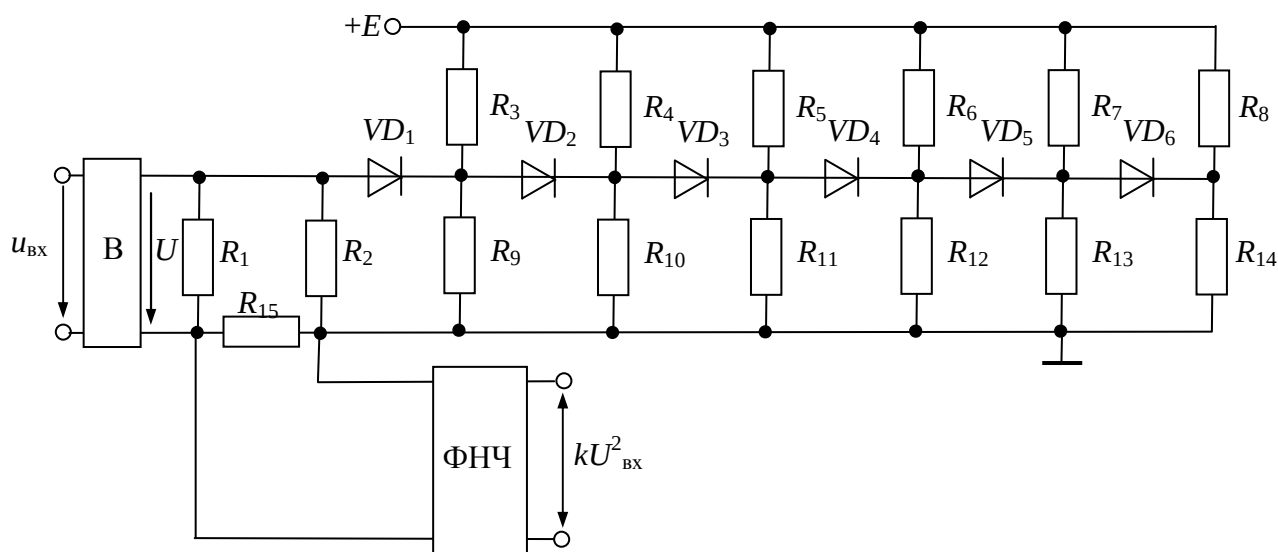


Рисунок 3.36 — Схема квадратичного преобразователя с диодной цепочкой

В этой схеме выпрямленное напряжение с выпрямителя (В) подается на цепь, состоящую из диодной цепочки $VD_1...VD_6$ и резисторов $R_3...R_{14}$. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_{15} через фильтр нижних частот (ФНЧ) подается на выход преобразователя. Квадратичная вольтамперная характеристика преобразователя обеспечивается следующим образом. Сопротивления $R_3...R_{14}$ подключены к общему стабилизированному источнику напряжения E по схеме делителей напряжения. Делители подобраны так, что смещения напряжения U_i , подаваемые на диоды $VD_1...VD_6$ соответственно, удовлетворяют соотношению $U_1 < U_2 < ... < U_6$. Пока входное напряжение цепочки U не достигает значения U_1 , все диоды закрыты и начальная часть ВАХ является прямой линией с наклоном, зависящим от сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и R_{15} . Когда напряжение с выхода выпрямителя U превысит смещение напряжения U_1 , откроется диод VD_1 и параллельно R_2 подключится делитель R_3 , R_9 . Крутизна ВАХ преобразователя на участке от U_1 до U_2 и ток в цепи возрастает. При дальнейшем повышении напряжения, когда выполнится условие $U > U_2$, в цепи преобразователя будет протекать еще больший ток. Таким образом, крутизна ВАХ будет увеличиваться с ростом входного напряжения. Если выбрать соответствующим образом сопротивления делителей, то можно получить ВАХ в виде ломаной линии, приближающейся к квадратичной параболе. В результате, выходное напряжение будет пропорционально среднему значению тока диодной ячейки, а его среднее значение будет пропорциональным квадрату среднего квадратического значения входного напряжения. Коэффициент преобразования схемы этого типа по току определяется по выражению [1]:

$$K_d = I_{cp} / U^2,$$

где I_{cp} — среднее значение тока на выходе преобразователя, а U — среднее квадратическое значение напряжения. Основная погрешность преобразователей этого типа, составляющая 3...5 %, определяется разбросом: ВАХ и параметров диодов; сопротивлений резисторов и нестабильностью источника питания E .

Величина погрешности лежит в пределах 2,5...6 % в диапазоне частот 20 Гц...50 МГц.

Другим типом преобразователя, применяемым в практике измерений, является детектор среднего выпрямленного значения (СВЗ).

Детектор среднего выпрямленного значения напряжения — это измерительный преобразователь переменного напряжения в постоянный ток, пропорциональный СВЗ входного напряжения (среднему значению модуля).

Под средневыпрямленным значением (СВЗ) напряжения понимают среднее значение абсолютного значения напряжения [39]:

$$U_{\text{СВЗ}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

ВАХ такого детектора должна иметь линейный участок в пределах диапазона входных напряжений. Наибольшего распространения в таких преобразователях получила схема, состоящая из двухполупериодного выпрямителя и фильтра нижних частот.

На рисунке 3.37 изображены схемы детекторов средневыпрямленного значения напряжения: а) — с диодным мостом; б) — с двумя диодами и резисторами.

На схеме, изображенной на рисунке 3.37,а, в положительный полупериод ток протекает по цепи: верхний входной зажим — диод VD_1 — диагональ моста — диод VD_4 — нижний входной зажим. В отрицательный полупериод ток протекает по цепи: нижний зажим — диод VD_3 — диагональ моста — диод VD_2 — верхний зажим. С сопротивления нагрузки R напряжение подается на ФНЧ. Для измерения напряжения к выходу ФНЧ подключается вольтметр [39].

На схеме, изображенной на рисунке 3.37,б вместо диодов VD_3 и VD_4 включены резисторы R_1 и R_2 соответственно. При положительном полупериоде напряжения ток протекает только через диод VD_1 и резистор R_1 . В этот полупериод падение напряжения на резисторе R_2 будет равно нулю. Поэтому, если в диагональ моста через ФНЧ включить магнитоэлектрический вольтметр, он измерит падение напряжения на резисторе R_1 . В отрицательный полупериод ток будет протекать через диод VD_2 и резистор R_2 . В этот полупериод вольтметр будет измерять падение напряжения на резисторе R_2 . Основная погрешность этого типа преобразователя определяется разбросом: ВАХ и пара-

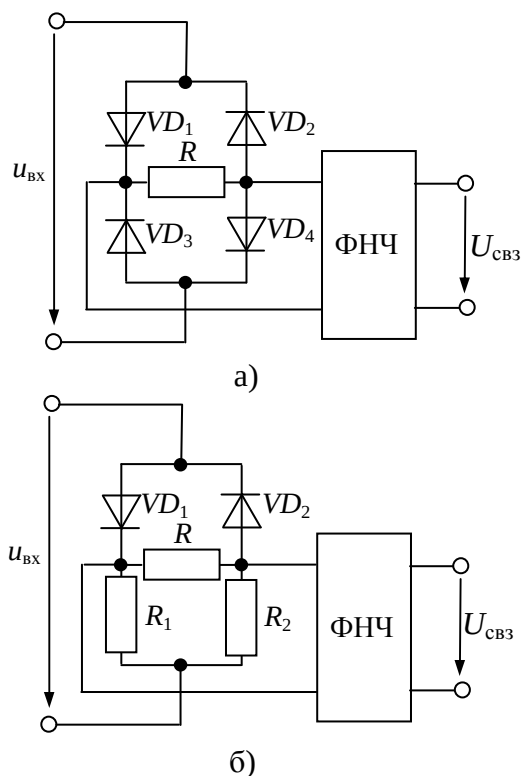


Рисунок 3.37 — Схемы детекторов средневыпрямленного значения напряжения: а) — с диодным мостом; б) — с двумя диодами и резисторами

метров диодов; сопротивлений резисторов и линейностью ВАХ диодов. В целях улучшения линейности ВАХ в диагональ моста последовательно с нагрузочным резистором включают добавочный резистор, сопротивление которого намного больше сопротивления открытого диода. Вольтметры СВЗ, в целях обеспечения высокой чувствительности в широкой полосе частот, должны иметь широкополосный усилитель переменного напряжения [39].

На рисунке 3.38, в качестве примера, изображен милливольтметр ВЗ-48, предназначенный для измерения среднеквадратического значения напряжения произвольной формы и для преобразования среднеквадратического значения



Рисунок 3.38 — Милливольтметр ВЗ-48

напряжения произвольной формы в пропорциональное постоянное напряжение.

Прибор применяется для настройки разнообразного электро- и радиотехнического оборудования.

Диапазон измеряемых напряжений составляет 0,0003...300 В в полосе частот от 10 Гц до 50 МГц. Кроме того, прибор имеет дополнительную шкалу, проградуированную в децибелах [65].

Предел допускаемой основной погрешности прибора, выраженный в процентах от конечного значения установленного поддиапазона, не превышает $\pm 2,5 \%$ [65].

3.2.9 Контрольные вопросы

1. Какими приборами можно измерить напряжение периодической несинусоидальной формы?
2. В чем отличие вольтметров прямого преобразования от вольтметров сравнения?
3. Как правильно выбрать трансформатор тока для расширения пределов измерений приборов в цепях переменного тока?
4. С какой целью применяют измерительные преобразователи?
5. Где находят применение измерительные трансформатора тока?
6. Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой?
7. Чем автотрансформатор отличается от трансформатора?
8. Какие существуют схемы электронных вольтметров?
9. Каково назначение универсального электронного вольтметра?
10. В чем заключаются достоинства электронных вольтметров?

3.3 Аналоговые частотомеры и фазометры

3.3.1 Электродинамические фазометры

Фазометр — это электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения углов сдвига фаз между двумя изменяющимися периодически электрическими колебаниями.

Задачи измерения фазового сдвига возникают между: напряжением и током нагрузки на промышленной частоте; двумя гармоническими напряжениями (например, входным и выходным напряжениями электротехнического устройства) и двумя напряжениями одинаковой частоты, которые изменяются по периодическому закону, но имеют несинусоидальную форму.

Схемы построения приборов для измерения фазового сдвига зависят от: диапазона частот сигнала и его формы; мощности источников сигналов и требуемой точности измерения.

Для построения фазометров, предназначенных для измерения фазового сдвига между напряжением и током в нагрузке, а также коэффициента мощности можно использовать электродинамические и ферродинамические логометры.

Схема электродинамического фазометра изображена на рисунке 3.39, а векторная диаграмма, поясняющая работу электродинамического фазометра — на рисунке 3.40 [4].

Рассмотрим устройство и принцип работы электродинамического фазометра. Вследствие того, что ИМ прибора является логометром, в механизме отсутствует механический противодействующий момент.

Подвижная часть ИМ прибора, представляет собой две жестко скрепленные между собой под углом 60° рамки, закрепленные на осях в опорах [4].

Взаимодействие тока i_1 , протекающего по неподвижной катушке прибора, с током i_2 , протекающим по обмотке рамки 2, угол между плоскостью которой и плоскостью неподвижной катушки при $\alpha=0$ равен 150° , создает вращающий момент [4]:

$$M_{\text{вр1}} = c_1 I_1 I_2 \cos(\hat{i_1 i_2}) \sin(150^\circ - \alpha),$$

где c — постоянная величина, зависящая от параметров катушек ИМ. В свою очередь, взаимодействие тока i_1 , протекающего по неподвижной катушке прибора, с током i_3 , протекающим по обмотке рамки 3 создает вращающий момент $M_{\text{вр2}}$, который действует навстречу моменту $M_{\text{вр1}}$ [4]:

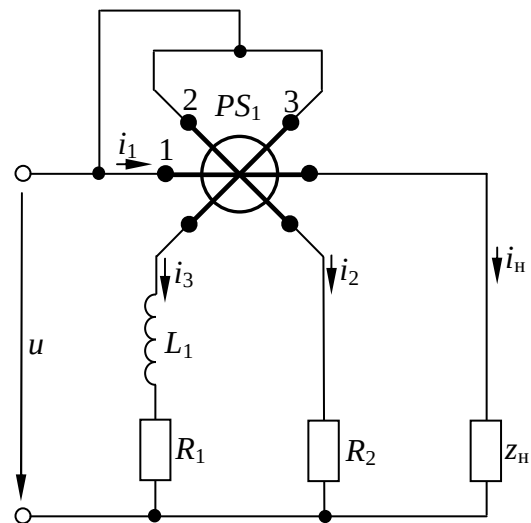


Рисунок 3.39 — Схема электродинамического фазометра

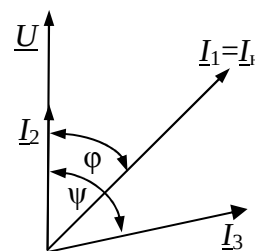


Рисунок 3.40 — Векторная диаграмма токов и напряжений электродинамического фазометра

$$M_{вр2} = c_2 I_1 I_3 \cos(\hat{i}_1 \hat{i}_3) \sin(150^\circ - 60^\circ - \alpha).$$

В тоже время из векторной диаграммы следует, что $\cos(\hat{i}_1 \hat{i}_2) = \cos \varphi$.

Фазовый сдвиг между напряжением на входе u (или i_2) и током i_3 выполняется равным $\psi = 60^\circ$ за счет включения в цепь обмотки рамки 3 катушки индуктивности L_1 и резистора R_1 . За счет этого получаем [4]:

$$\cos(\hat{i}_1 \hat{i}_3) = \cos(60^\circ - \varphi).$$

Вследствие того, что ИМ прибора является логометром, в механизме прибора отсутствует механический противодействующий момент и в установившемся режиме подвижная его часть займет положение при условии равенства моментов $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$, поэтому:

$$c_1 I_1 I_2 \cos \varphi \cos(60^\circ - \alpha) = c_2 I_1 I_3 \cos(60^\circ - \varphi) \cos \alpha.$$

Если в последнем выражении выполнить условие $c_1 I_2 = c_2 I_3$, что осуществляется конструктивно, то последнее равенство будет выполняться при равенстве углов α и φ .

Таким образом, угол поворота подвижной части равен фазовому сдвигу между напряжением и током в нагрузке.



Рисунок 3.41 — Фазометр ДЗ1

На рисунке 3.41, в качестве примера, изображен щитовой фазометр типа ДЗ1.

Фазометр предназначен для измерения коэффициента мощности в сетях переменного тока. В этом приборе установлен электродинамический ИМ.

Прибор соответствует классу точности 2,5 и включается в сеть через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

По устойчивости к механическим воздействиям прибор относится к тряскопрочным.

3.3.2 Электромеханические вибрационные частотомеры

Выбор метода и типа прибора для измерения частоты определяется значениями: частоты; требуемой точности измерений; мощностью источника сигнала и другими факторами.

Одним из наиболее простых электромеханических частотомеров является электромеханический вибрационный частотомер.

На рисунке 3.42,а изображена шкала электромеханического вибрационного частотомера (отмечается частота 50 Гц), а на рисунке 3.42,б — его конструкция.

Вибрационный частотомер состоит из следующих элементов: 1 — обмотка электромагнита; 2 — якорь электромагнита; 3 — основание частотомера; 4 — пружинящее крепление; 5 — пластины [1].

Принцип работы прибора следующий. Напряжение измеряемой частоты подводится к обмотке электромагнита.

В поле электромагнита располагаются стальные пластинки, один конец которых закреплен неподвижно. Свободный конец пластин загнут и окрашен яркой краской. Каждая пластина обладает определенной частотой собственных колебаний. Пластины под действием электромагнитного поля и сил упругости совершают колебательные движения.

С наибольшей амплитудой колеблется пластинка, частота собственных колебаний которой соответствует удвоенной частоте поданного напряжения. Так как человеческому глазу свойственна инерционность, то он видит полосы на шкале прибора.

В зависимости от частоты сети, пределы измерения по частоте таких частотомеров небольшие, например 45...55 или 450...550 Гц.

На рисунке 3.43, в качестве примера, изображен частотомер вибрационной системы типа В80, предназначенный для измерения частоты в цепях переменного тока с номинальной частотой 50 Гц и напряжением: 36, 100, 127 или 220 В [67].

Прибор соответствует классу точности 1,0. Диапазон измерений частоты частотомера лежит в пределах 48...52 Гц [67].

Частотомеры этого типа в основном предназначены для сигнализации и регулирования частоты в пределах номинальных значений в цепях переменного тока на передвижных и стационарных объектах.

3.3.3 Электродинамические и электромагнитные частотомеры

Для измерения частот в диапазоне 20...2500 Гц используются электромеханические частотомеры, выполненные на основе электродинамических (ферродинамических) и электромагнитных ИМ.

На рисунке 3.44 изображена схема электродинамического частотомера, включающего электродинамический логометрический ИМ, а на рисунке 3.45 — векторная диаграмма токов и напряжений, поясняющая принцип работы электродинамического частотомера.

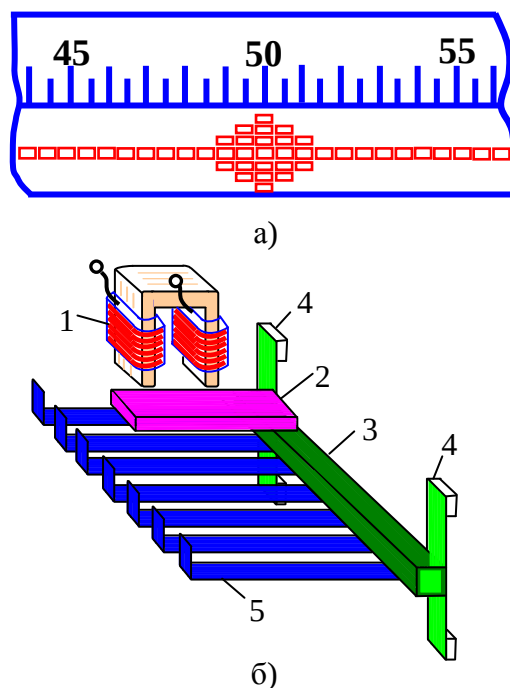


Рисунок 3.42 — Конструкция электромеханического вибрационного частотомера:

а) — шкала (отмечается частота 50 Гц);
б) — схема прибора



Рисунок 3.43 — Частотомер В80

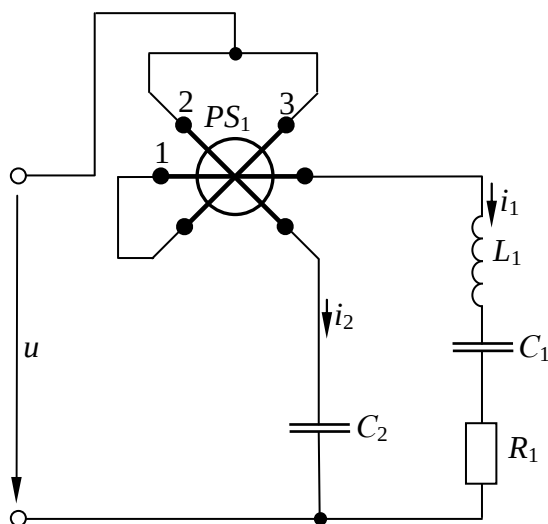


Рисунок 3.44 — Схема электродинамического частотомера

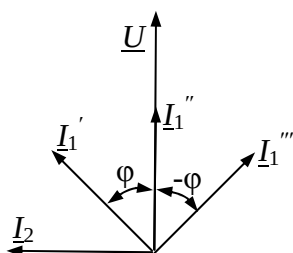


Рисунок 3.45 — Векторная диаграмма токов и напряжений электродинамического частотомера

частоты f_x [13]:

$$M_{вр1} = c_1 I_1 I_2 \sin(\beta_1 - \alpha) \cos(90^\circ \pm \varphi) = c_1 I_1 I_2 \cos(45^\circ - \alpha) \sin(\mp \varphi).$$

Вращающий момент $M_{вр2}$, действующий на подвижную часть, зависит только от угла поворота подвижной части α и не зависит от измеряемой частоты f_x [13]:

$$M_{вр2} = c_2 I_1^2 \sin(\beta_2 - \alpha) \cos 0^\circ = c_2 I_2^2 \sin(45^\circ - \alpha),$$

где $\beta_1 = 135^\circ$ — угол между плоскостью первой рамки и плоскостью неподвижной катушки, а $\beta_2 = 45^\circ$ — угол между плоскостью второй рамки и плоскостью неподвижной катушки при угле поворота подвижной части $\alpha = 0$.

В результате действия моментов подвижная часть прибора будет поворачиваться до тех пор, пока не наступит их равенство. Из векторной диаграммы, изображенной на рисунке 10.6, видно, что угол поворота φ вектора тока I_1 зависит от значения измеряемой частотой. Из равенства моментов и конструктивных постоянных c_1 и c_2 будет следовать [13]:

$$\operatorname{tg}(45^\circ - \alpha) = \sin(\mp \varphi).$$

В следствие того, что угол φ зависит от измеряемой частоты f_x , угол поворота стрелки α будет зависеть от измеряемой частоты f_x . Из последнего равенства следует, что при угле $\varphi = 0$, угол поворота подвижной части будет равен

Принцип работы электродинамического логометра рассмотрен в § 2.3.4.

Рассмотрим принцип действия электродинамического частотомера на базе логометрического ИМ.

В этом приборе рамки подвижной части скреплены между собой под углом, равным 90° [13].

Параметры контура $L_1 - C_1 - R_1$ подобраны таким образом, что частота резонанса напряжений близка к средней частоте диапазона измерения [13]:

$$f_{ср} = (f_n + f_k) / 2,$$

где f_n и f_k — соответственно начальное и конечное значения шкалы прибора.

На подвижную часть ИМ действуют вращающие моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$.

Вращающие моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$ действуют навстречу друг другу.

Момент $M_{вр1}$ зависит от угла поворота подвижной части α и фазового сдвига между токами i_1 и i_2 , который, в свою очередь, зависит от измеряемой

$\alpha=45^\circ$, что соответствует среднему значению измеряемой частоты $f_x=f_{\text{ср}}$. При значении измеряемой частоты, соответствующей начальному значению на шкале прибора ($f_x=f_{\text{н}}$) указательная стрелка прибора займет крайнее левое положение, а при значении измеряемой частоты, соответствующей конечному значению на шкале прибора ($f_x=f_{\text{к}}$) — крайнее правое.

На рисунке 3.46 изображена схема электромагнитного частотомера на основе электромагнитного логометра. Принцип работы электромагнитного логометра рассмотрен в § 2.2.5. Частотомер этого типа представляет собой малогабаритный щитовой логометр электромагнитной системы с двумя неподвижными катушками. Рассмотрим принцип работы прибора. Токи i_1 и i_2 в цепях логометра распределены обратно пропорционально полным сопротивлениям ветвей с разным характером зависимости частоты. Параметры цепей подобраны так, что при средней частоте диапазона токи равны и указатель занимает положение, соответствующее средней частоте. При увеличении частоты на входе частотомера ток одной из катушек уменьшается, а в другой увеличивается, вследствие чего, происходит перемещение сердечника из магнитомягкого сплава, укрепленного на одной оси с указателем, под действием изменяющихся магнитных полей неподвижных катушек [36].

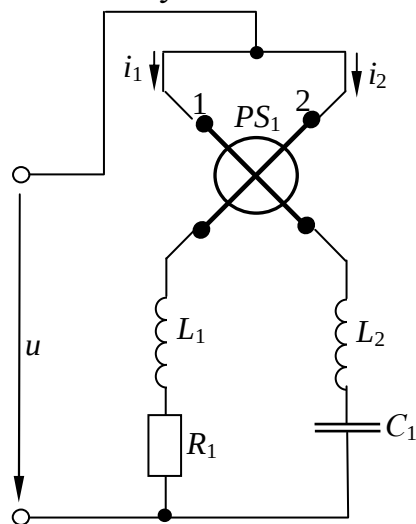


Рисунок 3.46 — Схема электромагнитного частотомера

На рисунке 3.47, в качестве примера, изображен частотомер Д1606. Прибор предназначен для измерений частоты в сетях переменного тока в передвижных энергетических установках. Основой прибора является электродинамический логометрический ИМ, принцип работы которого рассмотрен в § 2.3.4. Диапазоны измерений выпускаемых приборов следующие: 45...55 Гц; 55...65 Гц (при номинальных напряжениях: 127, 220 и 380 В); 350...450 Гц (при номинальных напряжениях: 127, 220 и 380 В) [68].

Частотомер используется при температуре окружающего воздуха от -40°C до $+50^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 100 % (при 50°C) [68].

Прибор соответствует классу точности 2,5 [68]. Электродинамические и электромагнитные частотомеры имеют: узкие пределы измерения, равные $\pm 10\%$ средней частоты; приведенную погрешность 0,5...2,5 %; потребляемую мощность до 10 Вт [33].



Рисунок 3.47 — Частотомер Д1606

3.3.4 Электронные частотомеры

На рисунке 3.48 изображена функциональная схема электронного конденсаторного частотомера, а на рисунке 3.49 — его временные диаграммы работы.

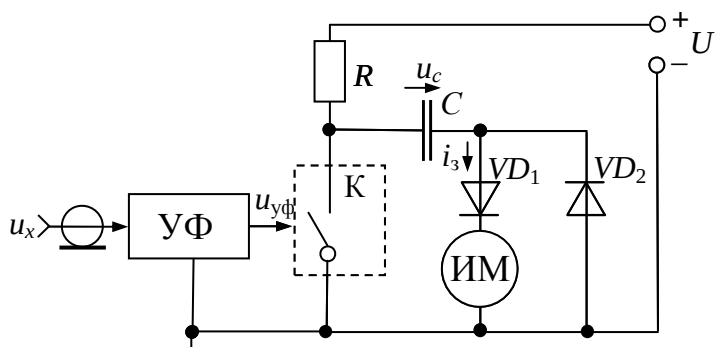


Рисунок 3.48 — Функциональная схема электронного конденсаторного частотомера

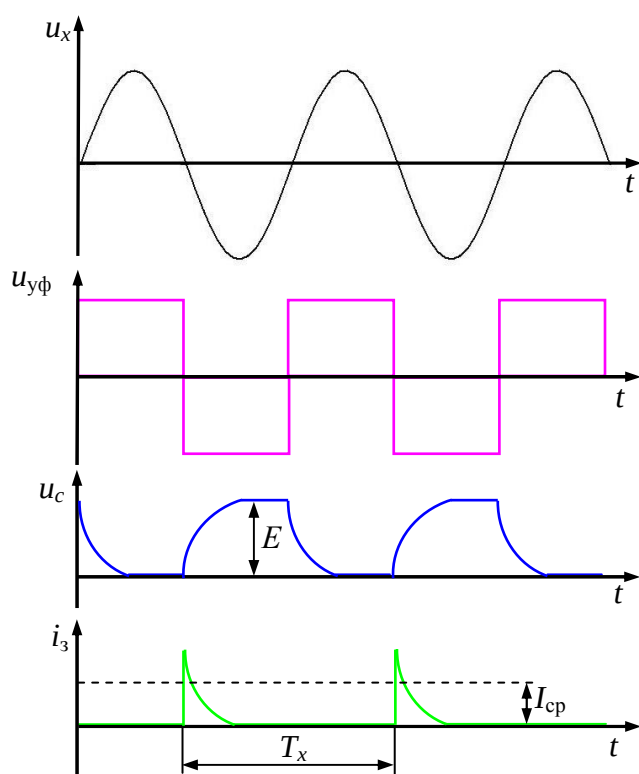


Рисунок 3.49 — Временные диаграммы электронного конденсаторного частотомера

Принцип работы частотомера этого типа следующий. Напряжение измеряемой частоты подается на вход усилителя-формирователя (УФ).

Это устройство усиливает входное напряжение u_x и формирует из него импульсы напряжения прямоугольной формы.

Импульсы с УФ управляют работой электронного ключа К. В схеме устройства ключ работает следующим образом.

При подаче на вход ключа импульсов положительной полярности ключ К замкнут, а в случае отрицательной полярности — разомкнут.

Когда ключ разомкнут, происходит заряд конденсатора С через резистор R до значения напряжения источника питания U.

При этом ток заряда протекает через диод VD_1 и обмотку рамки магнитоэлектрического измерительного механизма (ИМ).

При замкнутом состоянии ключа конденсатор разряжается через диод VD_2 [34].

Таким образом, в течение одного периода измеряемой частоты ($T_x = 1/f_x$) через ИМ проходит заряд $q = CU$.

В результате среднее значение тока в цепи ИМ при полном заряде до значения напряжения источника питания и полном разряде будет равно [34]:

$$I_{cp} = q/T_x = CU/T_x = CU f_x.$$

На рисунке 3.50, в качестве примера, изображен частотомер Ф5043.

Прибор предназначен для измерения частоты электрических колебаний в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

Погрешность прибора составляет 0,1...0,5 % [69]. На вход прибора можно подавать напряжение до 200 В [69].

Одним из преимуществ электронных частотомеров является то, что они потребляют малую мощность от источника сигнала.

Электронные конденсаторные частотомеры используются для измерения частоты периодических напряжений в диапазоне от 10 Гц до 500 кГц [33].

Основная приведенная погрешность таких приборов составляет порядка 0,5...2,5 % [33]. Основное назначение электронных конденсаторных частотомеров лежит в настройке низкочастотной аппаратуры.



Рисунок 3.50 — Частотомер Ф5043

3.3.5 Контрольные вопросы

1. Как измерить фазовый сдвиг электродинамическим фазометром?
2. Из каких элементов состоит конструкция электродинамического фазометра?
3. В чем заключаются преимущества и недостатки электродинамических фазометров?
4. Какими средствами можно измерить частоту тока?
5. Каково устройство и принцип действия электродинамического частотомера?
6. Каким образом подключается электромагнитный логометр при измерении частоты?
7. Какие преимущества и недостатки имеют электромагнитные логометры, применяемые для измерения частоты?
8. Каково устройство и принцип действия электромеханического вибрационного частотомера?
9. Где нашло применение электромеханического вибрационного частотомера?
10. В чем заключается принцип действия электронного конденсаторного частотомера?

3.4 Ваттметры и счетчики электрической энергии

3.4.1 Измерение активной мощности в однофазной цепи переменного тока

Измерение активной мощности в однофазной цепи производится одноэлементными ваттметрами. Для измерения активной мощности в электрических цепях получили распространение ваттметры электродинамической системы. Эти приборы имеют равномерную шкалу и высокую точность измерений.

На рисунке 3.51 изображена схема включения одноэлементного ваттметра в однофазную цепь переменного тока. Обмотка напряжения ваттметра включается на фазное напряжение, а обмотка тока, имеющая небольшое число витков толстого обмоточного провода, включается в рассечку провода фазы.

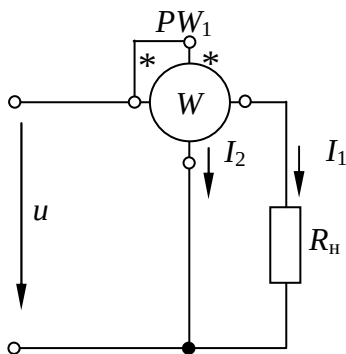


Рисунок 3.51 – Схема включения одноэлементного ваттметра в однофазную цепь переменного тока

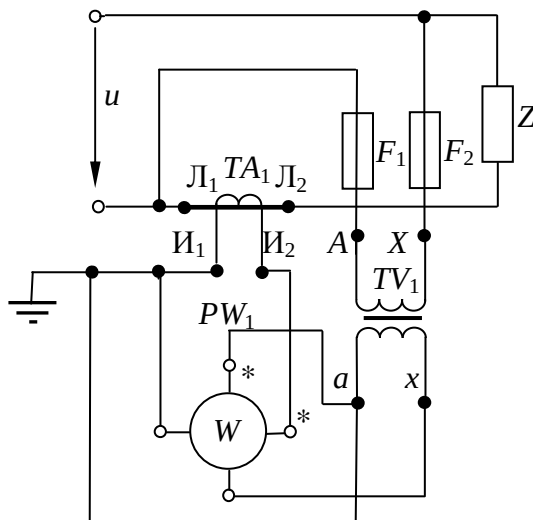


Рисунок 3.52 — Схема подключения измерительных трансформаторов тока и напряжения к ваттметру

Обмотка напряжения ваттметра является подвижной, а обмотка тока — неподвижной. Значение активной мощности, измеряемое ваттметром, определяется по выражению [25]:

$$P_W = UI \cos \varphi,$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока нагрузки; φ — разность фаз напряжения и тока. На рисунке 3.52 изображена схема подключения измерительных трансформаторов тока и напряжения к ваттметру. Для расширения диапазонов измерения ваттметра по току и напряжению токовая обмотка ваттметра подключается к сети через измерительный трансформатор тока, а обмотка напряжения ваттметра — через измерительный трансформатор напряжения.

При подключении приборов следует обратить внимание на правильность включения генераторных зажимов ваттметра и соответствующих зажимов измерительных трансформаторов. Для схемы, изображенной на последнем рисунке, значение измеряемой мощности определяется по выражению [25]:

$$P = K_{I_n} K_{U_n} P_w,$$

где K_{I_n} и K_{U_n} — номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения соответственно.

3.4.2 Измерение активной мощности в трехфазной цепи

Измерение активной мощности с помощью одного прибора. Измерение активной мощности в трехфазных цепях может быть проведено при помощи

одноэлементных ваттметров, включаемых в трехфазную цепь по схемам с использованием одного, двух или трех приборов.

На рисунке 3.53 изображены схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при симметричной нагрузке, соединенной: а) — треугольником; б) — звездой [34].

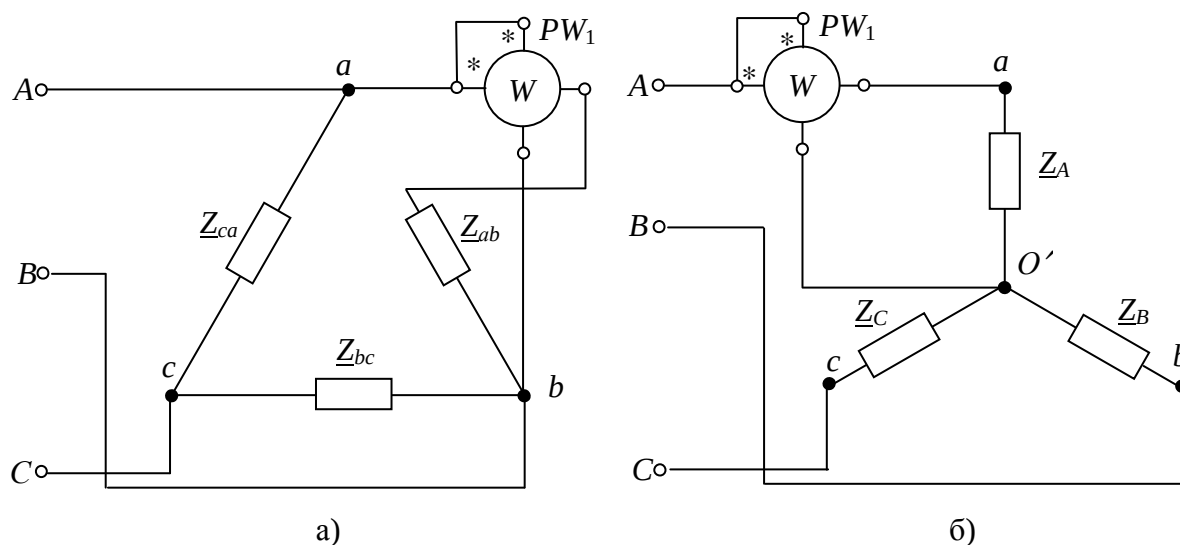


Рисунок 3.53 — Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при симметричной нагрузке, соединенной: а) — треугольником; б) — звездой

В тех случаях, когда нулевая (нейтральная) точка токоприемника недоступна или вообще отсутствует (например, в соединении треугольником) для измерения мощности при симметричной нагрузке, можно использовать также один ваттметр, но уже с созданием искусственной нулевой (нейтральной) точки.

На рисунке 3.54 изображена схема включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с искусственной нулевой точкой при полной симметрии фаз нагрузки.

Искусственная нулевая точка создается с помощью двух резисторов R_b и R_c с одинаковыми номиналами и дополнительного сопротивления R_a , номинал которого определяется из условия:

$$R_a + R_{PW} = R_b = R_c,$$

где R_{PW} — сопротивление цепи обмотки напряжения ваттметра.

Сопротивление цепи обмотки напряжения R_{PW} ваттметра приведено на циферблате прибора, либо указано в техническом паспорте на данный прибор.

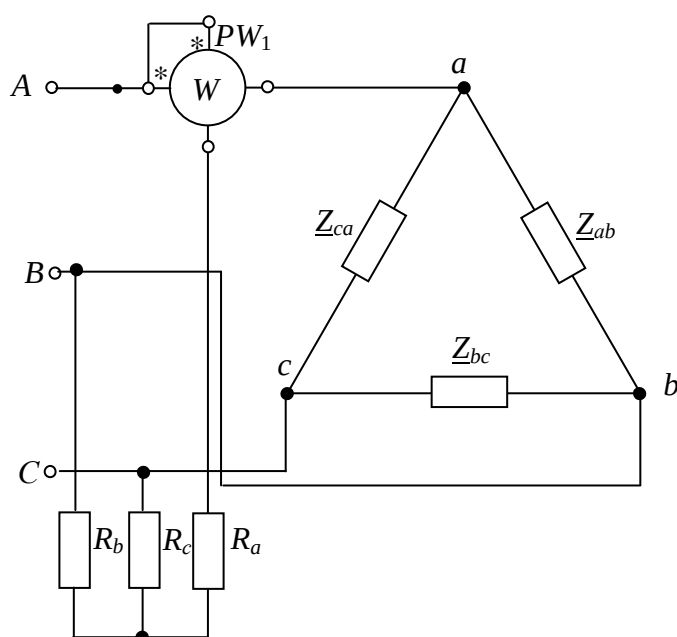


Рисунок 3.54 — Схема включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с недоступной нулевой точкой

Для схем, изображенных на рисунках 3.53 и 3.54, показание ваттметра будет соответствовать мощности P_W одной фазы. В целях определения мощности всей трехфазной цепи следует показание ваттметра увеличить в 3 раза [34]:

$$P=3P_W.$$

Схемы, изображенные на рисунках 3.53 и 3.54, можно использовать только для измерения активной мощности **в симметричных трехфазных цепях**, т. е. при симметрии напряжений и равенстве комплексных сопротивлений фаз нагрузки.

Измерение активной мощности с помощью двух приборов. Метод двух приборов используется при измерении мощности в трехфазной трехпроводной цепи с помощью двух одноэлементных ваттметров. Кроме того, метод двух приборов применяется для включения элементов двухэлементного ваттметра при измерении мощности в трехфазной цепи.

На рисунке 3.55 изображена схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь.

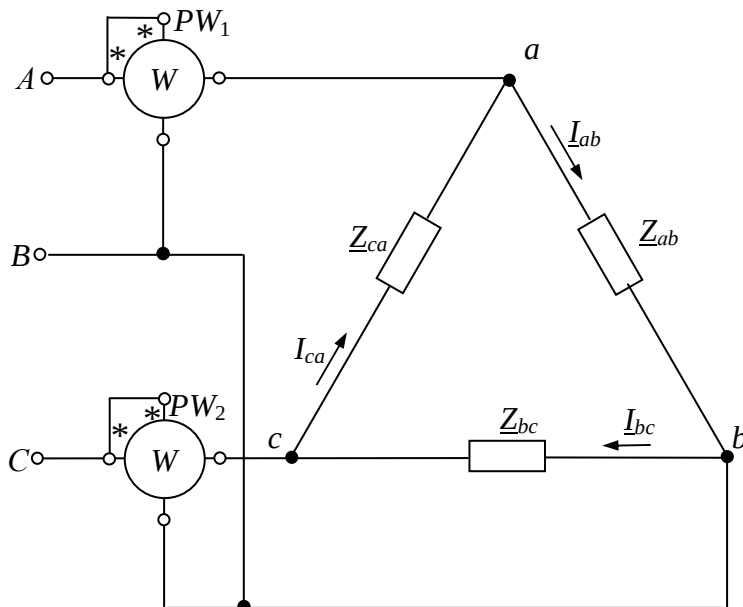


Рисунок 3.55 — Схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь

Данный метод дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки. Токовая обмотка однофазного ваттметра, например PW_1 , включается в фазу A , а токовая обмотка ваттметра PW_2 — в фазу C . Обмотки напряжения ваттметров включаются на линейные напряжения.

При измерении мощности с помощью двух ваттметров, мощность, потребляемая трехфазной цепью, определяется по выражению [34]:

$$P = P_{W1} + P_{W2},$$

где, P_{W1} и P_{W2} — показания ваттметров PW_1 и PW_2 .

Измерение активной мощности с помощью трех приборов. При несимметричной нагрузке фаз в системе с нулевым проводом активная мощность трехфазной системы равна сумме активных мощностей отдельных фаз и может быть измерена при помощи трех ваттметров. Схема подключения ваттметров для измерения активной мощности в системе с нулевым проводом изображена на рисунке 3.56.

Под активной мощностью трехфазного потребителя понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки:

$$P = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A , P_B и P_C являются активными мощностями фаз нагрузки.

Для трехфазной системы, соединенной по схеме звезда — треугольник, активные мощности фаз нагрузки определяются по следующим выражениям:

$$P_A = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_A; P_B = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_B; P_C = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_C,$$

где U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} — напряжения на фазах; I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} — токи в фазах, а φ_A , φ_B и φ_C — углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок А, В и С, соответственно.

Если нагрузка симметричная, то

$$P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi,$$

где φ_ϕ — сдвиг по фазе между фазным напряжением U_ϕ и фазным током I_ϕ .

При симметричной нагрузке фаз мощность, потребляемая трехфазным потребителем составит:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

Независимо от соединения нагрузки в звезду или в треугольник при симметричной нагрузке фаз:

$$3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}\sqrt{3}U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\text{л} I_\text{л},$$

где $U_\text{л}$ — линейное напряжение на нагрузке; $I_\text{л}$ — линейный ток нагрузки.

Поэтому при определении мощности можно использовать выражение:

$$P = \sqrt{3}U_\text{л} I_\text{л} \cos \varphi_\phi.$$

Расширение диапазонов измерения по току и напряжению осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

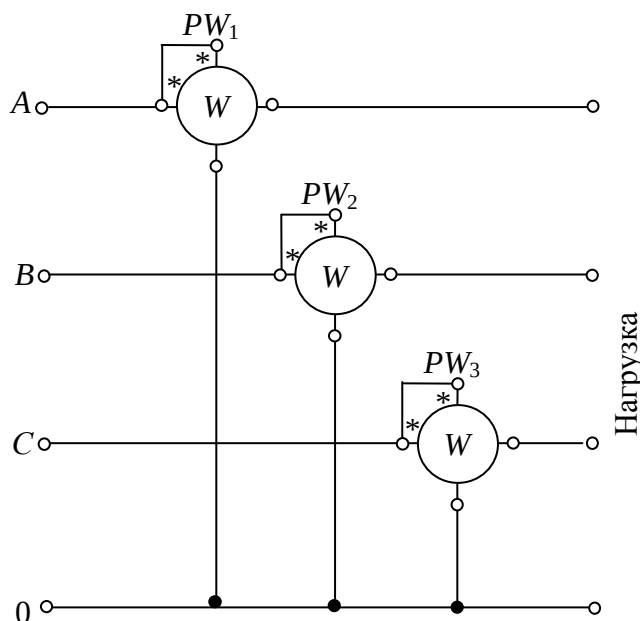


Рисунок 3.56 — Схема подключения ваттметров для измерения активной мощности в системе с нулевым проводом

3.4.3 Измерение реактивной мощности

Измерение реактивной мощности с помощью одного прибора. Реактивная мощность приводит к дополнительным потерям в линиях электропередач и увеличению стоимости вырабатываемой электроэнергии, поэтому измерение реактивной мощности, наряду с измерением активной мощности, имеет большое практическое значение.

Реактивная мощность Q , измеряемая в вольт-амперах реактивных (вар), может быть определена как в однофазных, так и в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока.

Реактивная мощность в однофазной цепи определяется по выражению:

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Измерение реактивной мощности в однофазной цепи может быть осуществлено электродинамическим или ферродинамическим прибором, у которого

вращающий момент пропорционален не косинусу угла между векторами тока и напряжения, а синусу этого угла.

Для трехфазной цепи реактивная мощность трехфазного потребителя определяется суммой реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

где Q_A , Q_B и Q_C являются реактивными мощностями фаз нагрузки.

При симметричной нагрузке фаз, независимо от способа соединения нагрузки в звезду или треугольник, реактивная мощность определяется по выражению:

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{ф}}.$$

Метод одного прибора используется при включении обычного однофазного электродинамического или ферродинамического ваттметра, предназначенного для измерения активной мощности, в трехфазную трех- или четырехпроводную цепь. При этом трехфазная цепь должна быть симметричной.

На рисунке 3.57 приведена схема измерения реактивной мощности методом одного прибора: а — схема включения; б — векторная диаграмма токов и напряжений [34].

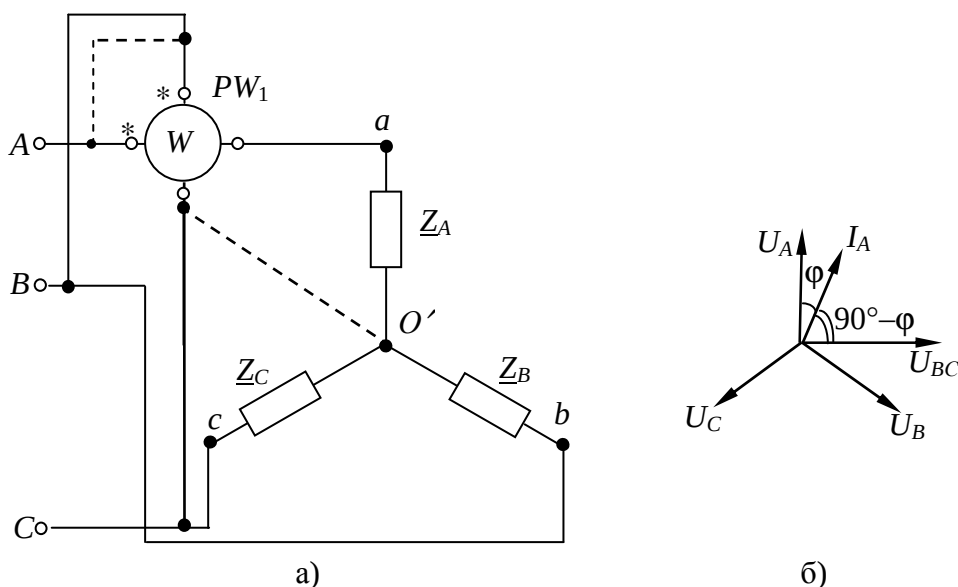


**Рисунок 3.57 — Схема измерения реактивной мощности методом одного прибора:
а — схема включения; б — векторная диаграмма токов и напряжений**

Штриховой линией показано включение обмотки напряжения ваттметра при измерении активной мощности нагрузки, имеющей доступную нулевую точку.

Включение обмотки напряжения ваттметра при измерении реактивной мощности на замененное напряжение показано сплошными линиями. В рассматриваемой схеме, замененным напряжением, по отношению к напряжению U_A , будет линейное напряжение U_{BC} .

Из векторной диаграммы, изображенной на рисунке, видно, что вектор линейного напряжения U_{BC} отстает на 90° от вектора фазного напряжения U_a , подключаемого к обмотке напряжения ваттметра при измерении активной

мощности.

Для получения реактивной мощности всей цепи необходимо показание ваттметра умножить на $\sqrt{3}$ [34]:

$$Q = U_{BC} I_A \cos(\hat{u}_{BC}, \hat{i}_A) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

Недостатком изображенной схемы является то, что незначительная асимметрия токов в трехфазной цепи приводит к большим погрешностям.

Измерение реактивной мощности с помощью двух приборов. При измерении реактивной мощности с помощью двух одинаковых ваттметров можно использовать схемы, изображенные на рисунке 3.58, а и 3.58, б [28].

На рисунке 3.58, а изображена схема включения ваттметров с искусственной нулевой точкой.

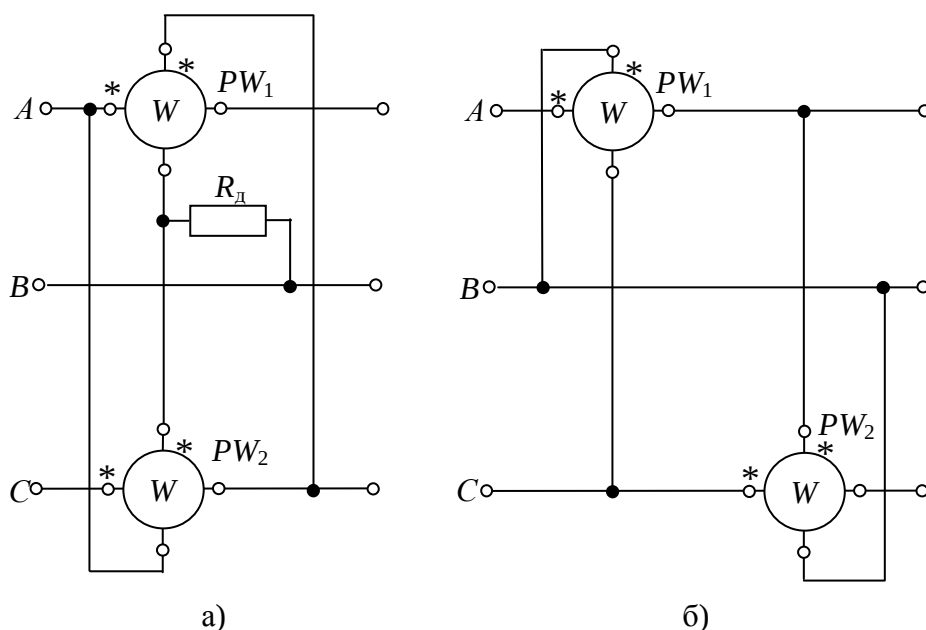


Рисунок 3.58 — Схемы измерения реактивной мощности трехфазного переменного тока двумя ваттметрами:
а — с искусственной нулевой точкой; б — при симметричной нагрузке

Для создания нулевой точки необходимо выполнить условие равенства сопротивлений обмоток напряжений ваттметров и добавочного резистора $R_{\text{д}}$. Реактивная мощность трехфазного потребителя, измеряемая приборами, определится по выражению [28]:

$$Q = \sqrt{3} (P_{W1} + P_{W2}),$$

где P_{W1} и P_{W2} — показания ваттметров.

При наличии симметричной нагрузки реактивную мощность можно измерить с включением ваттметров по схеме, изображенной на рисунке 3.58, б. Для получения мощности трехфазной системы сумму показаний ваттметров необходимо умножить на $\sqrt{3}/2$.

Измерение реактивной мощности методом трех приборов. На рисунке 3.59 изображено (сплошными линиями) включение трех ваттметров PW_1 — PW_3 для измерения реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной це-

пи. Вместо трех ваттметров может применяться трехэлементный прибор.

Для удобства анализа схемы включения ваттметров на этом же рисунке показано включение трех ваттметров (штриховые линии) для измерения активной мощности.

Измерение реактивной мощности с использованием метода трех приборов применяется в трехфазных четырехпроводных цепях, как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

В соответствии с правилами включения ваттметров для измерения реактивной мощности на обмотки напряжения этих ваттметров надо подать напряжения, отстающие на 90° . Такими напряжениями будут линейные напряжения u_{BC} , u_{CA} и u_{AB} .

Определим показания ваттметров:

$$P_{W1} = U_{BC} I_A \cos(\overset{\wedge}{u_{BC}}, \overset{\wedge}{i_A}) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi;$$

$$P_{W2} = U_{CA} I_B \cos(\overset{\wedge}{u_{CA}}, \overset{\wedge}{i_B}) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi;$$

$$P_{W3} = U_{AB} I_C \cos(\overset{\wedge}{u_{AB}}, \overset{\wedge}{i_C}) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi.$$

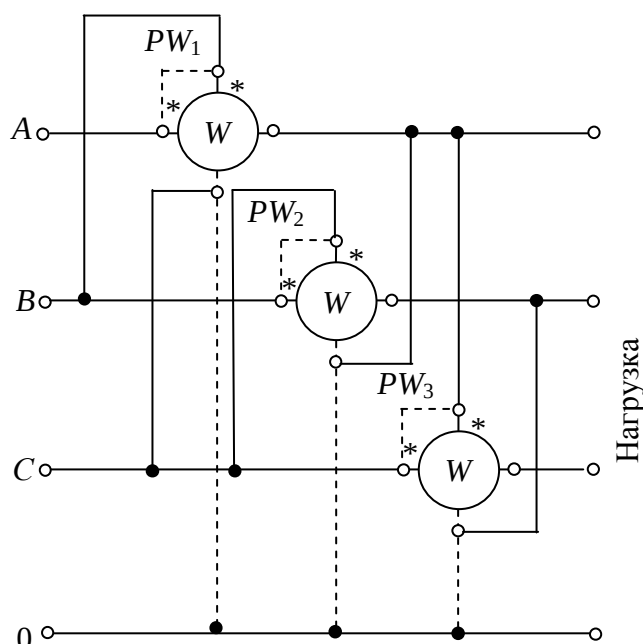


Рисунок 3.59 — Схема подключения ваттметров для измерения реактивной мощности

Окончательно, сумма показаний всех ваттметров будет равна:

$$P_{W\Sigma} = 3U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi.$$

Разделив последнее выражение на $\sqrt{3}$, получим значение реактивной мощности трехфазной цепи:

$$Q = P_{W\Sigma} / \sqrt{3} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi.$$

Конструкция трехэлементных ваттметров соответствует конструкции трехэлементных ваттметров, а необходимая математическая операция, связанная с делением на $\sqrt{3}$, учтена при градуировке приборов.

3.4.4 Счетчики электрической энергии

Счетчик электрической энергии — электроизмерительный прибор для учёта потребляемой электроэнергии в сетях переменного и постоянного тока за определённый промежуток времени.

Первый счётчик электрической энергии для переменного тока был разработан Оливером Шелленбергером в 1888 г., а в 1889 г. «Электрический счётчик для переменных токов» был запатентован Отто Титуц Блати.

В 1894 г. Оливер Шелленбергер создал первый индукционный счётчик

ватт-часов.

В настоящее время в цепях постоянного тока применяют счётчики магнитоэлектрической, электродинамической и ферродинамической систем, а в цепях переменного тока — в основном индукционного типа. Принцип действия ИМ индукционного типа рассмотрен в § 3.4.4.

В качестве примера, рассмотрим принцип действия и устройство бытового индукционного электрического счётчика, рассчитанного на однофазное переменное напряжение 220 В частотой 50 Гц.

На рисунке 3.60 изображена конструкция бытового индукционного однофазного электрического счётчика, а на рисунке 3.61 — схема соединений счётчика.

В схеме счётчика введены следующие обозначения: 1 — электромагнит последовательной цепи (тока), 2 — металлическая пластинка для регулирования угла сдвига фаз между потоками Φ_U и Φ_I , 3 — электромагнит параллельной цепи (напряжения), 4 — счётный механизм, 5 — тормозной магнит (постоянный магнит, который создаёт противодействующий момент, необходимый для обеспечения однозначности измерения), 6 — алюминиевый диск, 7 — нагрузка (например, осветительные лампы накаливания), Φ_U — поток, создаваемый током в цепи напряжения; Φ_I — поток, создаваемый током нагрузки [27].

Счётчик содержит два электромагнита. Обмотка одного электромагнита включена в контролируемую цепь последовательно (токовая обмотка), а другого — параллельно (обмотка напряжения).

Между полюсами электромагнитов расположен алюминиевый диск, который свободно вращается.

Ось диска соединена с отсчётным механизмом счётчика.

Принцип работы прибора следующий.

Протекающие по обмоткам электромагнитов токи создают в сердечниках магнитные потоки.

Под действием этих потоков у алюминиевого диска возникает вращающий момент, пропорциональный потребляемой мощности.

Чем больше расходуется электроэнергия, тем больше ток в контролируемой цепи, а также в токовой обмотке счётчика.

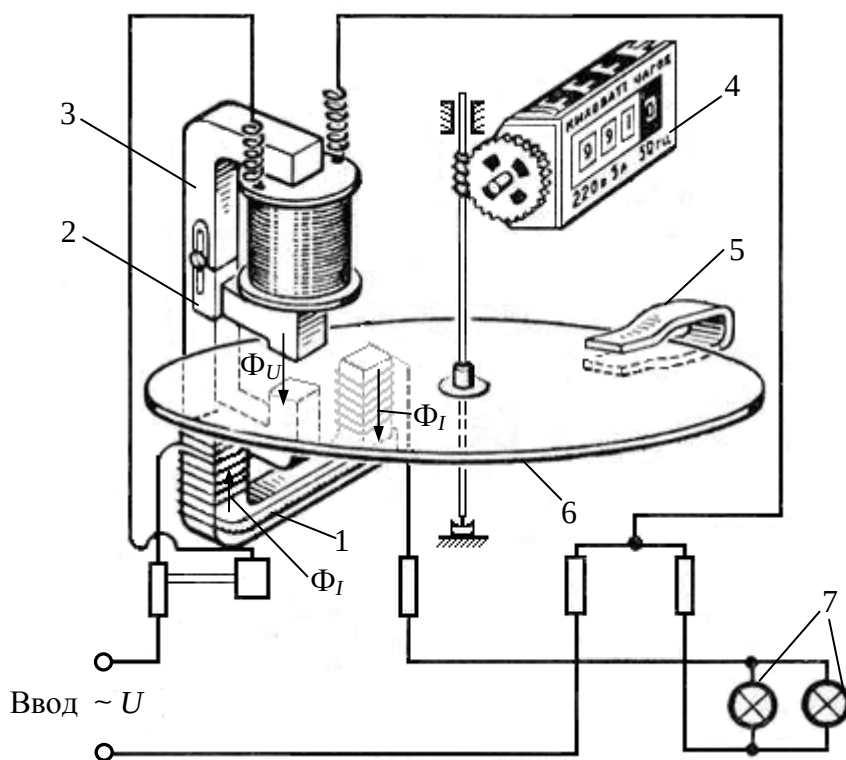


Рисунок 3.60 — Конструкция индукционного однофазного электрического счётчика

Отсчет энергии производится по показаниям счетного механизма — счетчика оборотов. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт·ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика.

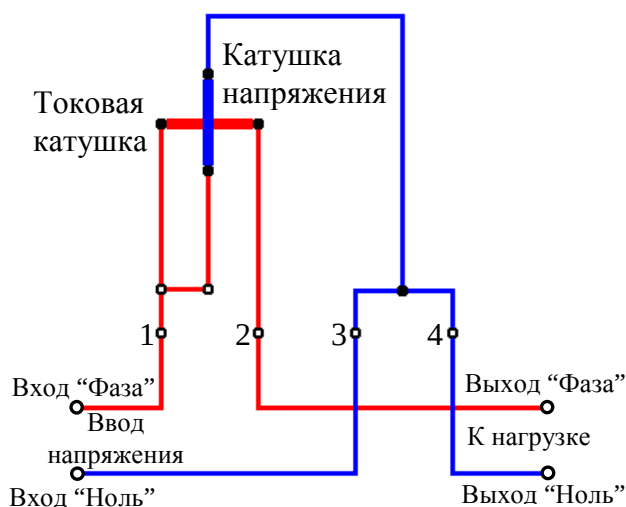


Рисунок 3.61 – Схема соединений однофазного электрического счетчика

Это соотношение, называемое передаточным числом A , указывается на счетчике.

Величина, обратная передаточному числу, т. е. отношение зарегистрированной энергии к числу оборотов диска, называется номинальной постоянной C_n .

Значения величин A и C_n зависят только от конструкции счетного механизма и для данного счетчика остаются неизменными.

Таким образом, величина израсходованной за это время электроэнергии будет пропорциональна

числу оборотов за некоторый промежуток времени, отмечаемого отсчётным устройством [27]:

$$W = C_n N,$$

где W — энергия, израсходованная в цепи за интервал времени Δt ; N — число оборотов диска за этот же интервал времени; C_n — постоянная счетчика.

Трение в механизме индукционного счетчика приводит к появлению погрешностей в показаниях.

Для уменьшения влияния сил трения в счетчиках применяют специальные устройства, называемые компенсаторами трения.

Важным параметром счетчиков электрической энергии переменного тока является чувствительность или порог чувствительности, под которым понимают минимальную мощность, выраженную в процентах от номинальной, при которой диск счетчика начинает безостановочно вращаться.

Согласно ГОСТу, значение чувствительности для счетчиков разных классов точности должно быть не менее 0,5...1,5 %.

Для учёта расхода электрической энергии на подстанциях и промышленных предприятиях используют трёхфазные счётчики, рассчитанные на напряжение 380 В.

На рисунке 3.62 изображена схема соединений трехфазного индукционного счетчика прямого включения для четырехпроводной сети [27].

На этом рисунке введены следующие обозначения: L_1, L_2, L_3 — токовые катушки; L_4, L_5, L_6 — катушки напряжения; 2, 5, 8 — клеммы винтов напряжения; 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11 — клеммы для подключения электропроводки к счетчику. Схемы подключения электросчётчиков, изображенные на рисунках 11.11 и 11.12, называются прямыми, так как в них отсутствуют дополнительные трансформаторы тока.

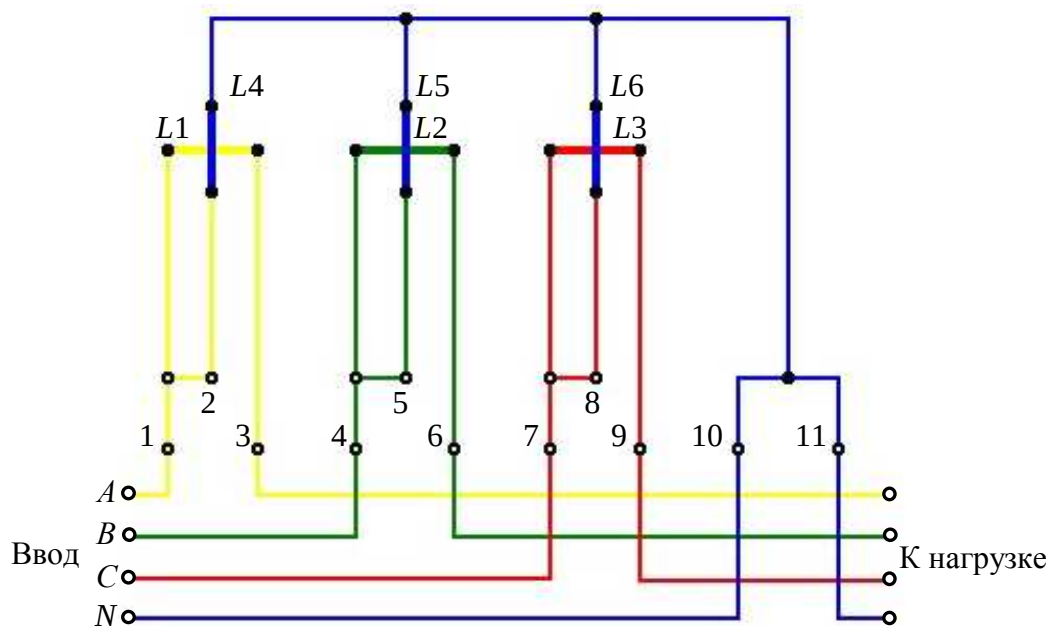


Рисунок 3.62 – Схема соединений трехфазного индукционного счетчика прямого включения для четырехпроводной сети напряжением 380 вольт

3.4.5 Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы для измерения активной мощности в однофазной цепи переменного тока?
2. Как включить ваттметр в цепь переменного тока, если ток нагрузки больше допустимого?
3. Каким образом можно включить ваттметр в высоковольтную сеть переменного тока?
4. Какие существуют методы измерения активной мощности в трехфазной трехпроводной сети?
5. Как измерить активную мощность в трехпроводной сети, если нагрузка несимметричная?
6. В чем особенность измерения мощности при помощи двух ваттметров?
7. Как устроен ваттметр для измерения реактивной мощности в трехфазной сети?
8. Какими косвенными методами можно измерить реактивную мощность?
9. Как включить ваттметр в трехфазную трехпроводную цепь с недоступной нулевой точкой?
10. Каково устройство и назначение индукционного счетчика электрической энергии?

Часть 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

4.1 Анализаторы спектра сигналов

4.1.1 Основные свойства анализа

Анализатор спектра (АС) — это прибор, предназначенный для наблюдения и измерения относительного распределения энергии электрических колебаний в полосе частот. Анализатор спектра позволяет определить амплитуду и частоту спектральных компонент, входящих в состав анализируемого сигнала.

В случае периодического сигнала (или напряжения, изменяющегося по периодическому закону) можно найти его спектральное разложение, то есть представить рядом Фурье [11]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)),$$

где $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$ — постоянная составляющая; $a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(k\omega_1 t) dt$ —

амплитуда косинусной составляющей k -й гармоники ряда Фурье;

$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(k\omega_1 t) dt$ — амплитуда синусной составляющей k -й гармоники

ряда Фурье; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ — основная частота последовательности, образующей периодический сигнал.

Таким образом, периодическая функция $f(t)$ (или периодический сигнал) содержит теоретически бесконечный набор гармоник с частотами $\omega_k = k\omega_1$ ($k=1, 2, 3, \dots$), кратными основной частоте ω_1 и постоянную составляющую.

Каждая гармоника имеет свою амплитуду A_k и начальную фазу φ_k , причем коэффициенты ряда Фурье связаны с последними параметрами следующими соотношениями [11]:

$$a_k = A_k \cos \varphi_k; \quad b_k = A_k \sin \varphi_k,$$

где $A_k = \sqrt{(a_k)^2 + (b_k)^2}$ и, как результат $\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$.

Используя последние выражения, ряд Фурье можно переписать в более удобный вид [11]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_1 t - \varphi_k).$$

Разложение функции на гармонические составляющие, то есть вычисление коэффициентов Фурье, называют спектральным анализом. В свою очередь, воссоздание функции, представленной рядом Фурье, называют спектральным синтезом.

Зависимость амплитуд гармоник ряда Фурье от частоты $A_k(\omega)$ называют амплитудно-частотным спектром, а зависимость начальных фаз гармоник от

частоты $\varphi_k(\omega)$ — фазо-частотным спектром.

Спектр периодических сигналов является линейчатым (дискретным), а не сплошным, как для непериодических сигналов.

Спектр произвольной функции времени $f(t)$ выражается комплексной спектральной плотностью $S(j\omega)$, включающей косинусоидальную S_c и синусоидальную S_s составляющие комплексной спектральной плотности [11]:

$$S(j\omega) = S_c + jS_s = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)(\cos(\omega t) - j\sin(\omega t))dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t}dt.$$

Последнее выражение, называемое прямым преобразованием Фурье, дает возможность по известной функции времени $f(t)$ определить комплексную спектральную плотность $S(j\omega)$.

В случае если известна комплексная спектральная плотность сигнала $S(j\omega)$, то воспользовавшись обратным преобразованием Фурье, можно определить функцию времени $f(t)$ [11]:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t}d\omega.$$

Модуль комплексной спектральной плотности $|S(j\omega)| = \sqrt{S_c^2 + S_s^2}$, представляющий спектр сигнала, выражает зависимость от частоты относительных значений амплитуд гармонических составляющих сигнала, а аргумент комплексной спектральной плотности $\varphi(\omega) = \arctg \frac{S_s}{S_c}$ — выражает зависимость от частоты начальных фаз гармонических составляющих сигнала.

В действительности, вследствие того, что для нахождения спектра невозможно физически выполнить интегрирование по времени в бесконечных пределах, интегрирование функции $f(t)$ выполняют до текущего момента времени и получают характеристику, называемую **текущим спектром**, являющуюся функцией не только частоты, но и времени [11]:

$$S_t(j\omega) = \int_{-\infty}^t f(t)e^{-j\omega t}dt.$$

Если принять, что анализируемый процесс начинается в определенный момент времени, например $t=0$, то текущий спектр можно определить следующим образом:

$$S_t(j\omega) = \int_0^t f(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau.$$

Выбирая достаточно большое времени анализа, оценка спектра, произведенная с помощью АС, будет произведена с наименьшей погрешностью.

4.1.2 Классификация анализаторов спектра

При анализе спектра сигналов используют анализаторы спектра и анализаторы гармоник.

АС предназначены для анализа спектра одного источника сигнала, а анализаторы гармоник — для выявления источников сигналов, работающих в заданном диапазоне частот.

В зависимости от диапазона частот различают АС: низкочастотные, радиочастотные (широкополосные) и оптические.

Низкочастотные АС предназначены для работы в диапазонах частот от нескольких герц до сотен кГц. АС этого типа используются при исследовании характеристик электромагнитных колебаний в полосе низких частот, а также шума и вибраций.

Многофункциональные АС, с подключаемыми внешними вибродатчиками и микрофонами, позволяют измерять уровни шума и вибраций, а также параметры спектральных составляющих сигналов. Примером такого прибора является переносной АС низкочастотного диапазона типа ZET 017-U2.

В отличие от низкочастотных, радиочастотные АС являются широкополосными приборами, работающими в полосе частот от нескольких кГц до сотен ГГц. Приборы этого диапазона используются для исследования характеристик радиотехнических устройств и анализа характеристик радиосигналов.

Современные радиочастотные АС совмещают функции: анализатора спектра; анализатора интерференции; анализатора антенно-фидерных устройств и измерителя мощности. В качестве примера можно назвать радиочастотный анализатор GC7106A.

В связи с развитием технологии телекоммуникаций анализ оптического спектра с помощью АС, становится одним из важнейших видов измерений в волоконно-оптических системах связи.

По характеру анализа различают скалярные АС, дающие информацию только об амплитудах гармонических составляющих спектра, и векторные, предоставляющие еще дополнительную информацию о зависимости фазы каждой гармоники от частоты.

В зависимости от применяемого метода анализа существуют следующие виды анализаторов спектра:

- фильтровые АС, реализующие метод фильтрации;
- АС, реализующие алгоритм ДПФ (дискретного преобразования Фурье);
- дисперсионные АС, реализующие дисперсионно-временной метод;
- рециркуляционные АС, реализующие рециркуляционный метод.

По способу проведения анализа различают:

- АС параллельного действия;
- АС последовательного действия с перестраиваемым по частоте избирательным фильтром (или с перестраиваемым по частоте гетеродином);
- комбинированные АС.

В зависимости от способа обработки измерительной информации и представлению результатов АС делятся на аналоговые и цифровые.

Вследствие того, что класс задач при обработке и представлению измерительной информации возрастает, все в большей мере в настоящее время применяют цифровые АС.

Цифровые анализаторы могут быть построены по схемам последователь-

ного и параллельного действия.

В цифровых анализаторах последовательного действия с помощью преобразователя частоты сигнала происходит перенос составляющих спектра сигнала на промежуточную частоту.

За счет перестройки частоты гетеродина (генератора гармонических колебаний) происходит сканирование полосы частот. Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) выделяет составляющие спектра. С выхода УПЧ с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигналы преобразуются из аналоговой формы в цифровую форму и, далее, подвергаются цифровой обработке и запоминаются для получения спектра. Главным недостатком АС этого типа является большое время получения спектра, что не всегда позволяет отслеживать быстрые изменения спектра радиосигналов при высоком частотном разрешении.

Для ускорения построения спектров применяют цифровые анализаторы параллельного действия. В этих АС аналоговый сигнал с помощью АЦП также преобразуется в цифровую форму, а затем подвергается параллельной обработке с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) с целью получения спектра сигнала.

Дискретное преобразование Фурье представляет собой алгоритм цифрового вычисления гармонических составляющих спектра по заданным дискретным отсчетам аналогового сигнала.

Многokrратно сократить число операций позволяет БПФ, обеспечивающее более скоростное и эффективное цифровое вычисление ДПФ. В основу алгоритма положен принцип разбиения заданной последовательности отсчетов дискретного сигнала на ряд промежуточных последовательностей. Затем определяют спектры этих промежуточных последовательностей и через них находят спектр всего сигнала.

Цифровые БПФ-анализаторы спектра, в сравнении с АС последовательного действия, имеют более высокое разрешение, изменяемое с помощью программным способом, и большую скорость работы. Кроме того, с помощью АС этого типа можно анализировать однократные и импульсные сигналы, а также проводить векторный анализ, то есть вычислять амплитудный и фазовый спектры сигналов.

В настоящее время наиболее совершенным АС является цифровой анализатор спектра реального времени. Этот прибор объединяет все достоинства АС последовательного действия с гетеродином и цифровые методы обработки спектров на основе БПФ. Преобразование аналогового сигнала в цифровой осуществляется во все полосе тракта УПЧ с помощью высокоскоростного АЦП.

4.1.3 Характеристики анализаторов спектра

К основным характеристикам анализаторов спектра относят [11]:

- частотный диапазон;
- уровень собственных шумов;
- негармонические искажения (ложный шум);
- гармонические искажения;

- интермодуляционные искажения;
- фазовый шум;
- динамический диапазон;
- разрешающая способность;
- полоса обзора;
- время анализа.

Частотный диапазон определяет пределы, в которых анализатор спектра выполняет своё функциональное назначение.

Уровень собственных шумов определяет порог, ниже которого анализатор спектра не может различить внешний сигнал и шум.

Негармонические искажения проявляются в виде появления ложных гармоник, вследствие процессов преобразования сигналов в анализаторе спектра.

По своей природе анализатор спектра, усиливая входной сигнал, создаёт в нем **гармонические искажения**.

Еще одним видом нелинейных искажений являются **интермодуляционные искажения**. Эти искажения появляются в результате взаимодействия основной и гармонических частот входного сигнала, приводящего к появлению дополнительных комбинационных частотных составляющих.

Фазовый шум является одним из важнейших критериев оценки частотной стабильности источника сигнала (генератора), используемого в радиочастотном анализаторе спектра. Этот параметр важен при измерении флуктуаций сигнала и в конечном итоге определяет “чистоту” принимаемого сигнала.

Динамический диапазон определяют как отношение максимально измеряемого значения амплитуды к уровню собственных шумов анализатора спектра. Если взять логарифм этого отношения, то динамический диапазон указывают в децибелах.

Другой важной характеристикой АС является разрешающая способность.

Разрешающая способность — это минимальный интервал частот, при котором можно выделить и измерить уровни соседних составляющих спектра. Этот параметр зависит от вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) избирательного усилителя (УПЧ) АС.

Различают статическую и динамическую разрешающую способности. Статическая разрешающая способность соответствует случаю, когда переходные процессы в избирательном усилителе (УПЧ) не искажают формы выбросов на экране анализатора спектра.

Статическая разрешающая способность определяется через значение ширины полосы пропускания избирательного усилителя (УПЧ).

Динамическая разрешающая способность связана с переходными процессами в фильтрующей системе АС, появляющимися при условии, что время переходного процесса в избирательном усилителе (УПЧ) по значению того же порядка, что и время изменения частоты колебаний на входе избирательного усилителя (УПЧ) в пределах полосы его пропускания.

Погрешности в АС в частотной области задают точность определения интервала частот между составляющими спектра.

Так как процесс измерения происходит в динамике, то погрешности измерений зависят от скорости изменения входной частоты и полосы пропускания избирательного контура.

Исходя из допустимых значений погрешностей определения частот и амплитуд составляющих спектра, выбирают скорость анализа в АС.

Полоса анализируемых частот (диапазон частот) указывает частотный диапазон сигналов, которые могут быть исследованы АС. Для повышения точности анализа сигналов в АС имеется возможность исследовать сигналы не во всем диапазоне частот, а в части его, называемой полосой обзора ΔF .

Полоса обзора определяется шириной анализируемого спектра. В теории сигналов под шириной спектра сигнала обычно понимают полосу частот, в которой сосредоточена основная доля ($\approx 90\%$) энергии сигнала [11].

В АС параллельного действия полоса обзора ΔF и полоса пропускания избирательного контура Ω (на уровне 0,707) определяют число каналов $n=\Delta F/\Omega$, а в АС последовательного действия — диапазон качания частоты.

Время анализа характеризует, насколько быстро можно провести анализ спектра сигнала в диапазоне частот. Для АС параллельного действия время анализа t_a может быть определено по формуле [11]:

$$t_a \geq \frac{1}{\Omega} + t_c,$$

где t_c — время, необходимое для съема показаний.

Время анализа в АС последовательного действия время анализа определяется по формуле [11]:

$$t_a \geq A \frac{\Delta F}{\Omega^2},$$

где коэффициент $A > 1$ учитывает динамическую разрешающую способность.

Скорость анализа V_a , используемая в АС последовательного действия, определяется при линейном законе изменения частоты генератора качающей частоты (ГКЧ):

$$V_a = \frac{\Delta F}{t_a}.$$

4.1.4 Фильтровые схемы анализаторов спектра

На рисунке 4.1 изображена структурная схема АС параллельного типа с n -канальным регистрирующим устройством. В этих схемах для анализа спектра сигнала используют совокупность идентичных узкополосных фильтров, каждый из которых настроен на определенную частоту.

Исследуемый сигнал с выхода входного устройства ВУ поступает на n фильтров (резонаторов) $\Phi_1 \dots \Phi_n$, каждый из которых выделяет узкую полосу анализируемых частот.

Напряжения с выходов фильтров поступают на входы n детекторов $D_1 \dots D_n$.

После детектирования напряжения, соответствующие составляющие энергетического спектра входного напряжения фиксируются с помощью n регистрирующих устройств $РУ_1 \dots РУ_n$, в качестве которых используются вольтметры постоянного тока.

Значение времени анализа t_a определяется временем установления напряжения на выходах фильтров Φ_n и временем t_c , необходимым для съема показаний устройств PY_n [1].

Схема АС параллельного типа с одним регистрирующим устройством,

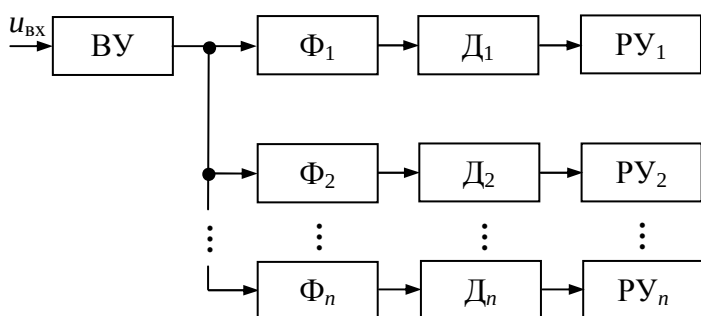


Рисунок 4.1 — Структурная схема анализатора спектра параллельного типа с n -канальным регистрирующим устройством

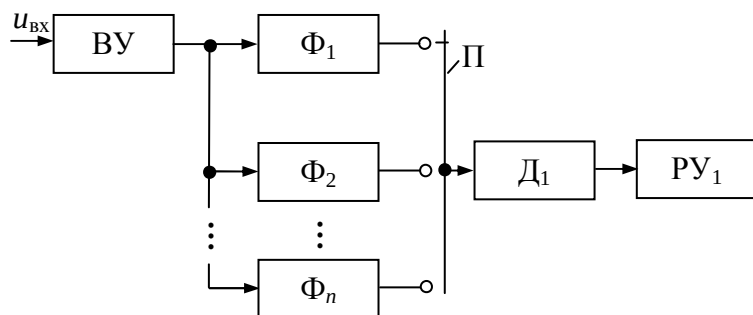


Рисунок 4.2 — Структурная схема анализатора спектра параллельного типа с одним регистрирующим устройством

детектирования напряжения, на PY .

В связи с тем, что невозможно перестроить ПФ в широком диапазоне частот без ухудшения селективных свойств, данная схема характеризуется узким диапазоном и большим временем анализа.

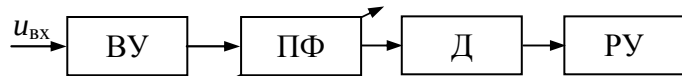


Рисунок 4.3 — Структурная схема анализатора спектра последовательного типа с перестраиваемым полосовым фильтром

на схема анализатора последовательного типа с использованием преобразователя частоты.

Частотная селекция входного сигнала на этой схеме осуществляется с помощью перестраиваемого гетеродина, смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ), обеспечивающего высокую чувствительность и требуемую избирательность.

В случае если избирательность АС является недостаточной, то в АС применяют двух- или трехкратное преобразование по частоте.

изображенная на рисунке 4.2, отличается от схемы, изображенной на рисунке 4.1 тем, что напряжения с n фильтров подаются через переключатель Π на один детектор D и фиксируются одним регистрирующим устройством PY .

На рисунке 4.3 изображена структурная схема анализатора спектра последовательного типа с перестраиваемым по частоте полосовым фильтром ПФ.

Исследуемый сигнал с выхода входного устройства ВУ поступает на перестраиваемый по частоте полосовой фильтр ПФ, который выделяет узкую полосу частот. С выхода ПФ сигнал, содержащий составляющую спектра, поступают на детектор и, после

Для анализа спектра высокочастотного сигнала используются анализаторы спектра с перестраиваемым гетеродином.

На рисунке 4.4 изображе-

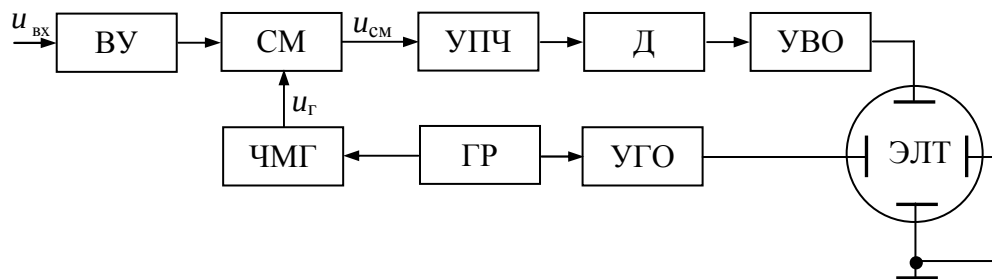


Рисунок 4.4 — Структурная схема анализатора спектра последовательного типа с использованием преобразователя частоты

Принцип работы АС следующий. Входной сигнал $u_{\text{BX}} = \sum_{i=1}^n U_i \sin \omega_i t$ поступает на входное устройство (ВУ) анализатора, где усиливается усилителем или ослабляется аттенуатором до нужного значения, а затем поступает на первый вход смесителя (СМ).

На второй вход СМ подается напряжение $u_r = U_r \sin \omega_r t$ от частотно-модулированного гетеродина (ЧМГ), частота которого изменяется по линейному закону с помощью генератора развертки (ГР). Смеситель — это элемент, в котором осуществляется перемножение сигналов, то есть [1]:

$$\begin{aligned} u_{\text{CM}} &= k_1 u_{\text{BX}} u_r = \left(k_1 \sum_{i=1}^n U_i \sin \omega_i t \right) U_r \sin \omega_r t = k_1 \sum_{i=1}^n U_i U_r \sin \omega_i t \sin \omega_r t = \\ &= k_1 \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n U_i U_r [\cos(\omega_i - \omega_r) t - \cos(\omega_i + \omega_r) t] = \\ &= k_{\text{CM}} \sum_{i=1}^n U_i U_r \cos(\omega_i - \omega_r) t - k_{\text{CM}} \sum_{i=1}^n U_i U_r \cos(\omega_i + \omega_r) t, \end{aligned}$$

где U_r — амплитуда напряжения гетеродина; U_i — амплитуда i -й составляющей напряжения сигнала; k_1 — коэффициент пропорциональности, k_{CM} — коэффициент передачи смесителя.

На выходе смесителя установлен УПЧ, выделяющий сигналы суммарной или разностной частоты гетеродина и входного сигнала. УПЧ настроен на некоторую промежуточную частоту $\Delta\omega$, выбираемую по определенному критерию для выделения сигнала.

Если изменять частоту гетеродина, то можно добиться того, что при некоторых частотах ω_r значение измеренного напряжения будет максимальным, что будет соответствовать частоте настройки УПЧ $\omega_i - \omega_{\text{вар}} = \Delta\omega$. Зная значения частот ω_r и $\Delta\omega$, можно судить о значениях частот составляющих спектра ω_i . Величины амплитуд составляющих спектра будут определяться из выражения [9]:

$$U_{\text{CM. max}} = k_{\text{CM}} U_i U_r,$$

где U_r — амплитуда напряжения генератора; k_{CM} — коэффициент передачи смесителя.

С выхода УПЧ сигнал поступает на детектор Д и, далее на широкополос-

ный усилитель вертикального отклонения (УВО) и индикатор, выполненный на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). ЭЛТ в анализаторе спектра выполняет роль индикатора, на котором отображается анализируемый спектр.

Одновременно с изменением частоты гетеродина луч отклоняется по горизонтали, для чего напряжение с генератора развертки подается на усилитель горизонтального отклонения (УГО).

На рисунке 4.5 изображена схема комбинированного анализатора спектра, совмещающего характеристики АС параллельного и последовательного действия.

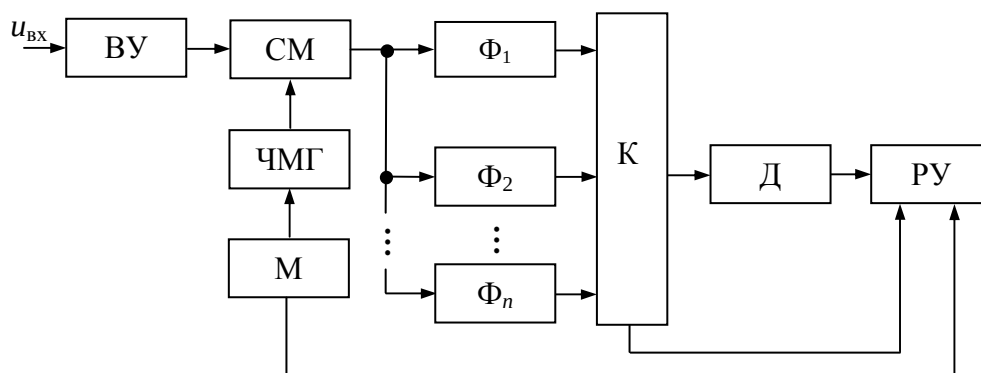


Рисунок 4.5 — Структурная схема анализатора спектра комбинированного типа

Данная схема анализатора обладает в n раз уменьшенным временем анализа и простотой исполнения.

В этой схеме анализируемый сигнал с выхода входного устройства ВУ поступает на первый вход смесителя СМ.

На второй вход СМ поступает сигнал с выхода частотно-модулированного гетеродина (ЧМГ), частота которого изменяется по определенному закону с помощью модулятора М.

Результирующий сигнал промежуточной частоты с выхода смесителя анализируется n резонаторами $\Phi_1 \dots \Phi_n$.

Выходное напряжение с резонаторов поступает через коммутатор К и детектор Д на регистрирующее устройство РУ.

Работа регистрирующего устройства синхронизирована с работой коммутатора и модулятора М.

На рисунке 4.6, в качестве примера, изображен анализатор спектра сигнала С4-74.



Рисунок 4.6 — Анализатор спектра С4-74

Прибор позволяет производить панорамный обзор работающих в эфире различных радиоэлектронных средств, а также проводить исследование структуры сигналов и измерение основных характеристик с высокой точностью в реальном масштабе времени.

Основные характеристики прибора [70]:

- диапазон частот 300 Гц...300 МГц;
- полоса обзора 20 Гц...150 МГц (с кратностью 1, 2, 5);
- полоса пропускания на уровне 3 дБ 3 Гц...300 кГц;
- пределы измеряемых напряжений 300 нВ...3 В;
- пределы основной погрешности аттенюатора не более: $\pm 0,5$ дБ (в пределах от 0 до -60 дБ); ± 1 дБ (до -70 дБ);
- пределы основной погрешности измерения частоты $\pm(10-7f+1)$;
- динамический диапазон 70...80 дБ.

4.1.5 Дисперсионные анализаторы спектра

Анализ спектра сигналов в реальном времени можно осуществить с помощью дисперсионно-временного метода.

Структурная схема дисперсионного анализатора спектра изображена на рисунке 4.7 [37].

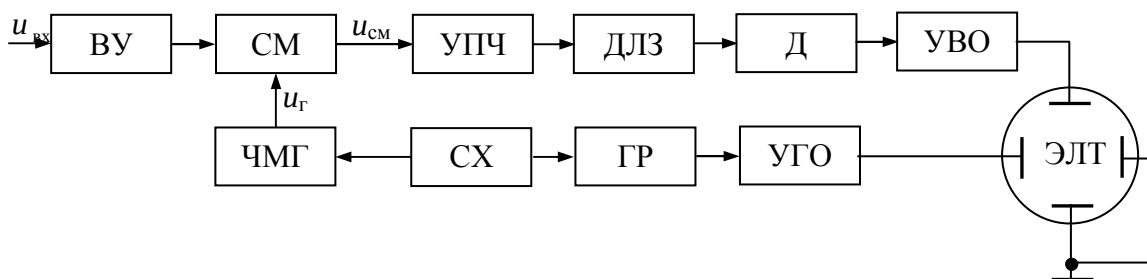


Рисунок 4.7 — Структурная схема дисперсионного анализатора спектра

Анализируемый сигнал и вспомогательный сигнал от частотно-модулированного генератора (ЧМГ) с линейной частотной модуляцией поступают на смеситель (СМ).

Одновременно с изменением частоты гетеродина луч отклоняется по горизонтали, для чего напряжение с генератора развертки (ГР) подается на усилитель горизонтального отклонения (УГО).

Запуск ГР и ЧМГ осуществляется с помощью синхронизатора (СХ). Анализируемый спектр отображается на ЭЛТ. УПЧ выделяет область частот, совпадающую с рабочим диапазоном дисперсионной линии задержки (ДЛЗ). С выхода УПЧ сигнал поступает на ДЛЗ.

Свойством ДЛЗ является то, что различные частотные составляющие спектра распространяются в ней с неодинаковыми фазовыми скоростями, задерживаясь линией на неодинаковые интервалы времени.

В результате на выходе ДЛЗ прилучим отклик, огибающая которого является спектральной плотностью (преобразованием Фурье) исследуемого сигнала. Сигнал огибающей отклика ДЛЗ, полученный с помощью детектора Д, усиливается широкополосным усилителем вертикального отклонения (УВО) и далее подается на ЭЛТ.

Дисперсионный анализатор спектра позволяет в реальном масштабе времени исследовать амплитудный и фазовый спектры быстро меняющихся во времени сигналов, одиночных сигналов и коротких радиоимпульсов.

4.1.6 Рециркуляционные анализаторы спектра

В целях получения высокой разрешающей способности в узкой полосе частот применяют анализаторы спектра рециркуляционного (интерференционного) типа.

Схема этого АС этого типа отличается от схемы анализатора спектра параллельного действия тем, что спектральные составляющие сигнала разделяются гребенчатым фильтром с переменными параметрами (ГФПП). Для понимания принципа работы АС вначале рассмотрим принцип работы гребенчатого фильтра.

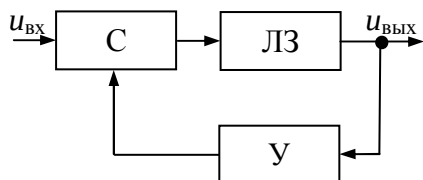


Рисунок 4.8 — Структурная схема гребенчатого фильтра

На рисунке 4.8 изображена схема гребенчатого фильтра (ГФ), состоящего из: сумматора (С); компенсирующего усилителя (У) и линии задержки (ЛЗ). АЧХ гребенчатого фильтра изображена на рисунке 4.9 [37].

При поступлении на вход ГФ сигнала, имеющего частоту $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$, где k — целое

число, напряжение на входе фильтра и на выходе ЛЗ будут синфазными, а сам фильтр будет эффективно накапливать энергию сигнала.

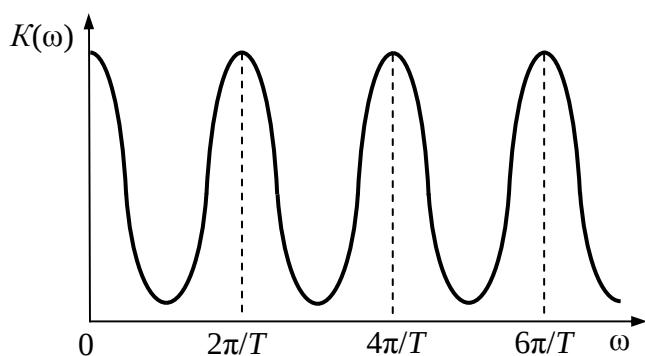


Рисунок 4.9 — АЧХ гребенчатого фильтра

Если на вход ГФ будет поступать сигнал с частотой $\omega_0 = \omega_k + \Delta\omega$, где $\Delta\omega < \frac{2\pi}{T}$, то ГФ уже не будет эффективно накапливать энергию сигнала.

Для компенсации разбаланса фаз задержанному сигналу необходимо сообщить опережение по фазе на величину $\Delta\omega T$.

Эта задача решается в ГФПП. Структурная схема ГФПП изображена на рисунке 4.10.

В этом фильтре для получения синфазных напряжений на входе фильтра и на

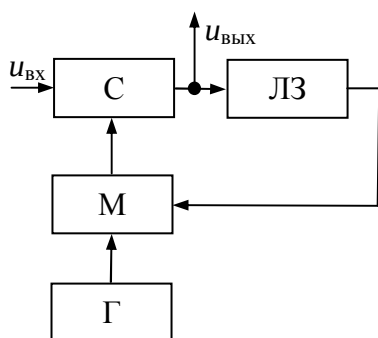


Рисунок 4.10 — Структурная схема гребенчатого фильтра с переменными параметрами

выходе ЛЗ необходимо в определенный момент времени τ напряжение в цепи обратной связи сдвинуть по частоте на $\Omega = \frac{2\pi}{T}$, так что в интервале частот анализа от ω_k до $\omega_k + \Omega$ будет выполняться равенство $\Omega\tau = \Delta\omega T$.

Если при каждой циркуляции сигнала перед суммированием выполнить сдвиг задержанного сигнала по частоте на величину Ω , то момент синфазности напряжения на входе фильтра и на выходе линии задержки

останется прежним.

Сдвиг по частоте на величину Ω осуществляется с помощью однополосного модулятора (М), на один вход которого подается напряжение с выхода ЛЗ, а на другой — с гетеродина (Г).

Рост количества циркуляций сигнала в фильтре приводит к все более точному приближению огибающей отклика фильтра к виду $\frac{\sin t}{t}$ и увеличению разрешающей способности АС по частоте.

Точность работы АС можно оценить шириной отклика на воздействие гармонического сигнала на уровне 0,707 по выражению [37]:

$$\Delta f = \frac{0,89\Delta F}{(p+1)},$$

где $\Delta F = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$ — полоса частот анализа или частота сдвига; p — количество циркуляций.

Таким образом, для регулирования разрешающей способности АС следует задать необходимое количество циркуляций.

Например, для того, чтобы реализовать анализатор спектра с полосой обзора 100 кГц и разрешающей способностью 10 Гц необходимо в линии задержки с $T=10^{-5}$ с осуществить порядка 8900 циркуляций.

На рисунке 4.11 изображена структурная схема анализатора спектра рециркуляционного типа [37].

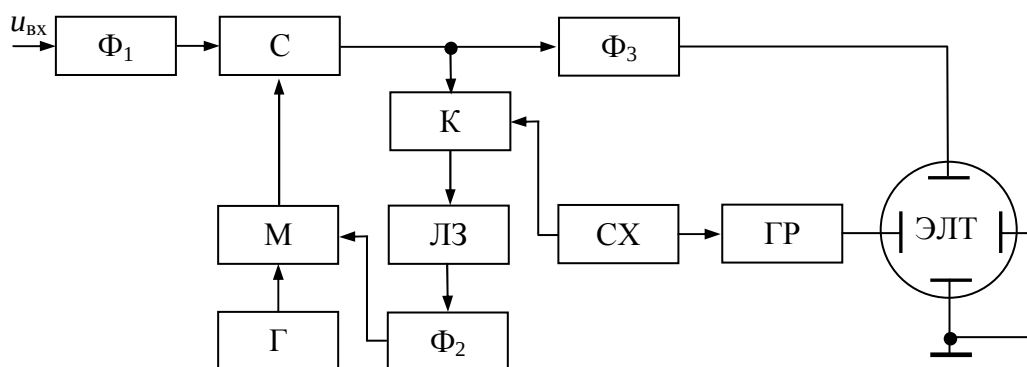


Рисунок 4.11 — Структурная схема анализатора спектра рециркуляционного типа

На этой схеме сигнал подается фильтр Φ_1 с полосой пропускания, равной полосе обзора. С выхода фильтра сигнал подается на сумматор (С) ГФПП. Фильтры Φ_2 и Φ_3 предназначены для согласования работы элементов схемы.

Полоса обзора АС определяется временем задержки ЛЗ. Спектральные составляющие сигнала разделяются ГФПП, состоящим из: сумматора (С), однополосного модулятора (М), гетеродина (Г) и линии задержки (ЛЗ).

Спектр анализируемого сигнала высвечивается на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) после того, как синхронизатор (СХ) по окончании заданного числа циркуляций выдает управляющий сигнал на ключ (К), разрывающий цепь обратной связи ГФПП.

4.1.7 Контрольные вопросы

1. Для каких целей измерений предназначен анализатор спектра?
2. В каких случаях для анализа сигнала применяют преобразование Фурье?
3. Как рассчитывается спектр непериодической функции?
4. Каковы основные характеристики анализаторов спектра?
5. В чем заключается принцип работы фильтровых анализаторов спектра?
6. Как определяется разрешающая способность анализатора спектра?
7. Как устроен автоматический анализатор спектра с использованием преобразования частоты?
8. Из каких элементов состоит анализатор спектра дисперсионного типа?
9. Какие преимущества и недостатки имеют анализаторы спектра рециркуляционного типа?
10. Каков принцип работы анализаторов спектра рециркуляционного типа?

4.2 Измерители нелинейных искажений и анализаторы гармоник

4.2.1 Основные свойства анализа нелинейных искажений

Нелинейные искажения вызываются нелинейностью системы обработки и передачи сигнала. Эти искажения вызывают появление в спектре выходного сигнала составляющих, отсутствующих во входном сигнале. Оценка искажений сигнала (напряжения) осуществляется двумя коэффициентами: коэффициентом гармоник (K_r) и коэффициентом нелинейных искажений ($K_{ни}$). В Европейском стандарте качества сетевого электропитания (EN 62040-3) коэффициент гармоник K_r обозначают через общий коэффициент гармоник — THDr (англ.: Total Distortion compared to the RMS value of the total waveform).

На практике коэффициент гармоник рассчитывается по формуле [21]:

$$K_r = \text{THDr} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2}},$$

где U_i — действующее значение напряжения i -й гармоники.

Диапазон значений K_r лежит в пределах от 0 до 1. Коэффициент гармоник показывает, какая доля энергии содержится в старших гармониках, по сравнению с энергией, содержащейся в первой гармонике.

Наряду с коэффициентом гармоник K_r , для оценки степени отличия формы колебательного процесса от синусоидального, используется коэффициент нелинейных искажений $K_{ни}$ или коэффициент гармонических искажений — THDf (англ.: total harmonic distortion factor). В силовой электротехнике рассматривают термины, характеризующие нелинейные искажения одного конкретного сигнала, например нелинейные искажения выходного тока (THDI) или выходного напряжения (THDU). Определение коэффициента нелинейных искажений $K_{ни}$ идентично базовому определению коэффициента гармонических искажений THDf, определенному в Европейском стандарте качества сетевого электропитания (EN 62040-3). Коэффициент нелинейных искажений $K_{ни}$ показывает, какая доля энергии содержится в старшей гармонике, по сравнению с полной энергией колебания. Коэффициент нелинейных искажений по напряжению рассчитывается по выражению [21]:

$$K_{ни} = \text{THDf} = \text{THDU} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1},$$

где U_1 — действующее значение напряжения первой гармоники.

Диапазон значений $K_{ни}$ лежит в пределах от 0 до ∞ .

Коэффициенты K_r и $K_{ни}$ являются безразмерными, но обычно умножаются на 100 % для получения значений в процентах (%).

На практике измерители нелинейных искажений определяют коэффициент

гармоник, а коэффициент нелинейных искажений рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{ни}} = \frac{K_{\text{г}}}{\sqrt{1 - K_{\text{г}}^2}}.$$

Если сигнал содержит незначительные величины гармоник, то можно считать, что $K_{\text{ни}} \approx K_{\text{г}}$.

При анализе цепей (сети), содержащих высшие гармоники, не следует путать понятие “cos φ” с коэффициентом мощности. Под термином “cos φ” понимается [10]:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1},$$

где P_1 и S_1 — активная и полная мощности по основной частоте. В свою очередь в реальных электрических системах, содержащих гармоники, коэффициент мощности (англ.: Power Factor — PF) определяется как [21]:

$$\text{PF} = \frac{P}{S},$$

где $P = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cos \varphi_i$ — активная мощность сигнала, представляющая собой сумму активных мощностей гармоник i -го порядка, причем φ_i — сдвиг фаз между

напряжением и током соответствующей i -й гармоники; $S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2\right)}$ — полная мощность сигнала.

Реактивная мощность сигнала, содержащего гармоники, определяется для основной частоты $Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1$. Поэтому при наличии гармоник полная мощность определяется следующим образом [10]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2},$$

где D — мощность искажения, определяемая через последнее выражение, как

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

Наибольшее применение для измерения нелинейных искажений получили измерители нелинейных искажений, предназначенные для измерения степени искажения формы кривой, т. е. отличия формы сигнала от гармонической.

Для измерения коэффициента нелинейных искажений получили распространение спектральный и интегральный методы.

При спектральном методе измерения используют селективные вольтметры или анализаторы спектра. Процесс измерения заключается в измерении уровня высших гармоник по отношению к значению первой гармоники (U_1) сигнала. Данный метод позволяет определить роль каждой гармоники в отдельности и занимает много времени. Модификацией спектрального метода является метод подавления основной частоты. Данный метод заключается в раздельном измерении среднего квадратического значения сигнала и среднего квадратического значения высших гармоник этого же сигнала.

При использовании АС измеряют действующие значения всех гармоник, а

затем рассчитывают коэффициент нелинейных искажений.

На рисунке 4.12 изображена структурная схема измерителя нелинейных искажений, реализующего интегральный метод.

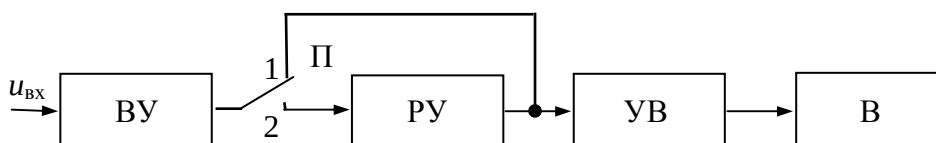


Рисунок 4.12 — Структурная схема измерителя нелинейных искажений

Исследуемое напряжение $u_{\text{вх}}$ подается на входное устройство (ВУ) состоящее из аттенюатора и предварительного усилителя.

С выхода ВУ, в зависимости от положения переключателя П, напряжение подается либо на устройство выходное (УВ), состоящее из аттенюатора и согласующего усилителя, либо на режекторный усилитель (РУ). В своем составе режекторный усилитель имеет заграждающий фильтр, настраиваемый на первую гармонику.

Задача этого фильтра состоит в исключении первой гармоники из спектра сигнала. Режекторный усилитель должен быть перестраиваемым в пределах диапазона частот измерителя. После выходного устройства сигнал подается на вольтметр (В), измеряющий действующее значение напряжения. Шкала вольтметра проградуирована в единицах измеряемого значения $K_{\text{ни}}$.

При первом положении переключателя П показания вольтметра пропорциональны $u_{\text{вх}}$ [11]:

$$\alpha_1 = K_1 U_{\text{вх}} = K_1 \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots},$$

где K_1 — коэффициент передачи аттенюатора входного устройства. Значение параметра α_1 устанавливают аттенюатором входного устройства всегда на определенную отметку шкалы.

При втором положении переключателя П режекторный усилитель, настроенный на частоту первой гармоники, подавляет ее и показания вольтметра пропорциональны напряжению высших гармоник [11]:

$$\alpha_2 = K_1 K_2 \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots},$$

где K_2 — коэффициент усиления режекторного усилителя.

Окончательно коэффициент нелинейных искажений определится по следующему выражению [11]:

$$K_{\text{ни}} \approx \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots}} = \frac{\alpha_2}{K_2 \alpha_1}.$$

Основными источниками погрешности измерения коэффициента гармоник являются погрешность вольтметра и неточность настройки избирательного усилителя.

Для повышения точности измерений и уменьшения времени на их проведение применяются автоматические измерители нелинейных искажений.

В современных измерителях нелинейных искажений измерение производится автоматически.

4.2.2 Автоматический измеритель нелинейных искажений

На рисунке 4.13 изображена структурная схема автоматического измерителя нелинейных искажений [37].

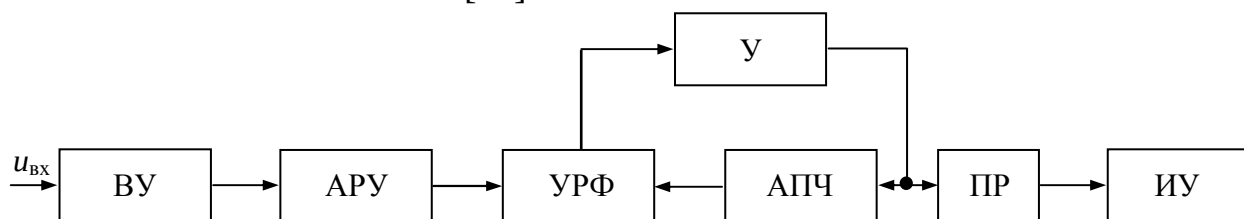


Рисунок 4.13 — Структурная схема автоматического измерителя нелинейных искажений

На этой схеме исследуемый сигнал через входное устройство (ВУ) подается в блок автоматической регулировки усиления (АРУ). На выходе АРУ поддерживается постоянное значение напряжения при изменениях исследуемого сигнала. С выхода АРУ напряжение поступает на усилитель с режекторной фильтрацией (УРФ), в котором осуществляется автоматическое подавление первой гармоники. С помощью блока автоматической подстройки частоты (АПЧ) управляется частота режекции УРФ таким образом, чтобы напряжение на его выходе стало минимальным. С выхода УРФ напряжения высших гармоник поступают на вход усилителя У, а затем на подаются для измерения на вольтметр среднего квадратического значения, состоящий из преобразователя (ПР) и измерительного устройства (ИУ). К основным характеристикам измерителей нелинейных искажений относят: предел измерения $K_{ни}$; диапазон частот входного сигнала; ослабление основной частоты; погрешность измерения $K_{ни}$; остаточные искажения, обусловленные нелинейными искажениями и шумами прибора.

На рисунке 4.14, в качестве примера, изображен измеритель нелинейных искажений СК6-13.



Рисунок 4.14 — Измеритель нелинейных искажений СК6-13

Прибор СК6-13 предназначен для автоматического измерения коэффициента гармоник четырехполюсников при работе со встроенным генератором и среднеквадратического значения напряжения. Этот прибор обеспечивает автоматическое и ручное переключение пределов измерения, а также имеет воз-

возможность запоминания значений частоты и напряжения генератора.

Основные технические характеристики прибора СК6-13 [71].

1. Диапазон частот:

— при измерении коэффициента гармоник: 10 Гц...120 кГц;

— при измерении напряжения: 10 Гц...600 кГц.

2. Диапазон измерения:

— коэффициентов гармоник: 0,003 — 100 %;

— напряжения: 100 мкВ...100 В.

3. Диапазон входного напряжения при измерении гармоник: 0,1...100 В.

4. Максимальное значение основной погрешности измерения коэффициента гармоник во всем диапазоне частот прибора:

— при уровне входного сигнала 0,1...1, В: $\pm (0,1 K_{гд} + 0,07)$ при $K_{г} \leq 30 \%$;
 $\pm 0,2 K_{гд}$ при $K_{г} > 30 \%$;

— при уровне входного сигнала 1...100, В: $\pm (0,1 K_{гд} + 0,05)$ при $K_{г} \leq 30 \%$;
 $\pm 0,2 K_{гд}$ при $K_{г} > 30 \%$,

где $K_{гд}$ — действительное значение измеренного коэффициента гармоник, %.

5. Пределы основной погрешности измерения напряжения: $\pm (0,1 U_x + 10^{-5})$ (в диапазоне 10...100 Гц); $\pm (0,025 U_x + 10^{-5})$ (в диапазоне 100 Гц...100 кГц); $\pm (0,05 U_x + 10^{-5})$ (в диапазоне 100...600 кГц), где значение U_x , В — значение измеряемого напряжения.

4.2.3 Анализаторы гармоник

Анализатор гармоник (АГ) — это прибор, применяемый для измерения действующих значений гармоник напряжения или тока фиксированной частоты. В технике электрических измерений основное назначение этих приборов состоит в контроле качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения посредством осуществления мониторинга, регистрации и анализа основных показателей электрических сетей. Появление гармоник в сети является результатом нелинейности нагрузок. Нагрузка называется нелинейной, если форма тока, потребляемого нагрузкой, отличается от формы питающего напряжения. В настоящее время практически все промышленное оборудование, бытовые приборы и источники бесперебойного питания являются нелинейной нагрузкой. Кроме того, нелинейные нагрузки могут возникать из-за явления насыщения сердечников силовых трансформаторов. С каждым годом количество нелинейных нагрузок возрастает. Результатом прохождения тока сети через нелинейную нагрузку будет появление в нем дополнительных гармонических составляющих.

Вследствие того, что сопротивление проводника растет с увеличением частоты, появившиеся гармоники в токе вызывают дополнительные электрические потери в сети. Кроме того, проходящие по сети гармоники ухудшают качество электрической энергии и являются причиной [72]:

— перегрузки сетей из-за увеличения действующей величины тока;

— перегрузки нулевых рабочих проводников из-за суммирования гармоник 3-го порядка, создаваемых однофазными нагрузками;

— перегрузки, вибрации и старения электрических машин и аппаратов;

- преждевременное старение конденсаторов в схемах компенсаторов реактивной мощности;
- дополнительных помех для систем телекоммуникаций.

Поставщики электрической энергии контролируют нечётные гармоники вплоть до 15-го порядка, так как они вносят наибольший вред в качество электрической энергии в трёхфазных сетях. В практике измерений, для более эффективной компенсации, учитывают гармоники до 30-го порядка, а гармониками выше 50-го порядка пренебрегают ввиду их малости.

Современные АГ позволяют измерять значения:

- напряжения и тока;
- коэффициента нелинейных искажений (коэффициента гармоник);
- активной и реактивной мощностей;
- коэффициента мощности;
- частоты;
- амплитуд гармоник;
- фазы основной частоты и гармоник.

Кроме того, приборы этого типа могут:

- регистрировать и хранить события: провалы, выбросы и прерывания тока и напряжения;
- отображать формы и общие характеристики сигналов в режиме реального времени в виде осциллограммы на дисплее;
- осуществлять периодический и статистический анализ результатов.

Для анализа высокочастотных колебаний и анализа одиночных импульсов применяются АГ параллельного действия. Анализ низкочастотных колебаний может осуществляться с помощью фильтровых АГ последовательного действия с перестраиваемым по частоте избирательным фильтром или гетеродином.

Структурная схема АГ с перестраиваемым по частоте избирательным фильтром имеет та кой же вид, что и приведенная на рисунке 4.3. Принцип работы АГ этого типа тоже, что и у АС. Исследуемое напряжение подается через входное устройство на фильтр Ф, пропускающий сигнал только с той частотой, на которую он в данный момент настроен. Далее фильтр настраивается последовательно на частоты гармоник исследуемого сигнала и производится замер их действующего значения напряжения. На низких частотах вместо детектора и регистрирующего устройства используется цифровой мультиметр или электронный вольтметр, состоящий из выпрямителя и магнитоэлектрического ИМ.

Анализаторы гармоник с перестраиваемым гетеродином отличаются от анализаторов гармоник с перестраиваемым фильтром большей точностью и большей чувствительностью.

Принцип работы АГ этого типа сходен с принцип работы АС последовательного типа с использованием преобразования частоты. Частотная селекция входного сигнала осуществляется с помощью перестраиваемого гетеродина, смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ), обеспечивающего высокую чувствительность и требуемую избирательность. Действующие значения напряжений гармоник измеряются теми же блоками, что и в предыдущей схеме АГ.

На рисунке 4.15, в качестве примера, изображен — 3-х фазный анализатор мощности и гармоник на 1000А (3000А) типа Extech 382096, предназначенный для измерения мощности и анализа однофазных трехфазных проводных систем. Анализатор имеет дисплей, позволяющий просматривать на одном экране до 35 параметров и представлять данных в виде диаграмм. На ЖК-дисплее анализатора могут одновременно отображаться гармоники (в порядке от 1 до 99) и форма сигнала с указанием пиковых значений [72]. К сети прибор подключается с помощью токоизмерительных клещей. Анализатор мощности и гармоник типа Extech 382096 позволяет [72]:



Рисунок 4.15 — 3-х фазный анализатор мощности и гармоник на 1000А (3000А) типа Extech 382096

- измерять и отображать на дисплее значения: силы тока и напряжения; активной мощности; полной мощности; реактивной мощности; коэффициента мощности (PF); максимальную нагрузку с возможностью задания периода измерений; активной и реактивной энергий;

- проводить анализ коэффициента гармонических искажений (THDf) и калькуляцию значений несимметричного тока через нейтральную линию (In);

- измерять и отображать соотношение несимметричных напряжения или тока (VUR, VIR) и коэффициент несимметричности;

- улавливать порядка 28 переходных явлений (включая провалы, выбросы и перебои) с программируемым порогом (%).

4.2.4 Контрольные вопросы

1. В чем причина возникновения нелинейных искажений?
2. Каким образом определяется коэффициент гармоник?
3. Как определить коэффициент нелинейных искажений, зная значение коэффициент гармоник?
4. Какие существуют методы определения коэффициента нелинейных искажений?
5. В чем заключаются принцип действия измерителя нелинейных искажений?
6. Каков принцип действия автоматического измерителя нелинейных искажений?
7. В чем причина появления гармонических искажений в электрических системах?
8. Для каких целей применяются анализаторы гармоник?
9. Каков принцип действия анализатора гармоник?
10. Какие основные параметры измеряют анализаторы гармоник?

4.3 Электронные осциллографы

4.3.1 Назначение электронного осциллографа

Электронный осциллограф — это прибор, служащий для наблюдения и измерения параметров электрических сигналов.

Среди электронных приборов осциллограф наиболее универсальный прибор для исследования электрических сигналов, при работе с которым исследователь получает информацию об электрических процессах в наиболее удобной для восприятия форме.

Слово “осциллограф” произошло от латинского слова “осцилум” — колебание и греческого слова “графо” — пишу. Таким образом, осциллограф в буквальном смысле — это прибор для записи (регистрации) колебаний. Основное назначение осциллографа заключается в воспроизведении в графическом виде различных электрических колебаний (осциллограмм).

Кроме того, с помощью осциллографа, используя специальные преобразователи неэлектрических величин в пропорциональные им напряжение или ток, можно исследовать различные неэлектрические процессы.

К недостаткам прибора можно отнести небольшую точность (2...5 %) и относительно большую трудоемкость измерений. Если, специализированные приборы измеряют обычно какой-то один параметр сигнала и рассчитаны только на сигнал определенной формы, то с помощью осциллографа можно измерять практически все параметры любых сигналов.

Осциллограф позволяет осуществить измерение различных параметров сигнала: амплитуды; длительности импульса; частоты (периода); глубины модуляции.

Этот прибор может использоваться: для анализа спектра; измерения мощности; исследования и измерения фазовых сдвигов (по фигурам Лиссажу). Осциллограф позволяет найти мгновенные значения в любой точке исследуемого напряжения.

Для получения осциллограмм, отображающих быстрые процессы, используются электронно-лучевые осциллографы, в которых под воздействием электрического сигнала происходит отклонение электронного пучка, вызывающего свечение люминесцирующего экрана.

Существуют многолучевые и многоканальные осциллографы. В многолучевых осциллографах применяются специальные многолучевые электронные трубки, а в многоканальных — специальные коммутаторы электрических сигналов, позволяющие наблюдать несколько сигналов на экране однолучевой ЭЛТ.

Электронные осциллографы можно классифицировать по следующим признакам:

- по количеству одновременно исследуемых сигналов;
- по ширине полосы пропускания;
- по характеру исследуемых сигналов: непрерывных; импульсных многократных и импульсных однократных;
- по точности воспроизведения формы сигнала,

— по точности измерения временных интервалов и амплитуд.

Существуют следующие виды электронно-лучевых осциллографов: универсальные, скоростные, сверхскоростные (стробоскопические), запоминающие и специальные.

Для исследования гармонических и импульсных сигналов применяются универсальные электронно-лучевые осциллографы имеющие ширину полосы пропускания от нуля до сотен мегагерц и диапазон исследуемых сигналов от единиц микровольт до сотен вольт.

Скоростные осциллографы, характеризуемые полосой пропускания до единиц гигагерц, применяются для наблюдения и регистрации однократных и повторяющихся импульсов и периодических колебаний.

Сверхскоростные осциллографы применяются для регистрации периодических сигналов в полосе частот от нуля до десятков гигагерц.

При исследовании одиночных импульсов или периодических импульсных процессов с большой скважностью, а также других сигналов, требующих частоту развертки 5...10 Гц, необходимо применять запоминающие осциллографы.

Цифровые осциллографы обладают более широкими возможностями по сравнению с аналоговыми осциллографами. Ввиду сравнительно большой стоимости, эти приборы они нашли свое применение при проведении измерений в научной сфере.

4.3.2 Устройство электронно-лучевой трубки

Одним из основных элементов электронного осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). На рисунке 4.16. изображена структурная схема электронно-лучевой трубки. ЭЛТ состоит из следующих элементов: 1— подогреватель, 2— катод, 3 — модулятор, 4 — первый анод, 5 — фокусирующий электрод, 6, 7 — две пары отклоняющих пластин, 8 — второй анод, 9 — люминесцирующий экран [14].

ЭЛТ состоит из источников электронов, системы формирования узкого электронного пучка, системы его отклонения в направлении осей X и Y и люминесцирующего экрана. Источником электронов является нагретый катод. Оксидный катод 2 с подогревателем 1, модулятором 3 и первым анодом 4 составляют катодный узел. Такая конструкция позволяет не только получить электронный пучок, но и осуществить его предварительную фокусировку и модуляцию интенсивности. Катод представляет собой металлический цилиндр, на дно которого нанесен слой активной массы, состоящей из окиси бария, стронция и т.п. Внутри цилиндра расположена спираль — подогреватель, свернутая из вольфрамовой проволоки. Ток, проходя через подогреватель, накаляет его.

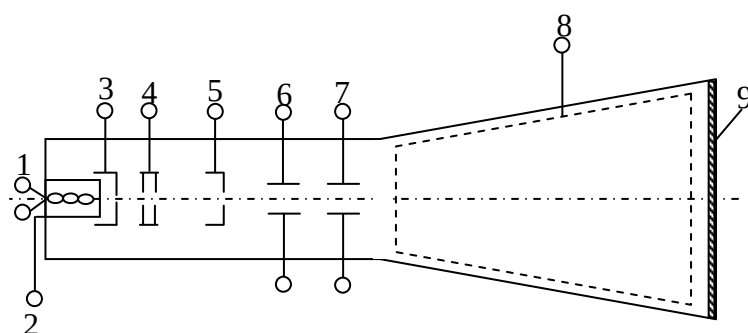


Рисунок 4.16 — Структурная схема электронно-лучевой трубки

Тепло от подогревателя передается никелевому цилиндру и разогревает активный слой, который выделяет атомарный слой металлического бария, являющегося источником свободных электронов. Подогрев катода осуществляется с помощью переменного тока $0,1 \dots 1$ А при напряжении 6,3 В.

Для управления интенсивностью электронного пучка рядом с катодом располагается модулятор 3, представляющий собой диск с малым отверстием. Модулятор ограничивает расходящийся электронный пучок. Регулируя разность потенциалов между катодом и модулятором, можно управлять количеством электронов, проходящих через отверстие модулятора в единицу времени. При достаточно большом отрицательном (относительно катода) потенциале модулятора электронный пучок можно полностью закрыть. Ограничения поперечного сечения электронного пучка, осуществляемого модулятором, является недостаточным для формирования осциллограммы. Для получения тонкого луча необходима фокусировка электронного пучка, которая осуществляется с помощью первого анода 4, высокий положительный потенциал которого ускоряет электроны, а также регулировкой потенциала фокусирующего электрода 5.

Полученный электронный луч, двигаясь вдоль трубки, попадает в отклоняющее поле, создаваемое двумя парами отклоняющих пластин 6 и 7, и достигает люминесцирующего экрана 9. Конструкция отклоняющих пластин соответствует плоскому конденсатору, электрическое поле которого, создается при подаче соответствующего напряжения на выводы. Одна пара пластин служит для отклонения электронного луча в вертикальном направлении, а другая — в горизонтальном. Векторы напряженности электрических полей должны быть взаимно перпендикулярны, что достигается соответствующим расположением отклоняющих пластин.

Зависимость между напряжением, подаваемым на отклоняющие пластины и отклонением пятна на экране трубки, является линейной при плоском экране, что является удобным при проведении измерений на экране. Применение электрического отклонения электронного луча в ЭЛТ предпочтительнее из-за его хороших частотных свойств, позволяющих воспроизводить осциллограммы сигналов высокой частоты.

Одним из основных элементов ЭЛТ является люминесцирующий экран 9. Основные свойства экрана определяются применяемым люминофором. Главным свойством экрана является эффективность преобразования энергии электронов в световое излучение.

4.3.3 Принцип получения осциллограммы

Для получения осциллограммы исследуемого сигнала необходимо управлять движением светового пятна на экране ЭЛТ в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Смещение пятна в вертикальном направлении осуществляется подаваемым сигналом, а в горизонтальном — напряжением развертки u_p .

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, вид которого изображен на рисунке 4.17.

На этом рисунке на участке $a-c$ напряжение развертки u_p линейно нараста-

ет. Время $T_{пр}$, в течение которого u_p изменяется от минимального значения до максимального, называется временем прямого хода развертки.

На участке $c-d$ напряжение развертки u_p линейно падает. Время $T_{обр}$, в течение которого u_p изменяется от максимального значения до минимального, называется временем обратного хода развертки. Время $T_{пр}$ и $T_{обр}$ составляют период развертки T_p .

Если приложить напряжение развертки u_p к горизонтальным отклоняющим пластинам, отключив сигнал от пластин вертикального отклонения, электронный пучок ЭЛТ будет отклоняться только в горизонтальной плоскости.

На рисунке 4.18 показано образование изображения на экране ЭЛТ при воздействии напряжения развертки u_p и напряжения сигнала u_c на пластины X и Y соответственно.

Для удобства рассмотрения принципа построения осциллограммы примем, что период пилообразного напряжения развертки равен периоду сигнала, а $T_{обр}=0$. Период развертки условно разделен на четыре равных интервала с границами $t_0-t_1-t_2-t_3-t_4$.

В момент времени t_0 $u_c=0$, а напряжение развертки u_p имеет максимальное отрицательное значение и световое пятно находится в точке a . При значении момента времени t_1 напряжение сигнала имеет максимальное положительное значение и пятно находится в точке b .

Аналогично можно найти положение точек c , d и e на экране ЭЛТ. По окончании развертки световое пятно по прямой линии $e-a$ мгновенно возвращается в исходное положение. Направление движения пятна во время прямого и обратного хода показано стрелками. Последующие циклы развертки осцилло-

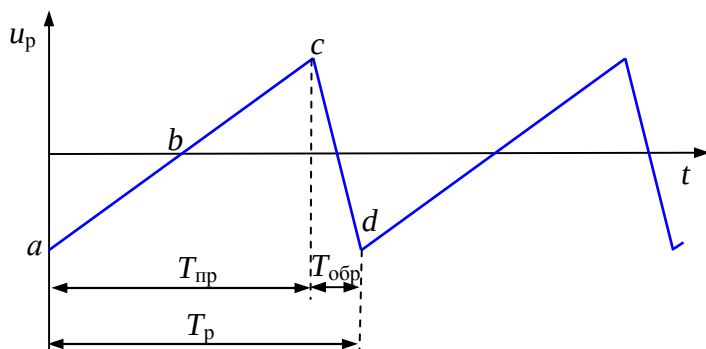


Рисунок 4.17 — Пилообразное напряжение с выхода генератора развертки

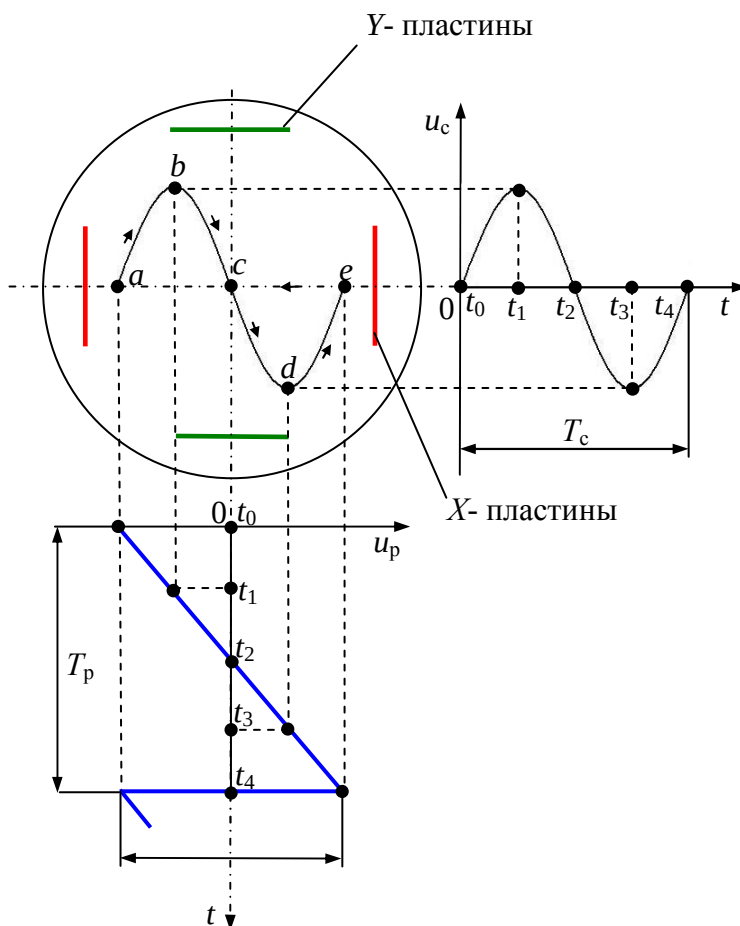


Рисунок 4.18 — Образование изображения на экране ЭЛТ при воздействии напряжения развертки u_p и напряжения сигнала u_c на пластины X и Y соответственно

граммы получаются так же, причем все ее точки совпадут с аналогичными точками осциллограммы, изображенной на рисунке.

Таким образом, на экране ЭЛТ появляется изображение, образованное наложением на одни и те же места экрана целой серии осциллограмм. Число таких первичных изображений, зафиксированных в зрительном образе, зависит от периода развертки, длительности послесвечения люминофора и зрительной памяти человека.

Наложение осциллограмм с образованием неподвижного изображения возможно при выполнении условия, принятого при построении т.е., когда период сигнала равен периоду развертки $T_c = T_p$, периодический сигнал делится на временные интервалы, в пределах которых «отрезки» сигнала полностью идентичны и при наложении осциллограмм образуют неподвижное изображение.

Таким же образом создается изображение осциллограммы, когда $T_p = nT_c$. Если n — целое число, то в одном периоде напряжения развертки укладывается ровно n периодов сигнала. Выполнение условия $T_p = nT_c$ требует, чтобы период развертки T_p был равен или кратен периоду сигнала.

4.3.4 Устройство электронно-лучевого осциллографа

На рисунке 4.19 изображена структурная схема электронно-лучевого осциллографа [14].

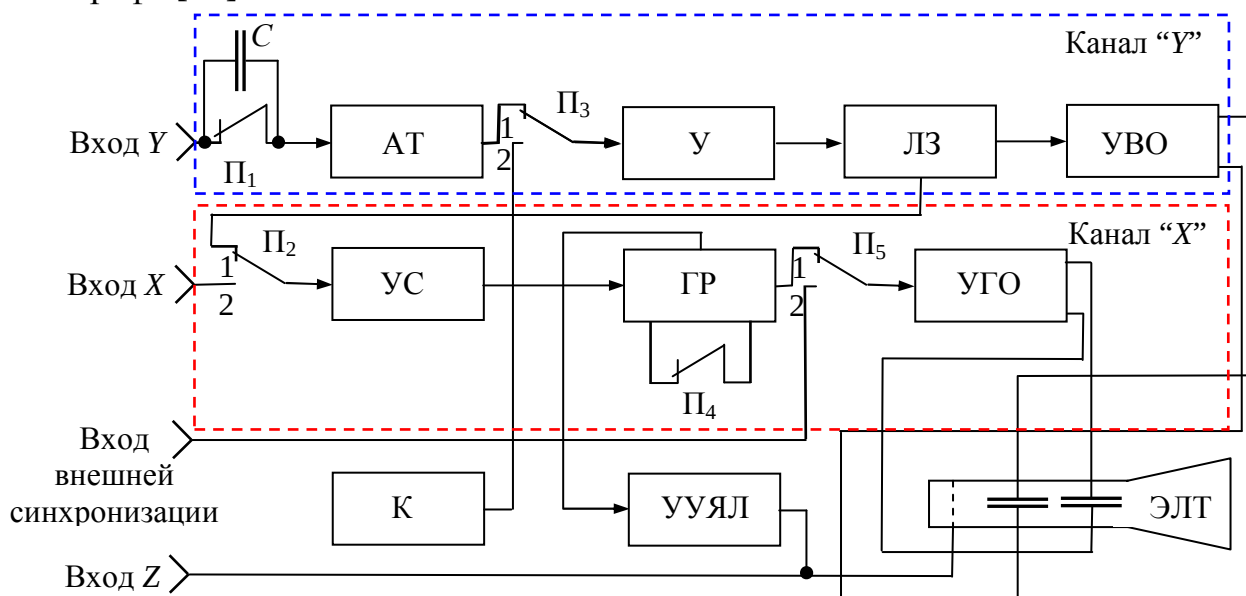


Рисунок 4.19 — Структурная схема электронно-лучевого осциллографа

Осциллограф включает:

- электронно-лучевую трубку (ЭЛТ);
- канал “Y” (канал вертикального отклонения луча), содержащий аттенюатор (АТ), предварительный усилитель (У), линию задержки сигнала (ЛЗ), оконечный усилитель вертикального отклонения (УВО);
- канал “X” (канал горизонтального отклонения луча), содержащий генератор развертки (ГР), устройство синхронизации и запуска развертки (УС), предварительный и оконечный усилители горизонтального отклонения (УГО);
- канал управления яркостью луча (канал “Z”), состоящий из устройства

управления яркостью луча (УУЯЛ);

— калибровочное устройство (К), состоящее из калибратора амплитуды и длительности.

Кроме этого в состав электронного осциллографа входит не показанный на структурной схеме блок питания.

Для исследования зависимости электрического напряжения от времени исследуемое напряжение подается на вход “У” осциллографа и включается генератор развертки.

При проведении исследования зависимости одного напряжения от другого, первое из указанных напряжений подается на вход “У”, а второе — на вход “Х”, а генератор развертки в этом случае отключается.

4.3.5 Принцип работы электронно-лучевого осциллографа

Исследуемый сигнал поступает на вход канала “У”, где усиливается, а затем подается на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ.

На входе канала “У” установлен входной делитель — аттенюатор (АТ), предназначенный для изменения калиброванного коэффициента отклонения на входе канала. В предварительном усилителе напряжения канала “У” предусмотрена плавная регулировка усиления и перемещения изображения по вертикали. Некоторые осциллографы имеют только встроенные входные делители напряжения.

Для работы с высокочастотными сигналами используют выносной входной делитель напряжения, называемый пробником.

В целях получения на экране осциллографа полного и устойчивого изображения процесса, в канале “У” имеется линия задержки. Линия задержки, включаемая в канал вертикального отклонения осциллографов, позволяет задержать сигнал на время, необходимое для запуска генератора развертки. При отсутствии линии задержки на экране осциллографа не будет виден фронт исследуемого сигнала.

При изучении входных сигналов с большой постоянной составляющей вход осциллографа можно сделать закрытым. Разделительный конденсатор включается переключателем Π_1 .

Оконечный усилитель канала вертикального отклонения луча обеспечивает усиление исследуемого сигнала до значения, достаточного для отклонения луча ЭЛТ по вертикали в пределах рабочей части экрана.

На горизонтально отклоняющие пластины трубки поступает вырабатываемое генератором развертки ГР пилообразное напряжение, усиленное усилителем горизонтального отклонения луча. Регулирование усиления этого усилителя позволяет изменять масштаб изображения по горизонтали и калибровать коэффициент развертки.

В зависимости от характера исследуемых сигналов генератор развертки может работать в непрерывном и ждущем режимах. Выбор режима осуществляется переключателем Π_4 .

Для того, чтобы изображение на экране осциллографа было неподвижным и стабильным, необходима синхронизация генератора развертки иссле-

дваемым процессом.

С этой целью на генератор развертки подают короткие синхронизирующие импульсы, сформированные из исследуемого сигнала в устройстве синхронизации и запуска развертки (УС). При этом, переключатель Π_2 должно быть в положении 1. Если синхронизацию непрерывной и ждущей разверток осуществлять от внешних источников сигнала, тогда переключатель Π_2 должно быть в положении 2.

Для получения изображения функциональной зависимости двух величин, генератор развертки отключается от усилителя горизонтального отклонения и на вход канала "Y" подается внешний сигнал, при этом переключатель Π_5 должен быть в положении 2.

Устройство управления яркостью луча (вход Z), позволяет резко увеличить яркость луча при прямом ходе развертки и исключить возможность прожога экрана трубки во время отсутствия сигнала на входе осциллографа.

Для улучшения метрологических характеристик осциллографа в него введены калибраторы амплитуды и длительности.

Калибратор амплитуды представляет собой источник сигнала с известной амплитудой. В положении 2 переключателя Π_3 этот сигнал подается на вход осциллографа или на пластины трубки и позволяет отградуировать в единицах напряжения канал "Y" осциллографа.

Калибратор меток времени представляет собой стабильный генератор электрических колебаний, подаваемых на усилитель канала вертикального отклонения. Период повторения этого сигнала используется в качестве калибровочных интервалов времени.



Рисунок 4.20 — Электронно-лучевой осциллограф С1-96

На рисунке 4.20, в качестве примера, изображен электронно-лучевой осциллограф С1-96. Осциллограф позволяет проводить исследования одного или одновременно двух синхронных сигналов с амплитудой 4 мВ...500 В и длительностью 0,16 мкс...1 с путем визуального наблюдения и фотографирования.

Основные технические характеристики осциллографа С1-96 следующие [74]:

- полоса пропускания: 0...10 МГц;
- время нарастания переходной характеристики 35 нс;
- коэффициент отклонения 2 мВ/дел...10 В/дел;
- коэффициент развертки 0,04 мкс/дел...0,1 с/дел (с 5-кратной растяжкой);
- пределы основной погрешности коэффициентов отклонения/развертки $\pm 3\%$;
- входное сопротивление 1 МОм;
- входная емкость 3 пФ.

4.3.6 Осциллографические измерения

4.3.6.1 Процесс подготовки к работе с осциллографом

Основным требованием, предъявляемым к каждому измерительному прибору, является минимальная погрешность измерений. При исследовании формы напряжения с помощью осциллографа это требование сводится к получению минимального искажения формы сигнала, т.е. наиболее полного соответствия осциллограммы истинной форме напряжения. Реализация этого требования, прежде всего, зависит от выбора осциллографа. Кроме того, необходимо выполнить ряд условий неискаженного наблюдения, заключающихся: в правильном подключении осциллографа к измеряемому объекту, осуществлении синхронизации развертки с исследуемым сигналом, выборе режимов работы прибора и получении оптимальных размеров изображения — его высоты и ширины.

Прежде, чем приступить к работе с осциллографом, необходимо ознакомиться с характеристиками осциллографа и убедиться, что он подходит для выполнения поставленных задач. При этом необходимо обратить внимание на такие характеристики: чувствительность; полоса пропускания и параметры входа.

Чувствительность осциллографа выбирается в зависимости от амплитуды исследуемого сигнала. В некоторых случаях используется выносной делитель или дополнительный усилитель.

Для того чтобы наблюдаемая на экране картина точно воспроизводила входной сигнал, необходимо постоянство коэффициента усиления вне зависимости от частоты, т.е. правильно выбрать полосу пропускания канала вертикального отклонения осциллографа.

При недостаточно широкой полосе пропускания различные составляющие спектра сигнала будут усиливаться неодинаково, а это приведет к заметным искажениям осциллограммы.

В современных универсальных осциллографах верхняя граница полосы пропускания составляет 10...300 МГц и более (можно наблюдать сигналы длительностью до 10 нс и менее). Нижняя граница полосы пропускания определяет возможность наблюдения медленных процессов. Часто бывает, что в исследуемых сигналах низкочастотная компонента не представляет интереса или даже мешает измерениям (например, при исследовании малого переменного напряжения на фоне большого постоянного напряжения). В этом случае целесообразно не пропускать низкочастотные составляющие в канал осциллографа. В схеме осциллографа предусматриваются разделительные конденсаторы на входах, как “Y”, так и “X”. При включенном конденсаторе на входе соответствующего канала вход закрыт для постоянной и медленно изменяющихся составляющих сигнала. Это режим называется режимом “с закрытым входом” и обозначается “~”. В этом режиме нижняя граница полосы пропускания обычно 5...10 Гц. Однако в ряде задач нужно наблюдать не только переменные процессы, но и постоянные и медленно меняющиеся напряжения. В этом случае используется режим “с открытым входом” и обозначается “_” на передней панели осциллографа.

При любых измерениях нужно учитывать влияние осциллографа, как нагрузки на источник исследуемого сигнала. Входное сопротивление осцилло-

графа должно быть больше сопротивления источника сигнала.

Входная цепь осциллографа — представляет собой обычно сопротивление порядка 1 МОм, шунтированное емкостью около 40...50 пФ.

Для подключения осциллографа к исследуемой цепи используют коаксиальный кабель для устранения электромагнитных наводок, дающих из-за помех “размытое” изображение (особенно на высоких частотах).

Правильным выбором осциллографа можно достигнуть минимальных искажений сигналов и измерений с минимальными погрешностями.

4.3.6.2 Процесс подготовки осциллографа к измерениям

Перед включением прибора нужно привести ручки в исходное положение:

- ручки, регулирующие **усиление сигнала** — на минимальное значение;
- ручки управления **яркостью, фокусировкой, смещением луча** по вертикали и горизонтали, уровень синхронизации — в среднее положение, переключатель рода работы — в автоколебательный режим (непрерывной развертки), переключатель рода синхронизации — в положение внутренней синхронизации (вход “X” — отключен).

Если необходима максимальная точность измерений, то после прогрева осциллографа целесообразно проверить калибровку и балансировку (согласно техническому описанию прибора). Суть их состоит в том, что усилители каналов “X” и “Y” в процессе эксплуатации могут слегка “расстроиться”, так что их надо периодически проверять и, если необходимо, подстраивать с помощью генератора калиброванных сигналов, имеющегося внутри осциллографа.

4.3.6.3 Наблюдение периодических сигналов с помощью осциллографа

Для получения хорошего изображения на экране ЭЛТ необходимо правильно выбирать режим работы осциллографа в зависимости от характера и параметров исследуемого сигнала.

Прежде всего, выбирают вид развертки. Если необходимо исследовать периодические процессы, применяют линейную непрерывную развертку. При наблюдении одного периода частота развертки должна быть равна частоте исследуемого напряжения, а при наблюдении n периодов — в n раз ниже. Минимальная частота развертки должна быть такой, чтобы изображение не мерцало на экране трубки с коротким или средним послесвечением.

При наблюдении периодических процессов наиболее целесообразно применять внутреннюю синхронизацию, т.е. синхронизацию исследуемым сигналом.

Синхронизация от сети удобна при осциллографировании напряжений, частоты которых равны или кратны частоте сети, например, выходных напряжений трансформаторов, питаемых от сети, пульсацией выпрямителей и т.д. Внешнюю синхронизацию используют в том случае, если исследуемый сигнал непригоден по форме для синхронизации или имеет слишком малую амплитуду.

Методика синхронизации такова: сначала устанавливают частоту разверт-

ки немного ниже частоты исследуемого сигнала, затем, установив малую амплитуду синхронизирующего напряжения, постепенно увеличивают её до получения хорошей синхронизации — неподвижного изображения на экране ЭЛТ.

Если используется развертывающее напряжение от внешнего источника, то его подают на вход “Х” осциллографа, выключая внутренний генератор развертки. Амплитуда внешнего напряжения должна позволять растянуть изображение на значительную часть экрана.

Высота изображения должна быть удобной для наблюдения. Но её не следует устанавливать слишком большой, так как могут появиться искажения изображения, обусловленные нелинейностью отклонения луча на краях экрана. Высоту изображения сигнала регулируют с помощью аттенюатора, должным образом выбирая коэффициент деления, и изменением усиления в канале вертикального отклонения.

В некоторых случаях при достаточно большой амплитуде исследуемого напряжения имеет смысл подавать его непосредственно на вертикально-отклоняющие пластины. Это особенно целесообразно, когда частота исследуемого напряжения превосходит верхний предел полосы пропускания усилителя канала вертикального отклонения.

4.3.6.4 Наблюдение импульсных процессов с помощью осциллографа

Для исследования однократных импульсных сигналов и периодически повторяющихся одиночных импульсов с большой скважностью или групп импульсов применяется ждущая развертка.

Скорость развертки выбирают так, чтобы изображение сигнала или его части растягивалось почти на весь экран. Изображение растягивается тем больше, чем выше скорость развертки.

Ждущую развертку можно синхронизировать исследуемым и внешним импульсами в зависимости от условий наблюдения. Если используется линия задержки канала вертикального отклонения осциллографа, то генератор развертки синхронизируют исследуемым сигналом.

В случае если амплитуда осциллографируемого импульса достаточно большая, то импульс целесообразно подавать непосредственно на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ, так как при этом исключаются искажения, вносимые узлами канала вертикального отклонения. Особенно важно пользоваться этой возможностью, когда необходимо исследовать короткие импульсы, спектры которых шире полосы пропускания усилителя вертикального отклонения.

Ввиду отсутствия задержки сигнала по отношению начала развертки, в подобных случаях, синхронизация исследуемым сигналом неэффективна, так как при этом не будет виден фронт импульса. Для неискаженного наблюдения требуется внешний синхронизирующий импульс.

При работе с импульсными сигналами, яркость на экране осциллографа уменьшают настолько, чтобы пятно, наблюдаемое левее фронта импульса, исчезло или было плохо видно. Для увеличения яркости изображения импульса используется выдвижным тубусом.

4.3.6.5 Измерение амплитуды и частоты исследуемого напряжения с помощью осциллографа

При измерении амплитуды исследуемое напряжение подают на вход “Y” осциллографа и регулировкой коэффициента деления аттенюатора и усиления в канале вертикального отклонения устанавливают удобную для измерения высоту изображения сигнала. Для измерения используют горизонтальные линии или клетки масштабной сетки, нанесенной на прозрачной пластине, расположенной перед экраном ЭЛТ. Затем сравнивают высоту изображения измеряемого сигнала с отклонением луча, вызываемым калиброванным напряжением.

Методика сравнения в различных осциллографах неодинакова. Иногда она сводится к следующему. Запомнив коэффициент деления переключателя аттенюатора, соответствующий установленной высоте изображения сигнала (например, 1:5), и не меняя усиления, подают на вход усилителя вместо сигнала вспомогательное напряжение от источника, находящегося внутри осциллографа. Регулировкой амплитуды вспомогательного напряжения добиваются того, чтобы высота его изображения составляла такое же количество клеток масштабной сетки, какое ранее занимало изображение измеряемого сигнала.

Если вспомогательное напряжение калибровано, то по шкале потенциометра, изменяющего амплитуду, делают отсчет, который переводят в показание умножением на знаменатель коэффициента деления (в нашем примере на 5).

В тех приборах, где вспомогательное напряжение заранее не калибровано, его измеряют электронным вольтметром.

Для измерения параметров электрических сигналов ручками смещения сигнала необходимо совместить сигнал с делениями шкалы так, чтобы было удобно проводить измерения. Далее выбирают положение переключателя “В/дел” таким, чтобы размер исследуемого сигнала по вертикали получался от 2 до 6 делений.

На рисунке 4.21, в качестве примера, изображена осциллограмма исследуемого напряжения. Рассмотрим определение частоты и амплитуды исследуемого напряжения.

Пусть длительность развертки установлена 10 мс/дел на передней панели прибора. На осциллограмме период исследуемого напряжения занимает четыре деления. Тогда период исследуемого напряжения будет равен: $4 \text{ дел} \times 10 \text{ мс/дел} = 40 \text{ мс}$.

Затем, из формулы связи периода и частоты исследуемого сигнала ($f=1/T$), определим его частоту, как: $f=1/40 \text{ мс} = 25 \text{ Гц}$.

Рассмотрим теперь, как оп-

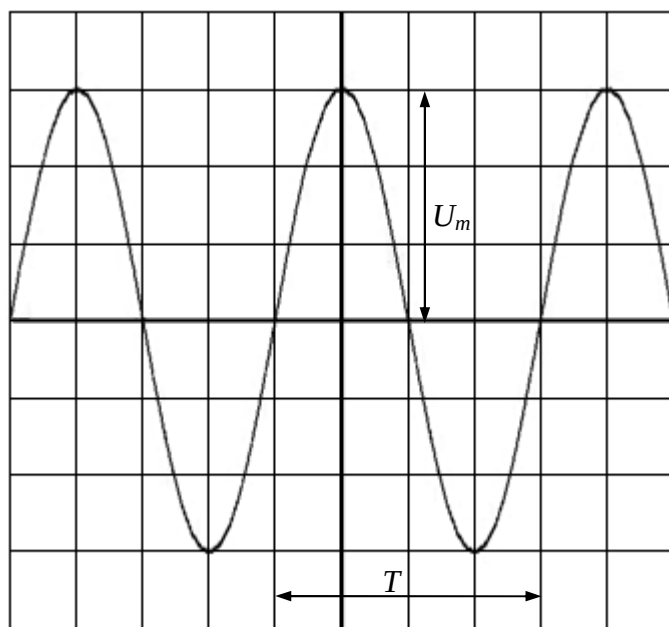


Рисунок 4.21 — Осциллограмма исследуемого напряжения

ределяется амплитуда исследуемого напряжения.

Значение амплитуды синусоидального напряжения равно половине размаха ее изображения по вертикали.

Для нахождения значения амплитуды сначала определим, сколько делений занимает изображение сигнала по вертикали.

Умножив число делений, соответствующее амплитуде, на коэффициент деления переключателя аттенюатора в вольтах на деление, получим амплитуду сигнала в вольтах. Пусть, например, коэффициент деления переключателя аттенюатора установлен на положении 5 В/дел (одному делению соответствует 5 В). На осциллограмме изображение синусоидального сигнала по вертикали занимает 6 делений. Тогда величина измеряемого напряжения будет составлять 6 дел. $\times$ 5 В/дел.=30 В.

При измерениях ручка «Плавно» должна находиться в крайнем правом положении.

При проведении измерений постоянного напряжения необходимо установить переключатель выбора типа входа осциллографа « $\simeq$, $\perp$, $\sim$ » в положение « $\perp$ », соответствующее замыканию входа прибора на его корпус.

Далее необходимо ручкой « $\updownarrow$ » вертикального перемещения луча установить нулевую линию на одну из крайних горизонтальных линий шкалы (в случае положительного напряжения — на нижнюю линию шкалы, а отрицательного — на верхнюю).

Затем установив переключатель « $\simeq$, $\perp$, $\sim$ » в положение « $\simeq$ », соответствующее открытому входу, необходимо произвести отсчет величины напряжения по вертикальной градуированной шкале ЭЛТ, при этом ручка «Плавно» должна находиться в крайнем правом положении.

4.3.6.6 Измерение длительности импульса с помощью осциллографа

Для измерения длительности импульса применяют различные способы. Один из способов заключается в применении калибровочных меток. Калибровочные метки получают в результате подачи напряжения, вырабатываемого калибратором, на управляющий электрод (катод) ЭЛТ.

Если на вертикально — отклоняющие пластины подан исследуемый импульс, то при включении генератора меток на экране будет наблюдаться пунктирная кривая. Расстояние между серединами двух меток равно периоду напряжения генератора меток.

Таким образом, период определяет цену метки. Длительность исследуемого импульса определяется произведением числа меток, укладываемых на измеряемом участке, на значение цены метки.

Абсолютная погрешность измерения составляет $\pm 0,5$ метки. Для уменьшения относительной погрешности измерения длительности импульса необходимо иметь большое число меток.

При измерении временного интервала пользуются методом прямого преобразования или методом калиброванного коэффициента развертки. Использование данного метода аналогично методу измерения амплитуды напряжения через калиброванный коэффициент деления аттенюатора, только в этом случае

используется калиброванный коэффициент развертки.

Перед измерением с помощью калибратора длительности устанавливается требуемое значение, являющееся ценой деления шкалы по горизонтали. В этом случае, если используется растяжка развертки, то учитывают коэффициент, характеризующий кратность растяжки.

На рисунке 4.22, в качестве примера, изображена осциллограмма исследуемой импульсной последовательности.

Пусть переключатель «Время/дел.» установлен в положение 10 мс/дел на передней панели прибора.

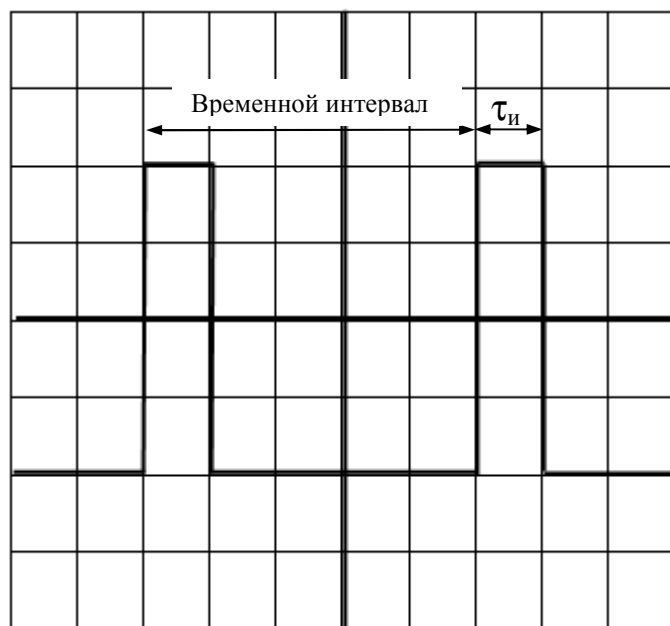


Рисунок 4.22 — Осциллограмма исследуемой импульсной последовательности

На осциллограмме временной интервал между импульсами, занимает пять делений, тогда его значение определится через перемножение значения положения переключателя длительности развертки на количество клеток (делений) и будет равным 50 мс. Длительность импульса при той же развертки будет равна 10 мс.

В практике осциллографических измерений длительность импульса $\tau_{и}$ измеряют на уровне 0,5 амплитуды наблюдаемого изображения.

Это правило позволяет устранить неопределенность

при измерении $\tau_{и}$ импульсов произвольной формы.

Точно так же при измерении длительности фронта импульса $\tau_{ф}$ за отсчетные точки принимают значения 0,1 и 0,9 амплитуды наблюдаемого изображения.

Для удобства измерений шкалы на экранах ЭЛТ, кроме сплошных линий, образующих координатную сетку, могут иметь две горизонтальные пунктирные линии на уровнях 0,1 и 0,9 от полной высоты шкалы.

В таких случаях изображение импульса при измерении $\tau_{и}$ и $\tau_{ф}$ должно занимать всю высоту шкалы.

Если измеряется период следования импульсов или временной интервал между двумя различными импульсами, на развертке должны наблюдаться изображения обоих импульсов (опорного и интервального).

4.3.6.7 Измерение сдвига фаз с помощью осциллографа

В осциллографических измерениях сдвига фаз применяют метод эллипса и снимают осциллограмму.

При использовании метода эллипса напряжения u_1 и u_2 подаются на входы каналов “Y” и “X” (канал “X” работает в режиме усиления сигнала u_2) однолучевого осциллографа.

Усиления по обоим каналам регулируются так, чтобы выполнялось равенство полных отклонений луча по осям Y и X :

$$2U_{Y \max} = 2U_{X \max}.$$

Осциллограмма эллипса, получаемого при измерении сдвига фаз по данному методу, изображена на рисунке 4.23.

По размерам эллипса можно определить значение сдвига фаз:

$$\varphi_x = \arcsin(2Y/2Y_{\max}).$$

Наибольшего значения (до 10°) погрешность достигает при измерении углов, близких к 90° .

Недостатком метода является то, что с помощью него нельзя определить знак угла.

В случае измерения сдвига фаз с использованием метода осциллограмм лучше использовать двухлучевой осциллограф или осциллограф, позволяющий коммутировать на один вход два сигнала u_1 и u_2 .

На рисунке 4.24 изображена осциллограмма, получаемая при измерении сдвига фаз с использованием метода осциллограмм.

Если на получаемых осциллограммах измерить в одинаковых единицах длины отрезков ab (L_{ab}) и ac (L_{ac}), то можно определить сдвиг фаз по следующему выражению:

$$\varphi_x = (L_{ab} \cdot 360^\circ) / (L_{ac}).$$

Погрешность данного метода обусловлена теми же причинами — неточностью измерения длин отрезков.

Абсолютная погрешность данного метода измерения, обусловленная неточностью измерения длин отрезков, составляет 2...3 %.

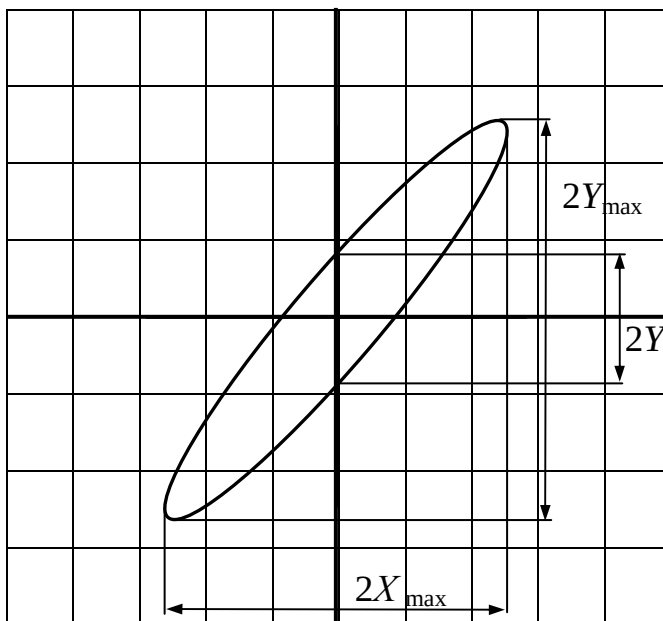


Рисунок 4.23 — Осциллограмма эллипса, получаемого при измерении сдвига фаз

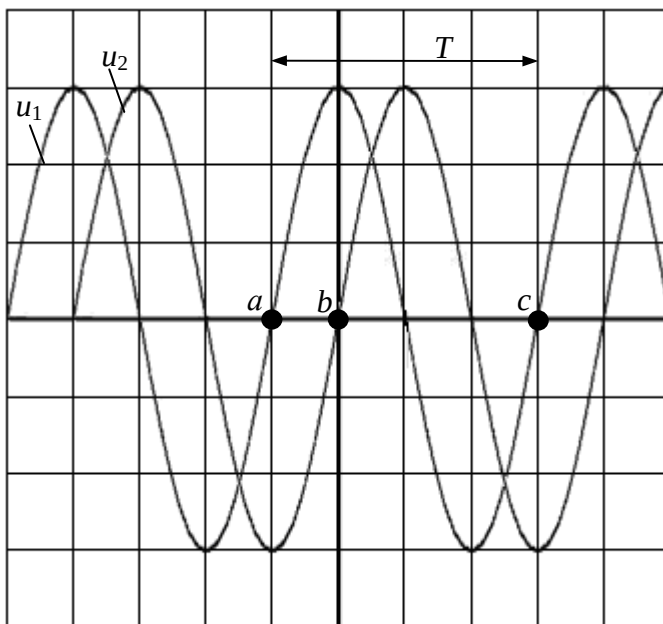


Рисунок 4.24 — Осциллограмма, получаемая при измерении сдвига фаз с использованием метода осциллограмм

4.3.6.8 Измерение частоты осциллографическим способом

Для измерения частоты с использованием осциллографа применяют три метода: калиброванной развертки, фигур Лиссажу и круговой развертки.

Метод калиброванной развертки заключается в том, что измеряется период колебаний при известном значении коэффициента развертки, а затем по выражению:

$$f_x = 1/T$$

определяют значение частоты. Применение метода описано в § 4.3.6.5.

Другим методом измерения частоты является метод фигур Лиссажу или интерференционных фигур.

Впервые метод был предложен французским учёным Жюлем Антуаном Лиссажу.

Наблюдение фигур Лиссажу является удобным методом исследования соотношений между амплитудами, частотами и фазами двух колебаний.

Суть метода заключается в подаче на входы Y и X осциллографа двух синхронных синусоидальных напряжений, причем на вход X подается образцовая частота f_0 с эталонного генератора, значение частоты колебания с которого известно, а на вход Y колебание с измеряемой частотой f_x .

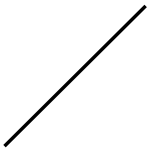
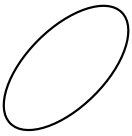
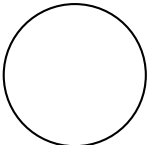
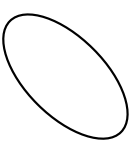
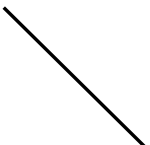
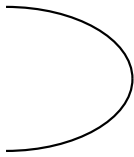
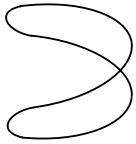
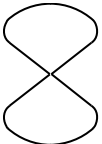
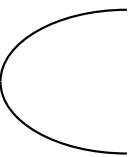
В результате интерференции луч на экране ЭЛТ совершает сложное движение, и траектория луча воспринимается как неподвижная интерференционная фигура (фигура Лиссажу).

Вид этой фигуры зависит от кратности f_x/f_0 , соотношения амплитуд напряжений и фазового сдвига φ_x между ними.

Равенство амплитуд напряжений обеспечивается регулировкой усиления в блоках УВО и УГО осциллографа.

В таблице 4.1 приведены примеры интерференционных фигур для различных значений f_x/f_0 и φ_x .

Таблица 4.1 — Примеры интерференционных фигур для значений f_x/f_0 и φ_x

$\varphi_x \backslash f_x/f_0$	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
1:1					
1:2					

Для определения кратности f_x/f_0 применяется следующее правило. Через изображение фигуры мысленно проводятся вертикальная и горизонтальная линии так, чтобы они не пересекались с узлами фигуры.

Если линии будут пересекаться с узлами фигуры, то кратность f_x/f_0 будет определена неправильно.

Принимая число пересечений вертикальной линии с линиями фигуры за n_y , а горизонтальной линии с линиями фигуры — n_x , через соотношение

$$n_y \cdot f_0 = n_x \cdot f_x$$

значение искомой частоты определится как

$$f_x = (n_y / n_x) \cdot f_0.$$

При практических измерениях нужно всегда стремиться к простейшему виду фигуры — эллипсу, когда $f_x = f_0$.

В случаях, если соотношение f_x / f_0 (до 20), то для измерения частоты используется метод круговой развертки.

Схема измерения частоты методом круговой развертки изображена на рисунке 4.25.

На этой схеме напряжение эталонного генератора с частотой f_0 используется для формирования с помощью вспомогательной фазосдвигающей RC-цепи на экране осциллографа круговой развертки, а напряжение с искомой частотой f_x подается на модулятор трубки (вход Z).

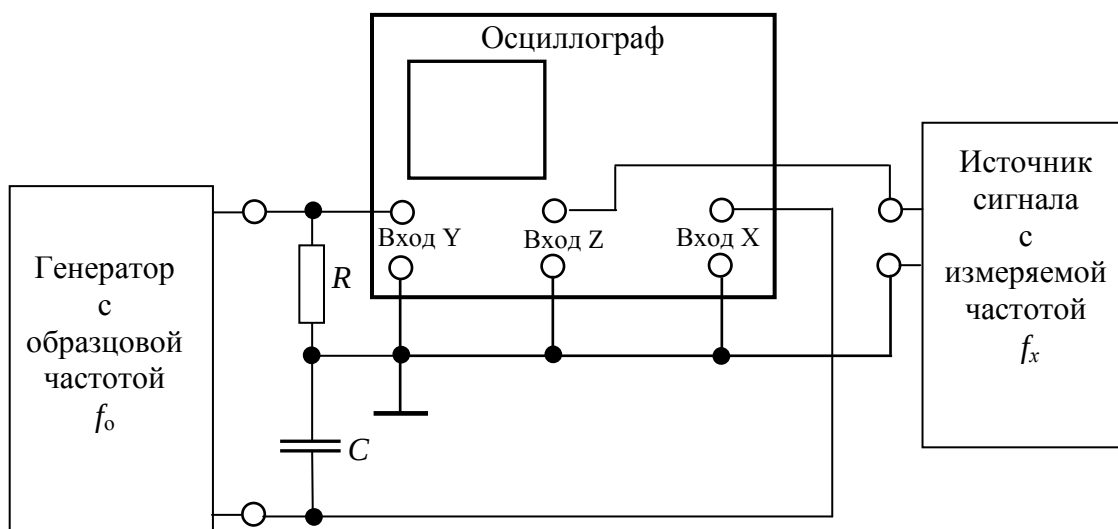


Рисунок 4.25 — Схема измерения частоты методом круговой развертки

На рисунке 4.26 изображена осциллограмма круговой развертки. Принцип измерения частоты заключается в следующем. Если частоты обоих генераторов находятся в целочисленном отношении и правильно установлена амплитуда модулирующего напряжения на экране получится неподвижное “пунктирное изображение” круговой развертки.

Зная частоту развертки f_0 и, подсчитав число n подсвеченных дуг, можно определить искомую частоту

$$f_x = n \cdot f_0.$$

Методы фигур Лиссажу и круговой развертки являются методами сравнения и характеризуются высокой точностью и зависят от точности эталонного генератора.

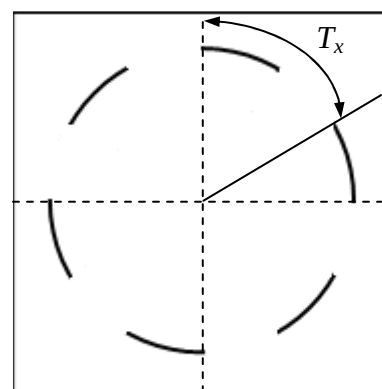


Рисунок 4.26 — Осциллограмма круговой развертки

4.3.7 Контрольные вопросы

1. Каково назначение электронно-лучевых осциллографов?
2. Каков принцип работы электронно-лучевых осциллографов?
3. Как измерить длительность импульсов с помощью осциллографа?
4. Для чего предназначен калибратор в осциллографе?
5. Какими методами можно измерить амплитуду и частоту колебаний?
6. Для чего предназначена синхронизация в осциллографе?
7. Как использовать метод эллипса при проведении измерений?
8. Как можно измерить временной сдвиг с помощью фигур Лиссажу?
9. Каков принцип получения фигур Лиссажу?
10. Как измерить фазовый сдвиг между синусоидальными напряжениями?

Часть 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ОБОРУДОВАНИЯ И МАШИН

5.1 Измерительные мосты

5.1.1 Основные соотношения

Измерительные мосты используются для измерения пассивных параметров электрических цепей и величин функционально с ними связанных, таких как: частота; фазовый угол; температура и т.д. С помощью мостов проводят измерения методом сравнения неизвестного параметра с мерой, поэтому мосты обычно более точны, чем приборы для абсолютных измерений.

На рисунке 5.1. изображена схема одинарного моста [35]. Одинарный мост имеет: четыре плеча с сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3, \underline{Z}_4$; источник питания U и нуль-индикатор (НИ). Для мостов постоянного тока источником питания служит источник постоянного напряжения U , а для мостов переменного тока — переменное напряжение u с выхода генератора сигналов. В диагональ AB моста, называемую выходной (измерительной), включается нуль-индикатор с сопротивлением $\underline{Z}_H$.

Зависимость тока в нагрузке от параметров моста и напряжения источника питания в общем виде определяется по выражению [35]:

$$\underline{I}_H = \underline{U} \frac{(\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_3) \underline{Z}_H}{\underline{Z}_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) + \underline{Z}_3 \underline{Z}_4 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}$$

При выполнении равенства

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$$

ток в нуль-индикаторе (нагрузке) равен нулю. В этом случае говорят, что достигается равновесие моста. Если $\underline{Z}_4$ — неизвестное сопротивление, то его значение можно определить из условия равновесия следующим образом:

$$\underline{Z}_4 = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \underline{Z}_3.$$

Отсюда следует, что равновесие не зависит от сопротивления нуль-индикатора, напряжения и сопротивления источника питания. Таким образом, высокостабильный источник питания не требуется.

Сопротивление $\underline{Z}_3$ называется плечом сравнения, а $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ — плечами отнoшения. Отношение сопротивлений $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ определяет диапазон изменения измеряемых величин. Для расширения диапазона мосты снабжаются переключателями, которые изменяют сопротивления плеч $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$.

Полные сопротивления плеч моста могут быть записаны в виде:

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2; \underline{Z}_3 = R_3 + jX_3; \underline{Z}_4 = R_4 + jX_4.$$

Подставив значения сопротивлений $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$ в формулу равновесия моста, получим два равенства для мнимых и действительных членов:

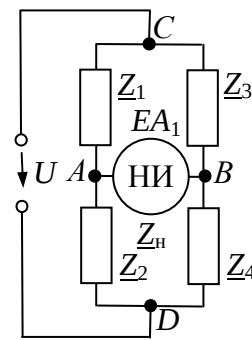


Рисунок 5. 1 — Схема
одинарного моста

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3;$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2.$$

Наличие двух уравнений равновесия означает необходимость регулирования не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Учитывая, что

$$\underline{Z}_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \underline{Z}_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \underline{Z}_3 = z_3 e^{j\varphi_3}; \underline{Z}_4 = z_4 e^{j\varphi_4},$$

можно записать условия равновесия моста на переменном токе в виде

$$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)},$$

тогда будут выполняться равенства

$$z_1 z_4 = z_2 z_3; \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Условие $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ указывает характер сопротивлений плеч, позволяющий уравновесить мост. Вследствие того, что в мостах переменного для достижения равновесия моста необходимо регулировать два параметра, возникает вопрос о его сходимости. Сходимость моста переменного тока это способность моста достигать состояния равновесия большим или меньшим числом поочередных переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого. Для настройки мостов применяют электронные нуль-индикаторы, входное сопротивление которых приближенно можно считать равным бесконечности.

Мосты, в которых измеряемая величина определяется из условия равновесия, называются уравновешенными. Если измеряемая величина определяется по значению тока или напряжения выходной диагонали моста, то такие мосты называются неуравновешенными. Для получения наибольшей чувствительности моста нуль-индикатор включают между контактами двух плеч с максимальными импедансами и двух плеч с минимальными импедансами.

На погрешность измерений с помощью моста влияют следующие факторы: стабильность и погрешность образцовых импедансов, используемых в плечах моста, чувствительность нуль-индикатора, термоЭДС, сопротивление соединительных проводов и контактов. Чтобы достичь требуемой точности, разрешение с которым перестраиваются элементы моста, должно быть очень высоким. Кроме того, нуль-индикатор должен быть достаточно чувствительным, чтобы быть способным обнаружить изменение в элементе моста при его перестройке на наименьший шаг.

5.1.2 Мосты постоянного тока

Мосты постоянного тока предназначены для измерения сопротивлений резисторов на постоянном токе.

5.1.2.1 Одинарные мосты постоянного тока

Наибольшее распространение получил резистивный мост, называемый мостом Уитстона, изображенный на рисунке 5.2 [35]. В этом средстве измерений резисторы $R_1 — R_3$ регулируются до тех пор, пока ток через НИ не станет равным нулю. Значение измеряемого сопротивления R_x можно определить по формуле:

$$R_x = (R_2 / R_1) R_3.$$

Для получения максимальной чувствительности моста номиналы резисторов R_1 и R_2 выбирают специальным образом. Уравновешивание моста осуществляется с помощью переменного резистора R_3 . Сопротивление R_0 вначале включается в цепь для защиты нуль-индикатора, а затем, после достижения равновесия моста, с помощью переключателя SA_1 закорачивается. Мост Уитстона используется для измерения сопротивлений резисторов с двумя зажимами в диапазоне 1 Ом...100 МОм. Класс точности одинарных резистивных мостов при измерении сопротивления на пределе измерения нескольких сотен кОм может достигать значения 0,05.

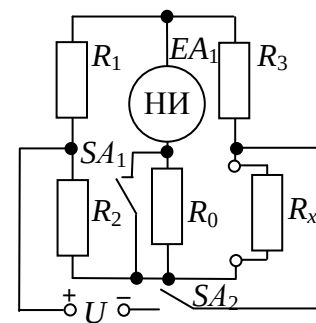


Рисунок 5.2 — Схема моста Уитстона

Ограничивающими факторами на точность измерения малых сопротивлений с помощью одинарных резистивных четырехплечих мостов являются сопротивления контактов и соединительных проводов.

На рисунке 5.3 изображена схема четырехзжимного включения моста Уитстона, позволяющая уменьшить влияние сопротивлений контактов и соединительных проводов на точность измерения [35].

На этой схеме сопротивление провода от R_x к зажиму 2 входит в плечо с сопротивлением R_3 , а сопротивление провода от R_x к зажиму 4 — в плечо с сопротивлением R_2 . Сопротивления R_3 и R_2 значительно больше сопротивлений проводов. Сопротивления проводов от зажимов R_x к зажимам 1 и 3 входят в сопротивления диагоналей моста и на равновесие моста не влияют.

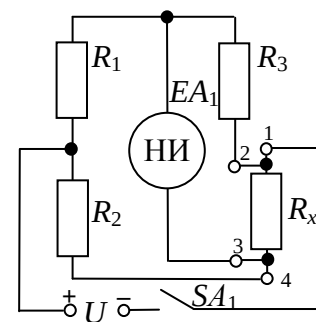


Рисунок 5.3 — Схема четырехзжимного включения моста Уитстона

Погрешность одинарного моста зависит от пределов измерения.

5.1.2.2 Двойной мост Томсона

Для измерения сопротивлений ниже 1 Ом используется двойной мост Томсона, схема которого показана на рисунке 5.4 [26]. В этом мосте сопротивления R_x и R_n имеют по четыре выходные клеммы, а сопротивление R_p подбирается таким образом, чтобы ток через сопротивление R_n давал падение напряжения на нем не более 0,5 В.

При равновесии моста сопротивление R_x определяется по выражению:

$$R_x = R_n \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 R}{R + R_3 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right).$$

На практике значения сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и R_4 выбирают такими, чтобы выполнялось соотношение:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Используя последнее выражение, значение измеряемого сопротивле-

ния будет определяться как:

$$R_x = R_H \frac{R_1}{R_2}.$$

Методика проведения измерения следующая. Вначале мост уравнивается, а затем проводник R , не влияющий на равновесие моста убирается.

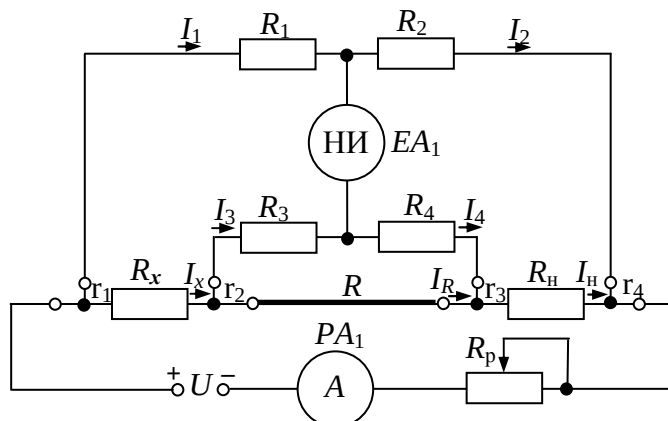


Рисунок 5. 4 — Схема двойного моста Томсона

Сопротивление R изготавливают из короткого отрезка толстого медного провода или шины. Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 выбираются меньше 10 Ом каждое, чтобы влияние сопротивлений соединительных проводов и контактов r_1 , r_2 , r_3 , r_4 было малым. Сопротивление R_2 изменяется путем подключения добавочных сопротивлений, а сопротивление R_1 — путем замены отводов. Сопротивления R_4 и R_2 регулируются одной ручкой, а R_1 и R_3 — другой, так что их отношения поддерживаются постоянными.

Для измеряемых сопротивлений в диапазоне 10 мкОм...1 Ом двойной мост имеет погрешность менее 0,5 %, а при измерении сопротивлений резисторов с двумя зажимами — погрешность менее 0,02 %.



Рисунок 5.5 — Прибор универсальный измерительный P4833

На рисунке 5.5, в качестве примера, изображен прибор универсальный измерительный P4833, который может работать в качестве [74]:

— моста постоянного тока класса точности 0,1;

— потенциометра постоянного тока класса точности 0,05;

— магазина сопротивления класса точности 0,02/1,5·0,0001.

Диапазон измерений:

— моста — $10^{-4} \dots 10^6$ Ом;

— магазина сопротивления от 0,015 Ом до 1111,10 Ом;

— потенциометра — до 111,1 мВ.

Измерение постоянного напряжения и ЭДС производится посредством метода компенсации.

5.1.3 Мосты переменного тока

Мосты переменного тока предназначены для измерения: индуктивности и добротности катушек; взаимной индуктивности; емкости и угла потерь конденсаторов.

5.1.3.1 Мосты для измерения индуктивностей

Неизвестная катушка имеет собственную индуктивность L_x , взаимную индуктивность M_x и сопротивление R_x . Для уравнивания моста две его составляющие должны быть регулируемыми, чтобы обеспечить уравнивание по модулю и фазе.

На рисунке 5.6 изображены схемы мостов для измерения индуктивности методом сравнения с известной емкостью [21].

Из-за трудности получения стабильных и точных образцовых индуктивностей, на практике измерение индуктивности осуществляется методом сравнения с известной емкостью.

Для измерения индуктивности с высокой добротностью ($Q > 10$) может использоваться мост, схема которого показана на рисунке 5.6,а. Условия равновесия данного моста определяются выражениями [21]:

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C Q_x^2}{1 + Q_x^2}; \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4 (1 + Q_x^2)}; \quad Q_x = \frac{1}{\omega R_4 C}.$$

Недостатком этого моста является то, что его равновесие зависит от частоты, но при $Q > 10$ в выражении для L_x членом с Q_x^2 можно пренебречь. В этом случае измеряемое значение индуктивности не будет зависеть от частоты и погрешность измерений будет менее 1 %.

При измерении индуктивности катушек с добротностью Q ниже 10 используется схема, изображенная на рисунке 5.6,б. Уравнивание моста в этой схеме осуществляется с помощью резистора R_2 и конденсатора C . Равновесие моста будет осуществлено при выполнении следующих соотношений [8]:

$$L_x = \frac{R_1 R_4}{C}; \quad R_x = \frac{R_1 R_4}{R_2}; \quad Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_2 C.$$

5.1.3.2 Мосты для измерения емкостей конденсаторов

Реальный конденсатор имеет потери и представляется по схеме замещения в виде идеальной емкости, последовательно или параллельно соединенной с активным сопротивлением потерь.

В случае, если шкала моста градуируется в значениях тангенса угла ди-

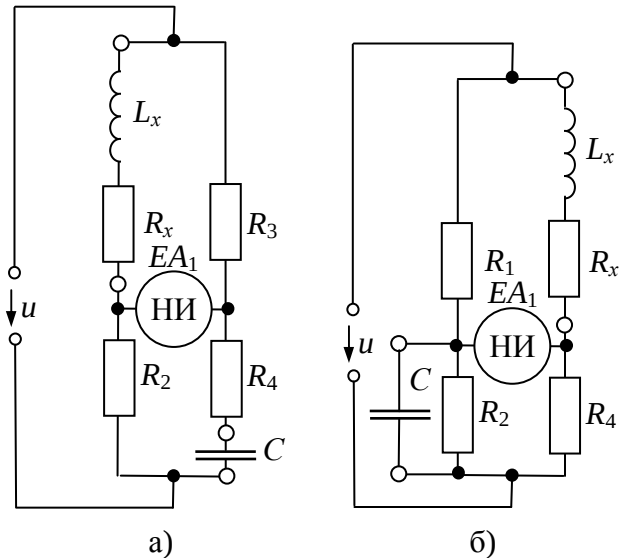


Рисунок 5.6 — Схемы мостов для измерения индуктивности

электрических потерь конденсатора ($\operatorname{tg}\delta$), зависящего от частоты, градуировка прибора будет справедлива для одного значения частоты.

На рисунках 5.7,а изображена схема моста для измерения емкости конденсатора с малыми потерями методом сравнения с мерой, а на рисунке 5.7,б — для измерения емкости конденсатора с малым тангенсом угла диэлектрических потерь.

Равновесие моста, изображенного на рисунке 5.7,а наступает при выполнении следующих условий [28]:

$$C_x = \frac{C_3 R_4}{R_2}; R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}; \operatorname{tg}\delta = \omega C_3 R_3.$$

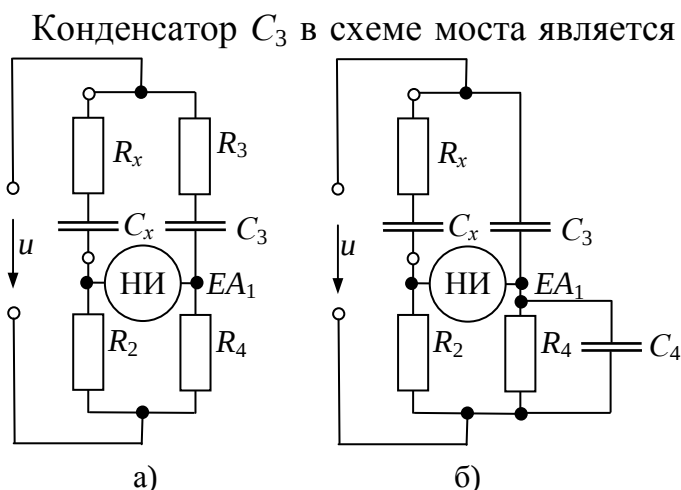


Рисунок 5.7 — Схемы мостов для измерения емкости конденсатора

Конденсатор C_3 в схеме моста является нерегулируемым и прецизионным (или образцовым). Для уравнивания моста регулируются сопротивления R_3 и R_4 . Настройка моста осуществляется по нуль-индикатору НИ. Данный метод является не очень точным при измерении емкости с малым тангенсом угла диэлектрических потерь.

В целях измерения емкости конденсатора и точного определения $\operatorname{tg}\delta$ используют мостовую схему, изображенного на

рисунке 5.7,б. Равновесие данного моста наступает при выполнении следующих условий [28]:

$$C_x = \frac{C_3 R_4}{R_2}; R_x = \frac{C_4 R_2}{C_3}; \operatorname{tg}\delta = \omega C_4 R_4.$$

Конденсатор C_3 в схеме моста является нерегулируемым и образцовым, равновесие моста достигается регулировкой емкости конденсатора C_4 и сопротивления R_4 .

5.1.3.3 Мосты для измерения частоты

Для измерения частоты на низких частотах ($\approx$ до 50 кГц) можно применить мостовые методы. Ограничение верхней измеряемой частоты связано с тем, что на высоких частотах трудно сбалансировать мост из-за влияния паразитных индуктивностей и емкостей соединительных проводов и монтажа.

На рисунке 5.8. изображена схема моста Вина, предназначенного для измерения частоты.

Принцип измерения частоты с помощью моста основан на том, что балансируя его для каждой новой частоты, можно проградуировать изменяемый для баланса параметр в значениях частоты.

Условие равновесия моста переменного тока Вина следующее [28]:

$$R_3/R_4 = (R_1 + 1/(j\omega_0 C_1))/(1/R_2 + j\omega_0 C_2)^{-1}$$

или

$$R_3/R_4 = R_1/R_2 + C_2/C_1 + j(\omega_0 R_1 C_2 - 1/(\omega_0 R_2 C_1)).$$

Приравнивая мнимую часть к нулю, получим следующие выражения:

$$R_1/R_2 + C_2/C_1 = R_3/R_4 \quad \text{и} \quad R_1 \omega_0 C_2 - 1/(R_2 \omega_0 C_1) = 0.$$

Из последнего равенства определится частота, при которой наступит равновесие моста:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

Условие равновесия моста фиксируется по минимуму показания нуль-индикатора НИ при изменении значения сопротивлений R_1 и R_2 , а также емкостей C_1 и C_2 . Если выбрать эти значения, равными $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$, то значение искомой частоты с помощью моста составит:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Значения переменного сопротивления R и значения емкости конденсатора C градуируют в значениях измеряемой частоты. Резисторы R_1 и R_2 , имея общую ось, изменяются одновременно и имеют плавную регулировку, а параметры C_1 и C_2 являются множителями для шкалы частот и меняются скачкообразно. Погрешность измерения частоты с помощью моста Вина составляет менее 1 %.

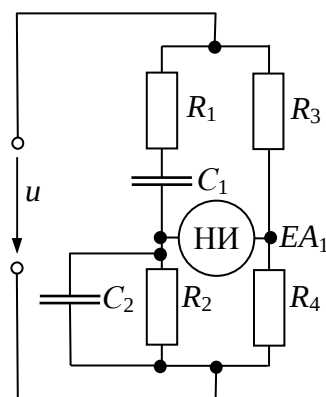


Рисунок 5.8 — Схема моста Вина для измерения частоты

5.2 Измерение сопротивления изоляции с помощью мегаомметра

5.2.1 Устройство и назначение мегаомметра

Мегаомметр — это прибор, предназначенный для измерения сопротивления изоляции. Сопротивление изоляции — важная характеристика состояния изоляции электрических машин и аппаратов, и их измерение производится при всех проверках состояния изоляции.

На рисунке 5.9 изображена схема мегаомметра типа М 1101.

Прибор состоит из чувствительного магнитоэлектрического логометра 1 и автономного источника питания — небольшого генератора постоянного тока 2 с ручным приводом.

Измеряемое сопротивление R_x включается в цепь генератора последовательно, между зажимами Л (Линия) и З (Земля). Две легкие рамки (катушки) логометра жестко укреплены на оси и помещены в зазоре между полюсами магнита. Расточка полюсов выполнена так, чтобы магнитное поле между ними было неравномерным.

При вращении ручки ротора генератора примерно с частотой 120 об/мин на зажимах обмотки статора появляется номинальное напряжение и по рамкам 3 и 4 логометра проходят токи, ограниченные соответствующими резисторами. От взаимодействия токов в рамках с магнитным полем постоянного магнита 5 на оси измерительного органа создается вращающий момент, про-

порциональный произведению тока в рамке на индукцию в месте ее расположения. В схеме логометра рамки 3 и 4 включены так, что моменты их M_1 и M_2 направлены в противоположные стороны [34].

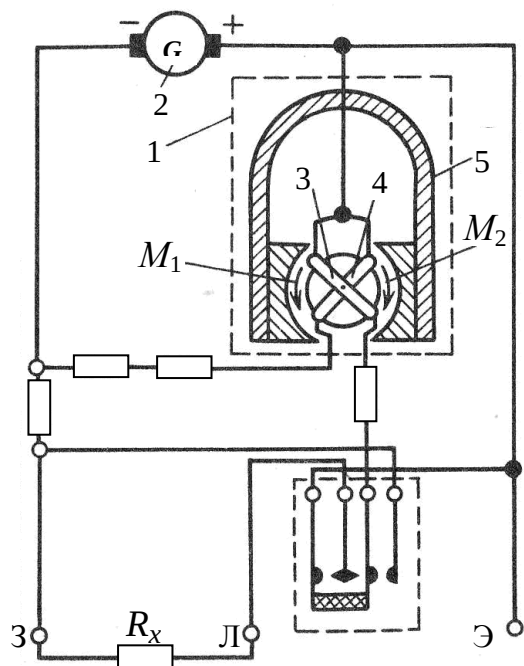


Рисунок 5.9 — Схема мегаомметра типа М 1101



Рисунок 5.10 — Мегаомметр М 4100 /1

Подвижная система логометра может находиться в покое только при равенстве вращающих моментов. Это равенство нарушается, если изменяется соотношение токов в рамках, и подвижная система поворачивается в неравномном поле, пока не наступит новое равновесие моментов.

Конструктивной особенностью измерительного органа мегаомметра является отсутствие пружин, устанавливающих стрелку прибора на нулевой отметке шкалы.

На рисунке 5.10, в качестве примера, изображен мегаомметр М 4100 /1.

Прибор является двухпредельным, переносным прибором и предназначен для измерения сопротивления изоляции обесточенных электрических цепей. Время установления показаний не превышает 4 с.

Питание мегаомметров осуществляется от встроенного электромеханического генератора. Основная погрешность не превышает 1 % от длины рабочей части.

В таблице 5.1. приведены технические характеристики мегаомметра М 41001 [75].

Таблица 5.1 — Технические характеристики мегаомметра М 41001-5

Марка прибора	Диапазон измерений, МОм	Выходное напряжение на зажимах, В
М 4100/1	0...20	100 ± 10
М 4100/2	0...50	250 ± 25
М 4100/3	0...100	500 ± 50
М 4100/4	0...200	1 000 ± 100
М 4100/5	0...1 000	2 500 ± 250

5.2.2 Порядок измерения сопротивления изоляции с помощью мегаомметра

На рисунке 5.11,а изображены схема измерения мегаомметром сопротивления изоляции относительно земли, на рисунке 5.11,б — при измерении сопротивления изоляции между токопроводящими жилами, а на рисунке 5.11,в — при измерении сопротивления изоляции между токопроводящими жилами при исключении влияния токов утечки [75].

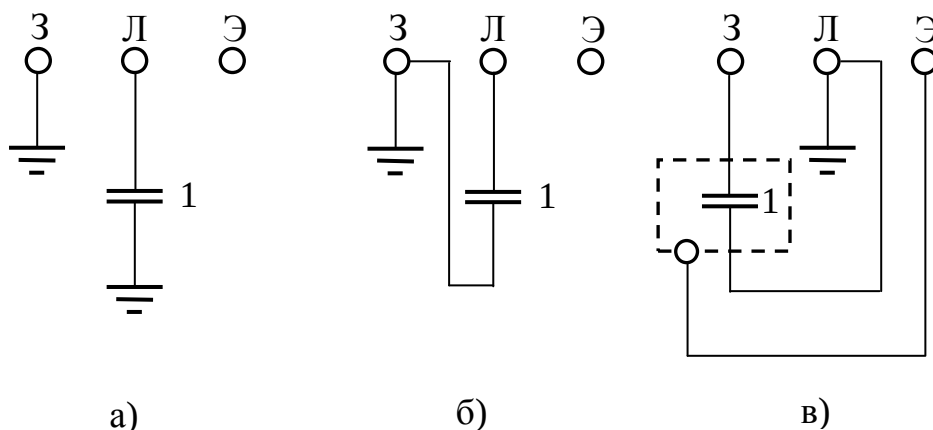


Рисунок 5.11 — Схемы измерений мегаомметром сопротивления изоляции

При измерениях сопротивления изоляции должны строго соблюдаться осторожность и все правила техники безопасности, так как напряжение мегаомметра опасно для жизни человека.

После измерения необходимо разрядить, объект измерения. Для проведения измерений сопротивления изоляции может использоваться мегаомметр типа М4100 с погрешностью не превышающей 1 % длины рабочей части шкалы. При невозбужденном генераторе стрелка прибора может находиться в любом месте шкалы, поэтому перед проведением измерений делается проверка исправности мегаомметра.

Для этого, перед измерением объект заземляют на 2...3 мин для снятия остаточных зарядов, которые могут повлиять на показание прибора. Затем закорачивают зажимы Л (Линия) и З (Земля) и вращают ручку привода генератора с номинальной частотой. При этом стрелка прибора должна установиться на нулевой отметке, Затем размыкают зажимы Л и З — стрелка должна отклониться к краю шкалы с отметкой «бесконечность».

На следующем этапе, например, если необходимо провести измерение сопротивления изоляции обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, вначале делают измерение сопротивления изоляции фаз обмотки относительно корпуса электродвигателя.

Для этого проводник, подключенный к зажиму З (Земля) мегаомметра, подсоединяется к корпусу электродвигателя (или к болту, которым крепится коробка выводов).

Один из проверяющих вращает ручку мегомметра со скоростью около 120 об/мин, а второй — поочередно прикасается к выводам каждой фазы обмотки С1, С2 и С3 или С4, С5 и С6 проводником, подключенным к зажиму Л (линия) мегомметра.

При соединении обмоток треугольником концы и начала обмоток для этой проверки нужно рассоединять.

На втором этапе проводят измерение сопротивления изоляции между фазами обмотки электродвигателя. Для этого один из проверяющих вращает ручку мегаомметра, а второй поочередно касается проводниками от мегомметра выводов фаз обмотки, измеряя при этом сопротивление изоляции между I и II, I и III, II и III фазой обмотки электродвигателя.

В случае отсутствия расцветки с помощью мегаомметра можно определить концы жилы кабеля. Для этого дальний конец жилы кабеля и один зажим прибора присоединяются к заземленным частям конструкций, а с помощью провода от другого зажима прибора производится поиск второго конца жилы кабеля.

5.2.3 Значения сопротивлений изоляции проводов, кабелей, аппаратов, силового оборудования и электрических машин переменного тока

В соответствии с гл.1.8 ПУЭ (“Правила улаштування електроустановок”) установлены наименьшие допустимые значения сопротивлений изоляции аппаратов, вторичных цепей и электропроводки до 1 кВ, представленные в таблице 5.2 [40].

Таблица 5.2 — Наименьшее допустимое сопротивление изоляции аппаратов, вторичных цепей и электропроводки до 1 кВ

Испытуемый элемент	Напряжение мегаомметра, В	Наименьшее допустимое значение сопротивления изоляции, МОм
Вторичные цепи управления, защиты, измерения, сигнализации и т.п. в электроустановках напряжением выше 1 кВ:		
шинки оперативного тока и шинки цепей напряжения на щите управления	500 — 1000	10
каждое присоединение вторичных цепей и цепей питания приводов выключателей и разъединителей	500 — 1000	1,0
Вторичные цепи управления, защиты, сигнализации в релейно-контакторных схемах установок до 1 кВ	500 — 1000	0,5
Цепи бесконтактных схем системы регулирования, а также присоединенные к ним элементы	По данным завода-изготовителя	
Цепи управления, защиты и возбуждения машин постоянного тока напряжением до 1,1 кВ, присоединенных к цепям главного тока	500 — 1000	1,0
Силовые и осветительные электропроводки	1000	0,5
Распределительные устройства, щиты и токопроводы напряжением до 1 кВ	500 — 1000	0,5

Допустимые значения сопротивлений изоляции электродвигателей переменного тока напряжением до 1 кВ, в соответствии с гл.1.8 ПУЭ (“Правила улаштування електроустановок”), должно соответствовать нормам, приведенным в таблице 5.3 [40].

Таблица 5.3 — Допустимое сопротивление изоляции электродвигателей переменного тока

Испытуемый объект	Напряжение мегаомметра, кВ	Сопротивление изоляции
Обмотка статора напряжением до 1 кВ	1	Не менее 0,5 МОм при температуре 10...30 °С
Обмотка ротора синхронного электродвигателя и электродвигателя с фазным ротором	0,5	Не менее 0,2 МОм при температуре 10...30 °С (допускается не ниже 2 кОм при +75 °С или 20 кОм при +20 °С для неявнополусных роторов)
Термоиндикатор	0,25	Не нормируется
Подшипники синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ	1	Не нормируется

Измерение сопротивления изоляции электрических машин и аппаратов следует производить при температуре изоляции не ниже +5° С (кроме случаев, оговоренных специальными инструкциями.).

5.2.4 Допустимые значения сопротивления изоляции для судовых сетей и электрооборудования

Измерение общего сопротивления изоляции судовых сетей, находящихся под напряжением, должно производиться с помощью щитовых мегаомметров.

Показания щитовых мегаомметров следует снимать после полного успокоения стрелки прибора. Прибор состоит из преобразователя измеряемой величины в сигнал постоянного тока и миллиамперметра магнитоэлектрической системы. Ток утечки изоляции контролируемой сети, вызванный постоянным опорным напряжением, проходит по цепи, образованной контролируемой сетью, сопротивлением изоляции этой сети, землей (корпусом) и прибором. Отклонение указателя прибора соответствует величине сопротивления изоляции в момент измерения. При идеальной изоляции сети указатель устанавливается на отметке шкалы «∞». Если мегаомметр отключен, то указатель прибора находится на отметке механического нуля. Сопротивление изоляции судовых сетей, при снятом напряжении, должно измеряться как по отношению к корпусу, так и между фазами (полюсами). Для измерений следует применять переносные мегаомметры класса точности не хуже 1,5 с рабочим напряжением, указанным в таблице 5.4 [41]. Не следует допускать параллельного включения устройств, контролирующих сопротивление изоляции сетей различных секций шин при их соединении в единую систему. Величины сопротивлений изоляции электрооборудования должны соответствовать рекомендациям заводских формуляров или инструкций по эксплуатации. При отсутствии рекомендаций величины сопротивлений изоляции электрооборудования, находящегося в эксплуатации, должны быть не менее значений, указанных в таблице 5.5 [41].

Таблица 5.4 — Выбор рабочего напряжения мегаомметра в зависимости от напряжения измеряемой сети или электрооборудования

Напряжение измеряемой сети или электрооборудования, В	Рабочее напряжение мегаомметра, В
до 50	100
51...100	250
101...400	500
401...1000	1000
свыше 1000	2500

Таблица 5.5 — Значения сопротивлений изоляции судового электрооборудования

Электрическое оборудование	Сопротивление изоляции в нагретом состоянии, МОм	
	нормальное	предельно допустимое
1. Электрические машины при номинальном напряжении до 500 В	0,7 и выше	до 0,2
2. Трансформаторы при номинальном напряжении до 500 В	1,0 и выше	до 0,2
3. Статические преобразователи	1,0 и выше	до 0,5
4. Распределительные щиты, пульты управления при отключенных внешних цепях, сигнальных лампах и т.п. при напряжении:		
до 100 В	0,3 и выше	до 0,06
от 101 до 500 В	1,0 и выше	до 0,2
5. Коммутационная, пусковая и защитная аппаратура	0,5 и выше	до 0,2
6. Аккумуляторные батареи при отключенных потребителях при номинальном напряжении:		
до 24 В	0,1 и выше	до 0,02
от 25 до 220 В	0,5 и выше	до 0,1
7. Фидер кабельной сети с отключенными потребителями при номинальном напряжении:		
силовой от 100 до 500 В	1,0 и выше	до 0,2
освещения от 101 до 220 В	0,5 и выше	до 0,2
освещения до 100 В	0,3 и выше	до 0,06
8. Сети питания аппаратуры внутренней связи, сигнализации, контроля и управления судном при номинальном напряжении:		
до 100 В	0,3 и выше	до 0,06
от 101 до 500 В	1,0 и выше	до 0,2

При электроснабжении судна от береговой сети устройства автоматического контроля сопротивления изоляции следует отключать.

Рекомендуется в таких случаях раз в сутки кратковременно переводить электроснабжение с береговой сети на судовой генератор для возможности осуществления контроля сопротивления изоляции щитовыми приборами. Величина сопротивления изоляции судовой сети с подключенными потребителями не регламентируется. Она зависит от разветвленности сети и числа установленных потребителей. По условиям безопасности предельная минимальная величина сопротивления изоляции сетей переменного тока напряжением до 500 В принимается равной 0,01 МОм.

Устройства непрерывного автоматического контроля сопротивления изоляции в сетях переменного тока должны быть постоянно включены. При их срабатывании допускается отключать только звуковой сигнал, который должен быть снова включен сразу же после отключения участка сети с пониженным сопротивлением изоляции. Измерение сопротивления изоляции электрооборудования в нагретом (рабочем) состоянии должно выполняться немедленно после вывода из действия и отключения питающего напряжения.

Отсчет величины сопротивления изоляции должен производиться не ранее, чем через 1 минуту после приложения испытательного напряжения. Измерение сопротивления изоляции электрооборудования, в состав которого входят элементы электроники, необходимо выполнять приборами, рекомендованными инструкцией по эксплуатации этого электрооборудования. При отсутствии таких рекомендаций следует применять омметры с низким напряжением. При выполнении измерений сопротивления изоляции с помощью переносных мегаомметров необходимо соблюдать меры безопасности в соответствии с Правилами техники безопасности.

Электрооборудование, сопротивление изоляций которого ниже нормы, должно быть выведено из действия, после чего необходимо принять меры к повышению сопротивления его изоляции.

Ввод в действие электрооборудования, имеющего сопротивление изоляции ниже нормы, запрещается.

Для предотвращения снижения сопротивления изоляции неработающего электрооборудования, имеющего встроенные электрообогреватели, последние следует включать по мере необходимости. Работы по ТО устройств автоматического контроля сопротивления изоляции должны производиться в соответствии с инструкцией по эксплуатации или выполняться специализированным предприятием в период проведения ТО распределительных устройств, где они установлены.

Общее сопротивление изоляции судовых сетей щитовыми мегаомметрами необходимо измерять не реже одного раза в сутки, при наличии вахты - не реже одного раза за вахту. Результаты измерений должны быть занесены в машинный электротехнический журнал.

Измерения сопротивлений изоляции всего электрооборудования должны производиться переносными мегаомметрами при снятом напряжении не реже одного раза в месяц с занесением результатов измерений в журнал техническо-

го состояния. Измерение сопротивления изоляции необходимо производить также в следующих случаях:

- при подготовке электрооборудования к действию и после вывода его из действия, если это предусмотрено инструкцией по эксплуатации или указаниями соответствующих разделов Правил;
- при вводе электрооборудования в действие после ремонта или продолжительного нерабочего периода;
- перед началом и после окончания работ по ТО электрооборудования;
- перед выдачей передвижного, переносного электрооборудования и ручного электроинструмента для использования.

На рисунке 5.12, в качестве примера, изображен щитовой мегаомметр М 1423.1. Прибор предназначен для измерения сопротивления изоляции сетей переменного тока, находящихся под напряжением и не имеющих гальванической связи с сетью постоянного тока, а также обесточенных сетей постоянного и переменного тока. Мегаомметр отвечает требованиям Морского и Речного Регистров.



Рисунок 5.12 — Мегаомметр М 1423.1

Прибор имеет следующие данные [76]:

- класс точности: 2,5;
- диапазон измерений: 0...5 МОм;
- параметры контролируемой сети:
- номинальное напряжение: 127, 220 или 380 В;
- номинальная частота 50...500 Гц.

5.3 Контрольные вопросы

1. Для каких измерений нашли применение мосты постоянного тока?
2. Какие достоинства имеют мосты постоянного тока по сравнению с другими типами приборов?
3. Как устроен мост Уитстона?
4. В чем особенность мостов переменного тока?
5. Как работает мост для измерения индуктивности?
6. Какова периодичность измерения сопротивления изоляции судового электрооборудования?
7. Как устроены мосты для измерения емкости?
8. Какие существуют условия равновесия мостов?
9. Каково устройство и принцип действия мегаомметра?
10. С какой целью необходима проверка сопротивления изоляции?

Часть 6. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

6.1 Цифровые вольтметры

6.1.1 Устройство цифровых измерительных приборов

Практически почти вся информация о физических явлениях и процессах (давление, температура, электрическое сопротивление, сила тока, напряжение и т.д.) представляется в аналоговой форме. Для измерения этих параметров применяются аналоговые измерительные приборы. В целях повышения точности и надежности средств измерений, вначале следует преобразовать аналоговый сигнал в дискретный выходной сигнал и представить его в цифровой форме, а затем отобразить в виде чисел на цифровом индикаторе.

Цифровой измерительный прибор (ЦИП) — это прибор, который в процессе измерения осуществляют автоматическое преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную с последующей индикацией результата измерений на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ). Основные преимущества ЦИП, по сравнению с аналоговыми измерительными приборами, заключаются в следующем: широкий рабочий диапазон измерений; высокое быстродействие; высокая точность; возможность работы в составе различных информационно-измерительных компьютерных систем; объективность отсчёта; автоматическое введение поправок для уменьшения систематических погрешностей; автоматическая калибровка прибора и удобство в эксплуатации.

Обобщенная схема цифрового измерительного прибора изображена на рисунке 6.1. В этом приборе аналоговая величина $x(t)$ сначала преобразуется входным измерительным преобразователем (ИП) к виду, удобному для последующего преобразования, а затем с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровой код. В качестве ИП могут применяться различного рода датчики, преобразующие неэлектрические измеряемые величины в электрические величины, которые удобно регистрировать и обрабатывать. Отображение цифровой измерительной информации осуществляется с помощью цифрового отсчетного устройства (ЦОУ), а управление всеми блоками прибора — с помощью устройства управления (УУ) [4]. На рисунке 6.2 изображена последовательность операций, выполняемых в АЦП, а на рисунке 6.3 — виды сигналов, получаемых в ходе операций аналого-цифрового преобразования.

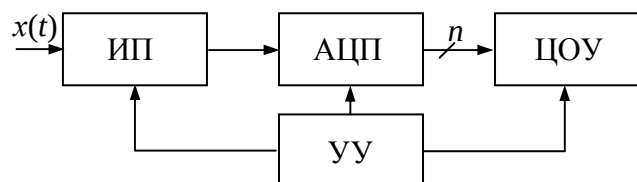


Рисунок 6.1 — Обобщенная схема цифрового измерительного прибора

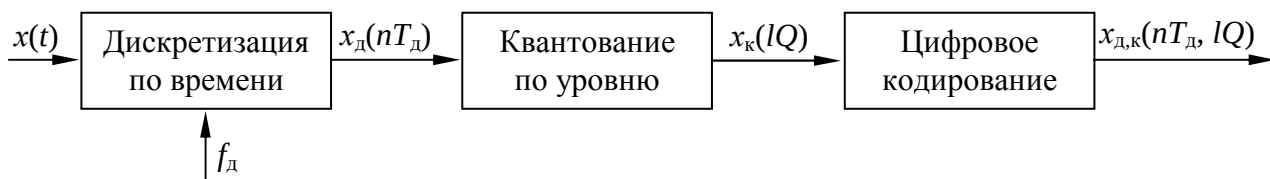


Рисунок 6.2 — Последовательность операций, выполняемых в АЦП

Аналого-цифровое преобразование включает в себя следующие операции: дискретизацию сигнала по времени; квантование по уровню (квантование значений амплитуды) и цифровое кодирование.

Рассмотрим последовательность операций, выполняемых в АЦП.

На рисунке 6.3,а представлена зависимость исходного аналогового входного сигнала $x(t)$.

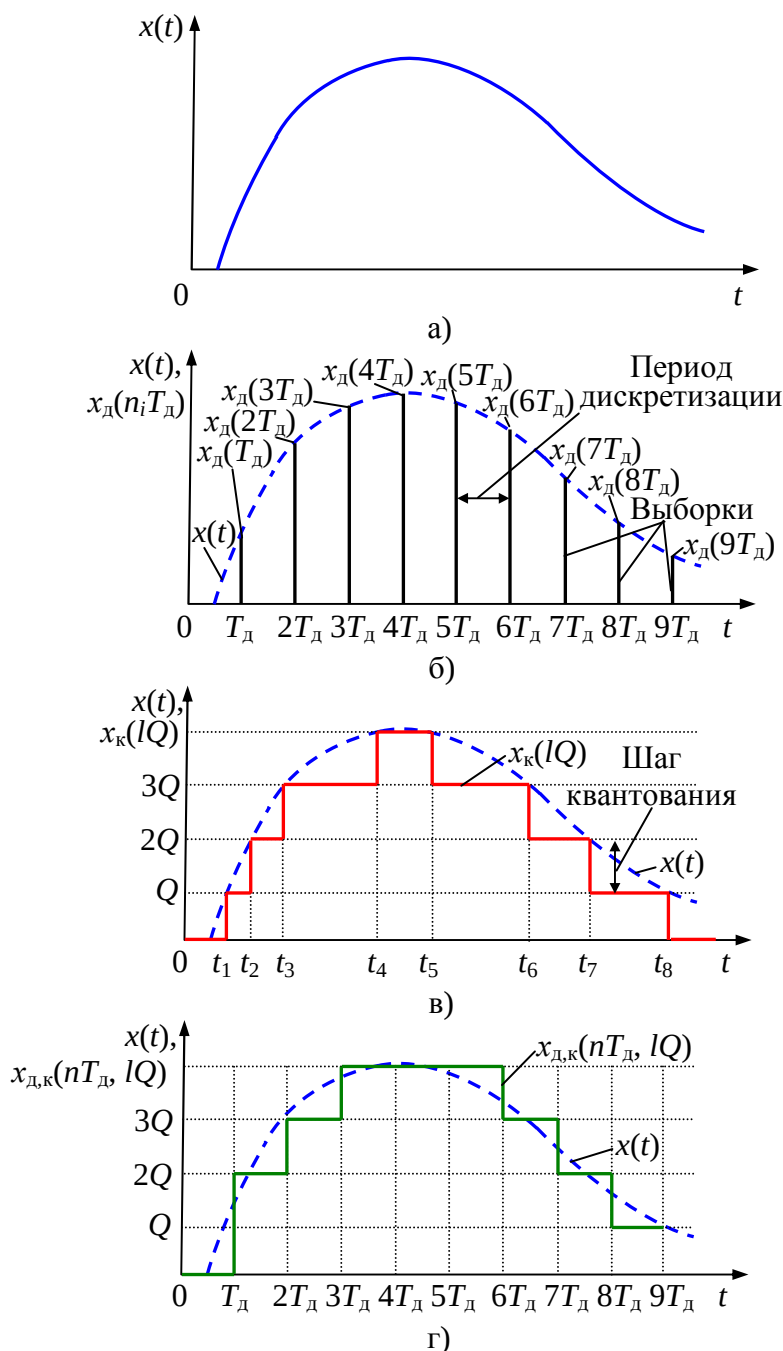


Рисунок 6.3 — Виды сигналов, получаемых в ходе операций аналого-цифрового преобразования:

- а) — исходной аналоговый сигнал;
- б) — сигнал, дискретизированный по времени;
- в) — сигнал, квантованный по уровню;
- г) — сигнал, представленный в цифровом виде

значением ступенчатой функции $x_k(lQ)$ по установленной шкале дискретных (разрешенных) уровней, различающихся на величину Q , называемую шагом

дискретизации сигнала (n — целое число). Первая операция, осуществляемая в АЦП, называется дискретизацией по времени. Процесс операции дискретизации по времени в АЦП изображен на рисунке 6.3,б. Дискретизация по времени — это есть процесс получения отсчетов (выборки) измеряемой величины в определенные дискретные моменты времени. В этом процессе непрерывная измеряемая величина $x(t)$ заменяется последовательностью отсчетов $x_d(nT_d)$, взятых в некоторые дискретные и равноотстоящие n -е моменты времени nT_d , где $T_d = \frac{1}{f_d}$ — период (шаг) дискретизации сигнала (n — целое число).

Дискретизация значений измерительного сигнала по уровню носит название квантования. Процесс операции квантования по уровню изображен на рисунке 6.3,в.

Операция квантования по уровню сводится к тому, что непрерывная по времени и амплитуде величина $x(t)$ заменяется ближайшим фиксированным

квантования. Функция $x_k(lQ)$ является непрерывной по времени.

На рисунке 6.3,в видно, что пересечение функции $x(t)$ с квантованными уровнями lQ будет наблюдаться в неравные промежутки времени, причем значения функций $x(t)$ и $x_k(lQ)$ в произвольные моменты времени t_i будут совпадать. Таким образом, диапазон, в котором изменяется функция $x(t)$, разбивается на l квантованных уровней lQ с равным шагом Q , а преобразование сигнала осуществляется только в фиксированные моменты времени t_i с равными периодами дискретизации T_d . Форма исходного аналогового сигнала, представленная в цифровом виде, изображена на рисунке 6.3,г. На этом рисунке видно, что значения функции $x(t)$ в эти моменты времени не совпадают с заданными квантованными уровнями lQ . Вследствие этого в моменты времени t_i в качестве значений ступенчатой функции $x_{д,к}(nT_d, lQ)$ выбирают округленные до ближайшего уровня lQ значения исходной функции $x(t)$. В результате такого округления погрешность преобразовании будет определяться величиной, равной половине кванта ($\pm Q/2$). Сигнал, дискретный во времени и квантованный по уровню, называют цифровым сигналом.

Последующей операцией в АЦП является кодирование. Цифровой код — это последовательность цифр или сигналов, с помощью которой выполняется условное представление численного значения величины по определенному закону. Для этого необходимо значению каждого квантованного уровня (см. рисунок 6.3,г) присвоить цифровой код. Чаще всего цифровой код выбирается равным десятичному эквиваленту номера l квантованного уровня. Нумерация уровней обычно ведётся с нуля. Тогда максимально возможному значению входного напряжения АЦП будет соответствовать максимальное значение кода за вычетом одного кванта, так как одна кодовая комбинация соответствует нулевому значению входного напряжения АЦП. Например, при выборе кода в соответствии с порядковыми номерами уровней квантования, представленная на рисунке 6.3,г функция $x(t)$ может быть заменена последовательностью десятичных чисел: $K_l = \{0, 2, 3, 4, 4, 3, 2, 1\}$, или в двоичной форме $K_l = \{000, 010, 011, 100, 100, 100, 011, 010, 001\}$.

Схемная реализация АЦП может быть выполнена с применением одной специализированной микросхемы АЦП или с использованием нескольких аналоговых и цифровых схем. Микросхемы АЦП, выпускаемые промышленностью, в основном предназначены для работы с напряжением. В связи с этим, существуют АЦП: мгновенных и средних значений напряжения.

Аналого-цифровые преобразователи подразделяются на АЦП: прямого преобразования и сравнения (уравновешивающего преобразования). В АЦП прямого преобразования преобразование непрерывной аналоговой величины осуществляется непосредственно в дискретную величину, а в АЦП сравнения — путем сравнения с известной величиной.

АЦП прямого преобразования существуют: параллельного; последовательного и параллельно-последовательного типов. В свою очередь, АЦП сравнения существуют следующих видов: последовательного приближения (с поразрядным уравновешиванием); сравнения с пилообразным сигналом (интегрирующие, последовательного счета); с двухстадийным интегрированием; с про-

межуточным преобразованием в частоту следования импульсов; с дельта-сигма модуляцией.

Рассмотрим основные характеристики АЦП. Одним из основных параметров АЦП, определяющих точность преобразования, является **разрядность n выходного кода АЦП**, характеризующая количество разрядов для отображения аналогового сигнала. При двоичной системе исчисления разрядность n определяет количество квантованных уровней $I_{\text{макс}} = 2^n$, является его разрядность. Эта характеристика определяет предельно достижимую точность АЦП (когда все остальные элементы являются идеальными и не имеют погрешностей), обусловленную погрешностью дискретности.

Погрешность дискретности (квантования) — это погрешность представления аналоговой (непрерывной) величины в виде цифрового кода. Ее значение является величиной обратной количеству двоичных разрядов числового кода на выходе устройства. Так для 8-разрядного АЦП эта погрешность (предельная точность) составит $\delta = 100/2^8 \% = 0,39 \%$, а для 16-разрядного АЦП — $\delta \approx 0,002 \%$.

Следующей характеристикой является **разрешающая способность** (чувствительность), означающая значение минимального изменения входного сигнала АЦП, которое вызовет изменение цифрового кода на единицу.

Каждый АЦП имеет свой диапазон входных напряжений, которые преобразователь в состоянии отобразить принятым выходным кодом. Поскольку в процессе квантования отсчеты могут принимать только значения кратные шагу квантования, то при оценке истинного значения выборки будет возникать ошибка, которую рассматривая как функцию времени называют **шумом квантования**. Величина этой ошибки равна половине шага квантования и не зависит от уровня квантуемого сигнала. Чем больше число разрядов квантования, тем меньше величина шума квантования.

6.1.2 Обобщённая структурная схема цифрового вольтметра

Цифровые вольтметры (ЦВ) — это приборы, у которых результат измерения напряжений постоянного (переменного) тока представляется в цифровой форме. Обобщённая структурная схема цифрового вольтметра изображена на рисунке 6.4. Схема называется обобщенной, потому, что все ее блоки присутствуют в любом ЦВ. На этом рисунке введены следующие обозначения: ВУ — входное устройство, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, УУ — устройство управления, ЦОУ — цифровое отсчетное устройство [12].

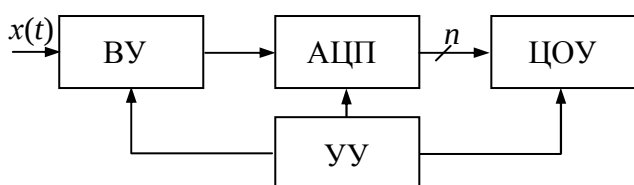


Рисунок 6.4 — Обобщенная схема цифрового вольтметра

изменения напряжения. Для этой цели в ВУ установлен высокоомный делитель напряжения.

При измерении переменных напряжений, в схеме ВУ имеется детектор,

Рассмотрим принцип работы ЦВ. Измеряемое напряжение подводится к ВУ, одной из задач которого является нормализация входного напряжения, проводимая с целью недопущения превышения нормального уровня независимо от пределов

преобразующий измеряемое переменное напряжение в постоянное. В качестве делителя напряжения используется аттенюатор. Если необходимо повысить чувствительность вольтметра, то в схему ВУ устанавливается усилитель электрических сигналов.

С выхода ВУ измеряемое напряжение поступает на АЦП, который преобразует входное напряжение в цифровой код. Далее цифровой код подается на ЦОУ, представляющее собой цифровой дисплей, на котором в десятичной системе счисления отображается измерительная информация.

К основным типам ЦВ относят:

- вольтметры постоянного (переменного) тока;
- щитовые вольтметры постоянного (переменного) тока;
- универсальные вольтметры (мультиметры), позволяющие измерять постоянные и переменные напряжения и токи, а также сопротивления постоянному току;
- щитовые мультиметры, предназначенные для измерения переменного напряжения, тока и частоты сети;
- вольтметры импульсные, предназначенные для точного измерения амплитудных значений видеоимпульсных и гармонических искажений, а также напряжений постоянного тока.

По методу применяемого способа аналого-цифрового преобразования измеряемой величины различают ЦВ: с время-импульсным преобразованием, с двухтактным интегрированием, с поразрядным уравниванием, с преобразованием напряжения в частоту, с непосредственным преобразованием напряжения в код. В современных цифровых вольтметрах с непосредственным преобразованием напряжения в код, а также поразрядным уравниванием и преобразованием напряжения в частоту применяются специализированные микросхемы и схемы АЦП.

К основным техническим характеристикам ЦВ относят [35]:

- относительную погрешность измерения;
- пределы измерения напряжения и количество отдельных поддиапазонов;
- разрешающую способность;
- способы переключения поддиапазонов;
- входное сопротивление;
- продолжительность одного измерения (быстродействие) прибора;
- способы запуска;
- помехоустойчивость;
- условия эксплуатации, способы питания прибора и массогабаритные показатели.

Для универсальных вольтметров (мультиметров) добавляются технические характеристики по пределам измерения переменных напряжения и тока, а также сопротивления.

Погрешность измерения напряжения ЦВ включает ряд отдельных погрешностей, к которым можно отнести погрешности: сравнения, преобразования, меры и т.д. В техническом описании к каждому прибору приводится формула

определения относительной погрешности ЦВ. Как было показано ранее в п. 2.2, предельное значение относительной погрешности цифровых измерительных приборов представляется в виде [12]:

$$\delta_{\text{макс}} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \%,$$

где $c = \left(b + \frac{a}{x_k} \right) 100\%$, $d = \frac{a}{x_k} 100\%$ — постоянные числа; x_k — больший (по модулю) из пределов измерений; x — показание прибора.

В соответствии с ГОСТ 8.401-80, для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме относительных погрешностей в соответствии с последней формулой, классы точности в документации следует, обозначать числами c и d , разделяя их косой чертой, то есть c/d . Соотношение между числами c и d устанавливается в стандартах на средства измерений конкретного вида. В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика (таблицы).

При проведении измерений следует правильно выбирать предел измерений. Это можно показать на примере цифрового универсального вольтметра В7-40, имеющего по паспорту класс точности 0,05/0,02 при измерении напряжения постоянного тока в пределе до 2 В.

Для этого ЦВ предельное значение основной относительной погрешности в конце диапазона составит $\delta_{\text{макс}} = \pm c \% = \pm 0,05\%$, а в середине диапазона —

$$\delta_{\text{макс}} = \pm \left[0,05 + 0,02 \left(\frac{x_k}{x_k/2} - 1 \right) \right] \% = 0,07\% .$$

Полученные результаты показывают, что если в цифровом приборе отсутствует автоматическое переключение пределов измерений, то для повышения точности измерений необходимо, чтобы результат измерения находился как можно ближе к верхнему пределу диапазона измерений x_k .

Пределы измерения напряжения для разных типов ЦВ могут лежать в пределах от 0,1 мВ до 1000 В, а количество поддиапазонов может составлять от 2 до 6, причем выбор поддиапазона возможен ручной, автоматический или дистанционный.

В ЦВ запуск на измерение может осуществляться однократно, автоматически или дистанционно. В тоже время продолжительность одного измерения для разных типов ЦВ может составлять от 0,001 до 10 с.

Разрешающая способность, под которой понимают минимальную разность двух значений измеряемых напряжений, которую можно различить, для разных типов ЦВ лежит в пределах от единиц мкВ до одного мВ.

Значение входного сопротивления ЦВ, используемых при настройке и поверке электро- и радиотехнического оборудования, может находиться в пределах от 1 до 1000 МОм.

В целях повышения помехоустойчивости ЦВ от воздействия сетевых помех в схемах приборов используются специальные фильтры, причем ослабле-

ние такого рода помех может достигать более 100 дБ.

На рисунке 6.5, в качестве примера, изображен щитовой цифровой мультиметр типа Omix P99-AVF-1-1.0, используемый для измерения и индикации в реальном времени трех параметров переменного тока: силы тока, напряжения, частоты. Значения пределов измерений задаются кнопками на лицевой панели. Мультиметр имеет три 4-х разрядных индикатора (по одному на каждый параметр).



Рисунок 6.5 — Цифровой мультиметр Omix P99-AVF-1-1.0

Основные технические характеристики прибора Omix P99-AVF-1-1.0 [77]:

— диапазон измерения силы тока при прямом подключении составляет 0...5 А, а с трансформатором тока — до 9000 А;

— диапазон измерения напряжения при прямом подключении имеет значение 0...600 В, а с трансформатором напряжения — до 3600 В;

— диапазон измерения частоты лежит в пределах 10...100 Гц;

— точность измерения составляет 1 % ± единица последнего разряда.

6.1.3 Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием

На рисунке 6.6 изображена структурная схема цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием, а на рисунке 6.7 — временные диаграммы, поясняющие принцип его работы [1].

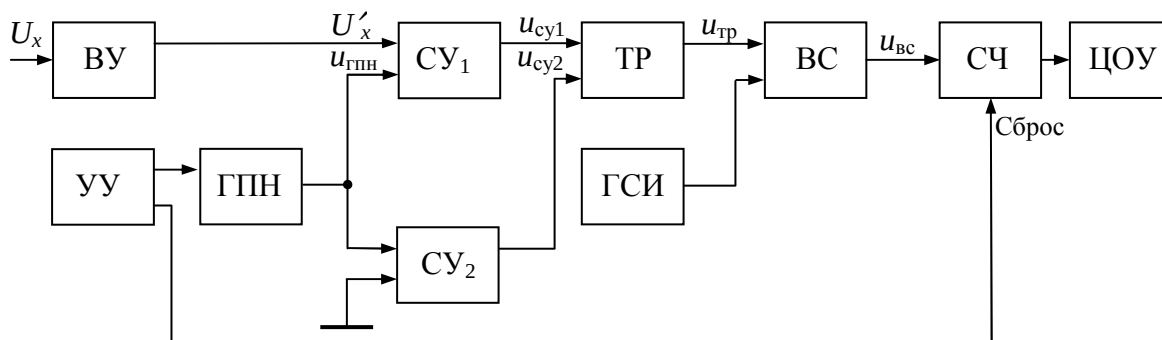


Рисунок 6.6 — Структурная схема цифрового вольтметра с время - импульсным преобразованием

Рассмотрим работу схемы цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием. В схеме вольтметра измеряемое постоянное напряжение U_x преобразуется во временной интервал, заполняемый счётными импульсами. Число импульсов, подсчитанное счетчиком прибора в течение этого временного интервала, является пропорциональным измеряемому напряжению. Результат подсчета импульсов счетчиком отображается на цифровом отсчетном устройстве. В цифровой вольтметр входят следующие блоки: входное устройство (ВУ), генератор пилообразного напряжения (ГПН), управляющее устройство (УУ), два сравнивающих устройства (СУ₁ И СУ₂), генератор счетных импуль-

сов (ГСИ), временной селектор (ВС), триггер (ТР), счетчик импульсов (СЧ), цифровое отсчетное устройство (ЦОУ). Во входном устройстве ВУ измеряемое напряжение нормализуется, то есть усиливается или ослабляется, так что $U'_x = k_{\text{вх}} U_x$, где $k_{\text{вх}}$ — коэффициент передачи ВУ. В последующих выражениях U'_x обозначается U_x . Цифровой вольтметр измеряется напряжение циклами, которые задаются с помощью управляющего устройства УУ. В начале цикла УУ сбрасывает предыдущее состояние счетчика СЧ и запускает генератор пилообразного напряжения ГПН.

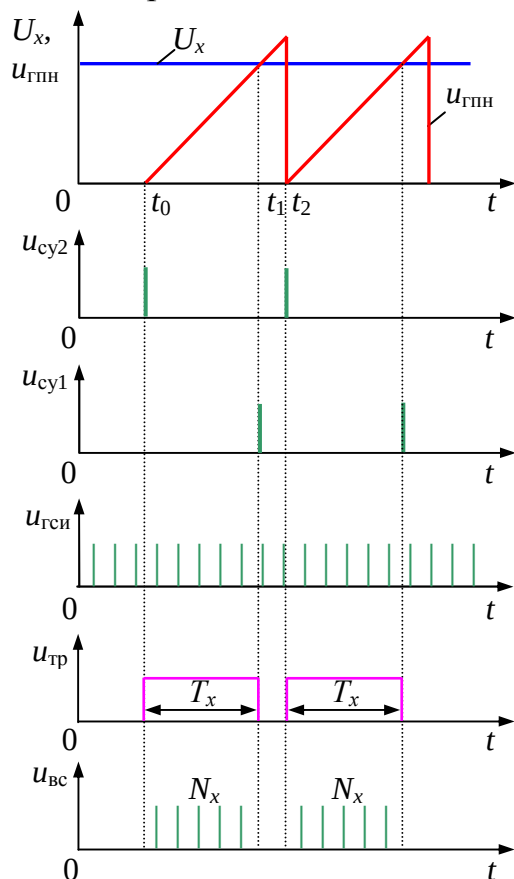


Рисунок 6.7 — Временные диаграммы работы цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием

В момент t_0 равенства линейно-нарастающего образцового напряжения с выхода ГПН и напряжения нулевого уровня на входах второго сравнивающего устройства СУ₂, на выходе последнего возникает импульс, переключающий триггер ТР в состояние “логической 1”. Импульс с выхода триггера ТР открывает временной селектор ВС, в результате чего импульсы с генератора счетных импульсов ГСИ поступают на счетчик импульсов СЧ и им подсчитываются. В свою очередь, на входы первого сравнивающего устройства СУ₁ поступают линейно-нарастающее напряжение с генератора ГПН и входное измеряемое напряжение, и в момент их равенства t_1 на выходе последнего возникает импульс, возвращающий триггер в состояние “логического 0”. В результате этого закрывается временной селектор ВС и импульсы с генератора счетных импульсов ГСИ перестают поступать на счетчик импульсов СЧ.

Триггер выполняет роль ключа с памятью, формирующего, так называемые “временные ворота”, в течение которых импульсы проходят на счетчик.

Результат подсчета импульсов счетчиком отображается на цифровом отсчетном устройстве ЦОУ.

С момента времени t_2 начинается новый цикл измерений. Количество счетных импульсов, прошедших через временной селектор ВС в цифровой счетчик СЧ, будет определяться измерительным интервалом времени $T_x = t_1 - t_0$ и частотой f_0 , то есть [1]:

$$N_x = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0 = \frac{U_x f_0}{k_{\text{н}}},$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент наклона сигнала ГПН.

Из последнего выражения показание прибора будет равным:

$$U_x = \frac{k_n}{f_0} N_x.$$

Для вольтметра этого типа отношение k_n/f_0 является постоянной величиной и выбирается равным 10^n ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Тогда, окончательно, $U_x = 10^n N_x$, то есть показания счетчика будут соответствовать значению измеряемого напряжения.

Результирующая погрешность ЦВ с время-импульсным преобразованием зависит от следующих факторов:

- стабильности и линейности пилообразного напряжения ГЛИН;
- нестабильности частоты f_0 ГСИ;
- погрешности квантования, зависящей от значения частоты f_0 ;
- погрешности порогов срабатывания сравнивающих устройств.

Приборы этого типа имеют несложную электрическую схему и высокую скорость преобразования. Минимальная погрешность измерения напряжения ЦВ с время-импульсным преобразованием составляет 0,05 %.

6.1.4 Цифровые вольтметры с двухтактным интегрированием

Структурная схема вольтметра с двухтактным интегрированием изображена на рисунке 6.8, а на рисунке 6.9 — временные диаграммы, поясняющие принцип его работы [4].

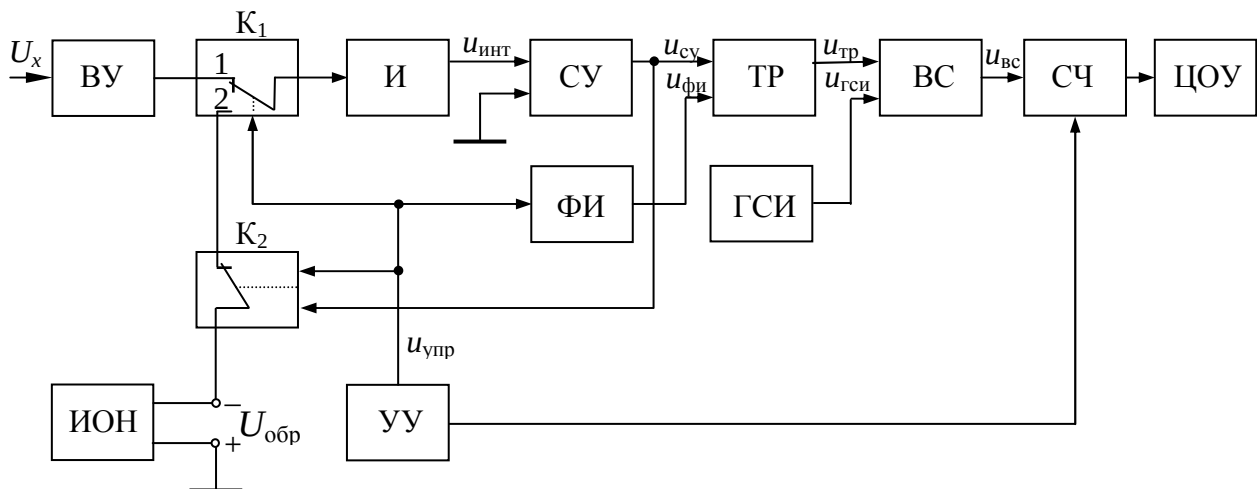


Рисунок 6.8 — Структурная схема цифрового вольтметра с двухтактным интегрированием

В отличие ЦВ с время-импульсным преобразованием, у вольтметров с двухтактным интегрированием используются два временных интервала в течение цикла измерения. Принцип работы прибора следующий. В начальный момент времени устройство управления УУ вырабатывает прямоугольный импульс с длительностью T_1 , который переводит схему в исходное состояние, обнуляя ее цифровую часть. В момент появления фронта импульса с длительностью T_1 электронный ключ K_1 переводится в положение 1 и на вход интегратора И подается измеряемое постоянное напряжение U_x . С этого момента начинается процесс интегрирования “вверх”, заключающийся в росте выходного напряжения интегратора И ($u_{\text{инт}}$) по линейному закону. Скорость нарастания этого на-

пряжения (прямая 1 на рисунке 6.9), определяемая углом наклона α , пропорциональна значению измеряемого напряжения U_x .

В момент окончания действия импульса с длительностью T_1 с выхода формирователя импульсов ФИ на триггер ТР поступает короткий импульс $u_{\text{фи}}$, который переводит его из состояния логического “0” в состояние логической “1”. В это же время устройство управления УУ переводит ключ K_1 из положения 1 в положение 2 и вход интегратора подключается к источнику образцового напряжения ИОН, полярность напряжения $U_{\text{обр}}$ которого противоположна полярности измеряемого напряжения. С этого момента времени начинается процесс интегрирования “вниз”, результатом которого будет линейное убывание напряжения на выходе интегратора. Крутизна этого напряжения, определяемая углом наклона β , пропорциональна напряжению $U_{\text{обр}}$.

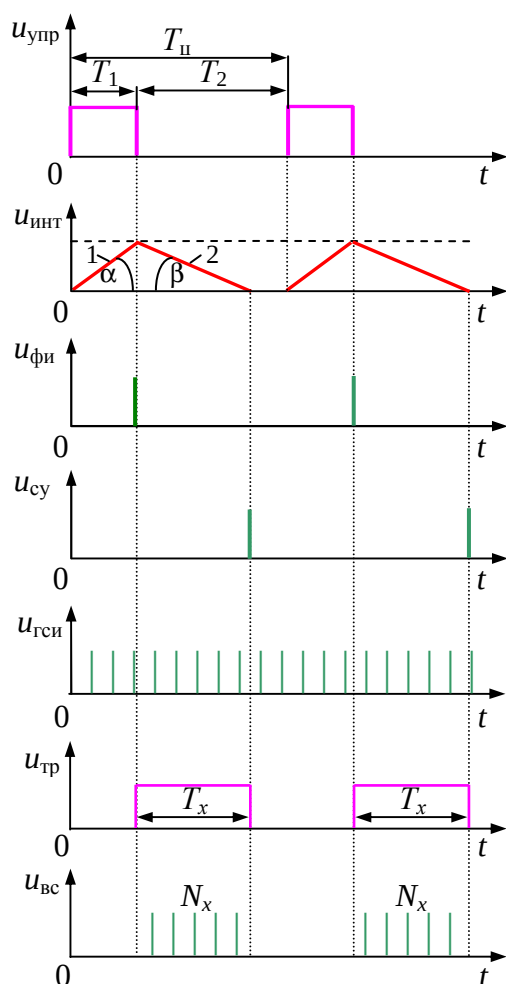


Рисунок 6.9 — Временные диаграммы работы цифрового вольтметра с двухтактным интегрированием

В момент окончания действия импульса с длительностью T_1 , одновременно с началом процесса интегрирования “вниз”, импульсом $u_{\text{тр}}$ с выхода триггера ТР открывается временной селектор ВС, представляющий собой управляемый электронный ключ. С открытием ВС счетчиком импульсов СЧ начинается счет импульсов $u_{\text{вс}}$, поступающих от генератора счетных импульсов ГСИ.

Когда на выходе интегратора напряжение станет равным нулю, импульс $u_{\text{су}}$ с выхода сравнивающего устройства СУ поступает на триггер ТР, возвращающий его в исходное состояние (состояние логического “0”), а также — на ключ K_2 . Импульс $u_{\text{су}}$ с выхода сравнивающего устройства СУ размыкает ключ K_2 . При закрытии ВС поступление импульсов в счетчик прекращается.

За временной интервал T_x от генератора счетных импульсов ГСИ поступает N_x импульсов. Новый цикл измерений начнется в момент поступления с управляющего устройства очередного импульса с длительностью T_1 .

В вольтметре с двухтактным интегрированием зависимость между длительностью импульса T_x с выхода триггера ТР и измеряемым напряжением U_x определяется как:

$$T_x = \frac{U_x}{U_{\text{обр}}} T_1.$$

По последнему выражению длительность импульса T_x не зависит от посто-

янной времени $\tau=RC$ интегратора И, что является преимуществом данной схемы, так как не требует применения термостабильных элементов R и C . Кроме того, значения напряжения $U_{\text{обр}}$ и длительности импульса T_1 могут поддерживаться постоянными с высокой точностью, что позволяет получить малую погрешность измерения.

За время T_x на счетчик пройдет $N_x = f_0 T_x$ импульсов, где f_0 — частота следования счетных импульсов с ГСИ. Поэтому зависимость между величиной импульсов N_x , сосчитанных счетчиком и измеренным напряжением U_x определится следующим образом:

$$U_x = \frac{U_{\text{оп}}}{T_1} f_0 N_x = k_B N_x,$$

где $k_b = \frac{U_{\text{обр}}}{T_1} f_0$. Значение k_b является постоянной величиной и выбирается равным 10^n ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Тогда $U_x = 10^n N_x$, то есть показания счетчика будут соответствовать значению измеряемого напряжения. Погрешность ЦВ с двухтактным интегрированием зависит от следующих факторов:

- нестабильность ИОН;
- погрешности квантования;
- чувствительность и дрейф нуля СУ.

Для повышения точности измерения в схеме ЦВ применяется схема автокоррекции. Основная погрешность вольтметров этого типа составляет 0,01...0,005 %, а быстродействие — 0,05...0,1 с.

6.1.5 Цифровые вольтметры с поразрядным уравниванием

На рисунке 6.10 изображена структурная схема цифрового вольтметра с поразрядным уравниванием, а на рисунке 6.11 — временные диаграммы его работы [12].

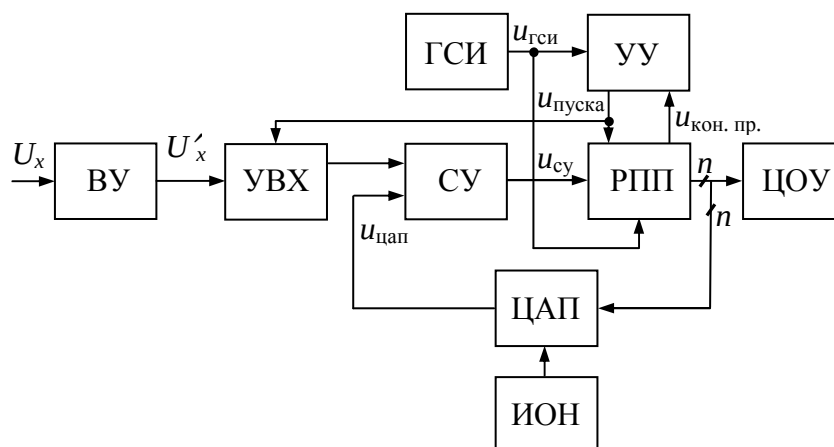


Рисунок 6.10 — Структурная схема цифрового вольтметра с поразрядным уравниванием

На схеме, изображенной на рисунке 6.10, измеряемое напряжение U_x поступает на входное устройство (ВУ), включающее входной делитель, переключаемый вручную или автоматически. В ВУ измеряемое напряжение нормализу-

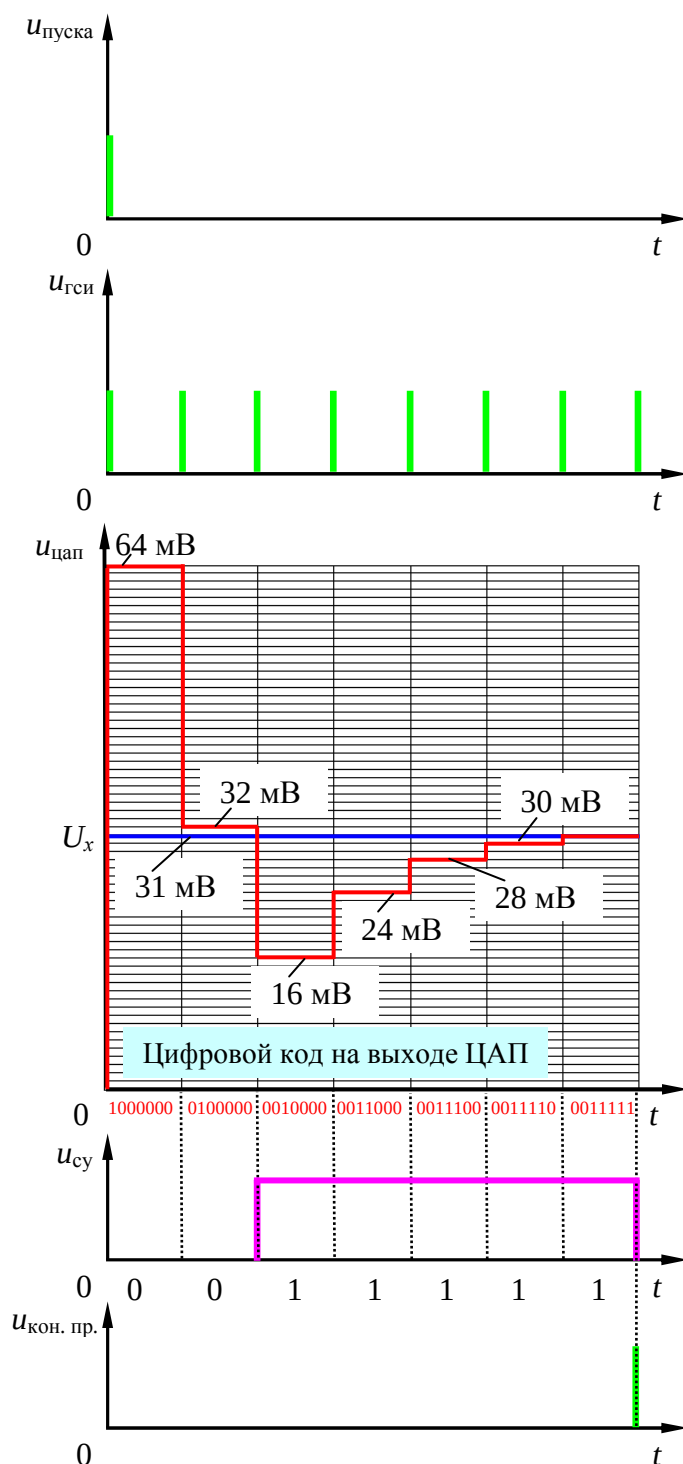


Рисунок 6.11 — Временные диаграммы работы цифрового вольтметра с поразрядным уравниванием

ся в “логическую 1”. Выходной двоичный код с РПП подается на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который преобразует цифровой код в аналоговое напряжение $u_{\text{цап}}$.

Управление РПП осуществляется сигналом $u_{\text{су}}$ с сравнивающего устройства (СУ). На первый вход СУ подается напряжение с выхода УВХ, а на второй его вход — напряжение $u_{\text{цап}}$ с выхода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Если напряжение с ЦАП больше измеряемого напряжения, то на выхо-

ется, то есть усиливается или ослабляется, так что:

$$U'_x = k_{\text{вх}} U_x,$$

где $k_{\text{вх}}$ — коэффициент передачи ВУ.

В случае если необходимо расширить диапазон измеряемых напряжений в сторону более малых значений, в схему ВУ подключается усилитель электрических сигналов (на схеме не показан).

Длительность процесса преобразования зависит от числа разрядов АЦП и частоты импульсов с генератора счетных импульсов (ГСИ). В случае если за период измерения входное напряжение может измениться, то это приведет к снижению точности измерений. Для того, чтобы измеряемое напряжение в течение времени преобразования АЦП оставалось постоянным, в схеме вольтметра используется устройство выборки-хранения (УВХ), которое в момент подачи управляющего импульса $u_{\text{пуска}}$ с управляющего устройства (УУ) устанавливается в режим хранения напряжения с выхода ВУ.

С подачей первого управляющего импульса $u_{\text{пуска}}$ все разряды регистра последовательного приближения (РПП) сбрасываются в “логический 0”, кроме первого (старшего) значащего разряда, который устанавливается

де СУ появится сигнал “логического 0”, который сбрасывает старший разряд РПП. В противном случае, когда напряжение с ЦАП меньше измеряемого напряжения, старший разряд РПП остается установленным. При поступлении следующего тактового импульса с ГСИ другой старший значащий разряд устанавливается в “логическую 1”. Если напряжение с ЦАП больше измеряемого напряжения, то на выходе СУ появится сигнал “логического 0”, который сбрасывает старший разряд РПП. В противном случае разряд остается установленным. С каждым тактовым импульсом с ГСИ процесс поочередно повторяется для каждого разряда. Когда все разряды РПП будут установлены, содержимое РПП придет в соответствие со значением измеряемого входного напряжения и преобразование завершится.

В примере, приведенном на рисунке 6.11, с приходом первого тактового импульса РПП принудительно задает на вход ЦАП код, равный половине его шкалы (для 7-разрядного ЦАП это соответствует в двоичном коде 1000000_2 или в десятичном коде — 64_{10}). Значение выходного напряжения с ЦАП определяется двоичным кодом и опорным напряжением, поступающим с источника опорного напряжения (ИОН).

Для удобства рассмотрения принципа работы устройства ступень квантования или значение напряжения с ЦАП, соответствующее младшему значащему разряду, было выбрано равным $u_{\text{мзр}} = 1$ мВ, а входное измеряемое напряжение — $U_x = 31$ мВ.

Таким образом, при значении на входе ЦАП кода 1000000, на его выходе будет напряжение, равное $u_{\text{цап}} = 2^6 \cdot U_{\text{мзр}} = 64$ мВ. Вследствие того, что напряжение с ЦАП больше измеряемого напряжения, на выходе СУ появится сигнал “логического 0”. В результате при поступлении второго тактового импульса в РПП будет записан код 0100000, а на выходе ЦАП будет напряжение, равное $u_{\text{цап}} = 2^5 \cdot U_{\text{мзр}} = 32$ мВ. При сравнении измеряемого напряжения с напряжением с ЦАП на выходе СУ снова появится сигнал “логического 0”, так как напряжение с ЦАП больше измеряемого напряжения. Поэтому при поступлении третьего тактового импульса в РПП будет записан код 0010000, а на выходе ЦАП будет напряжение, равное $u_{\text{цап}} = 2^4 \cdot U_{\text{мзр}} = 16$ мВ.

Дальнейшее сравнение измеряемого напряжения с выходным напряжением с ЦАП приведет к появлению на выходе СУ сигналов “логической 1”, так как напряжение с ЦАП будет меньше измеряемого напряжения. В результате при поступлении седьмого тактового импульса в регистр последовательного приближения будет записан код 0011111, а на выходе ЦАП будет напряжение, равное $U_{\text{цап}} = (2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0) \cdot U_{\text{мзр}} = 31$ мВ.

Таким образом, процесс сравнения закончится после полного перебора всех разрядов. После завершения преобразования, на управляющем выходе РПП $u_{\text{кон. пр.}}$ появится сигнал “логической 1”, показывающий, что преобразование закончено. Полученный код подается на ЦОУ, где он преобразуется и отображается на цифровом дисплее в виде десятичного числа.

Точность ЦВ этого типа определяется в основном разрядностью ЦАП, достигающей в настоящее время до 18 двоичных разрядов при частоте дискретизации до нескольких мегагерц, а также порогом срабатывания СУ.

6.1.6 Цифровые вольтметры с частотно-импульсным преобразованием

В вольтметрах этого типа измеряемая величина напряжения $U_{x=}$ предварительно преобразуется в пропорциональное ей значение частоты f_x , которая затем преобразуется непосредственно в цифровой код, измеряемый с помощью частотомера. Вольтметры, использующие такой метод преобразования напряжения в частоту, получили название частотно-импульсных.

Структурная схема частотно-импульсного ЦВ изображена на рисунке 6.12 [28].

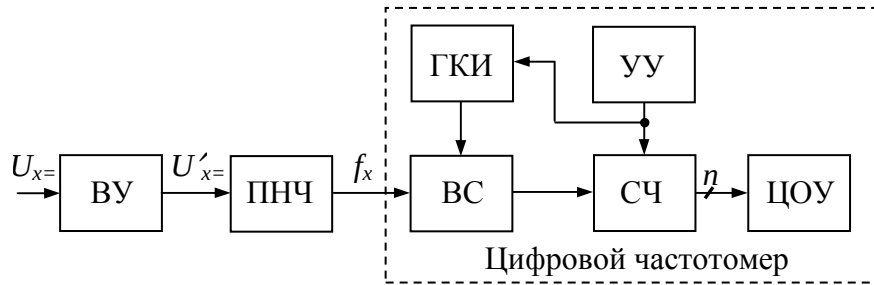


Рисунок 6.12 — Структурная схема частотно-импульсного цифрового вольтметра

На этой схеме измеряемое напряжение $U_{x=}$ поступает на входное устройство (ВУ), включающее входной делитель, переключаемый вручную или автоматически. Во входном устройстве ВУ измеряемое напряжение нормализуется, то есть усиливается или ослабляется, так что $U'_x = k_{вх} U_x$, где $k_{вх}$ — коэффициент передачи ВУ. В последующих выражениях U'_x обозначается U_x .

В преобразователе напряжение-частота (ПНЧ) измеряемое напряжение преобразуется в частоту f_x , причем

$$f_x = k U_{x=},$$

где k — коэффициент преобразования.

Далее импульсы с частотой следования f_x поступают на временной селектор (ВС). Устройство управления (УУ) сбрасывает показания счетчика (СЧ) и запускает генератор калибровочных импульсов (ГКИ), вырабатывающий импульсы с длительностью T_u . Эти импульсы задают измерительный временной интервал, во время которого открывается ВС для поступления импульсов с частотой следования f_x на СЧ. Таким образом, импульсы, заполнившие временной интервал с длительностью T_u попадают на счетчик, подсчитывающий число импульсов. Окончательно, если принять значение $kT_u = \text{const}$, то количество импульсов, подсчитанное счетчиком, будет пропорционально измеряемому входному напряжению [28]:

$$N = \int_0^{T_u} f_x dt = \int_0^{T_u} k U_{x=} dt = k T_u U_{x=},$$

а показания цифрового частотомера будут соответствовать значению измеренного напряжения $U_{x=}$. Преобразование цифрового кода с выхода СЧ и отображение значения измеренного напряжения осуществляется с помощью ЦОУ.

Вольтметры этого типа обладают высокой помехоустойчивостью. Вместе с

тем, основная погрешность измерения у лучших образцов вольтметров этого типа не превышает 0,01...0,05 %.

6.1.7 Универсальные цифровые вольтметры

Цифровые вольтметры, рассмотренные в § 6.1.3 — 6.1.6, предназначены для измерения постоянного напряжения. Для измерения переменного напряжения его необходимо вначале преобразовать в постоянное напряжение. Такое преобразование осуществляется измерительными преобразователями средневыпрямленного, среднеквадратического и амплитудного значений. Принципы работы измерительных преобразователей рассмотрены в § 3.2.8.

Универсальные цифровые вольтметры позволяют измерять постоянное и переменное напряжения, постоянный и переменные токи, а также сопротивление. Ввиду наличия измерительного преобразователя, погрешность измерения переменного напряжения и тока больше погрешности измерения постоянного напряжения и тока. Кроме того, погрешность измерения переменного тока и напряжения зависит от диапазона частот и связана с выбором предела измерений. Поэтому в техническом описании к цифровому прибору указывается основная погрешность измерений в зависимости от этих параметров.

На рисунке 6.13, в качестве примера, изображен универсальный цифровой вольтметр типа В7-40/5. Вольтметр В7-40/5 предназначен для измерения напряжений постоянного и переменного тока, силы постоянного и переменного тока, сопротивления постоянному току.

Основные технические характеристики прибора В7-40/5 [78]:

- диапазон измерения напряжения постоянного тока: 0,01 мВ...1000 В;
 - диапазон измерения напряжения постоянного тока с высоковольтным делителем напряжения (ДНВ): 1...30 кВ;
 - диапазон измерения среднего квадратического значения переменного напряжения произвольной формы: 2 мВ...500 В, а с делителем переменного напряжения (ДПН) от 500 до 1000 В;
 - силы постоянного тока: 0,01 мкА...2000 мА (с шунтом — до 10 А).
- У прибора В7-40/5 погрешности измерения:
- напряжения постоянного тока: $\pm 0,05\%$ (при напряжении более 2 В), $\pm 0,1\%$ (в диапазоне 20 В...2000 В), $\pm 0,4\%$ (при напряжении более 2000 В);
 - переменного напряжения без делителя напряжения: $\pm (0,6...0,1)\%$ при 10 мкВ...200 В / 20 Гц...20 кГц, $\pm 10\%$ при 10 мкВ...200 В / 20 Гц...100 кГц;
 - сопротивления: $\pm 0,5\%$ при номинале сопротивления более 2 МОм.



Рисунок 6.13 — Цифровой вольтметр В7-40/5

6.1.8 Контрольные вопросы

1. Каковы принципы построения цифровых измерительных приборов?
2. В чем заключаются преимущества цифровых приборов перед аналоговыми приборами?
3. Какие основные операции с сигналом осуществляются в АЦП?
4. Как влияет разрядность АЦП на погрешность ЦВ?
5. Какие существуют типы ЦВ?
6. В каком виде задается погрешность ЦВ?
7. Каково устройство и принцип действия ЦВ с время - импульсным преобразованием?
8. В чем заключается преимущества ЦВ с двухтактным интегрированием перед ЦВ с время - импульсным преобразованием?
9. Каков принцип действия ЦВ с поразрядным уравниванием?
10. Для каких целей применяются универсальные ЦВ?

6.2 Цифровые фазометры и частотомеры

6.2.1 Цифровые фазометры

Цифровой фазометр — это цифровой электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения углов сдвига фаз между двумя изменяющимися периодически электрическими колебаниями.

На рисунке 6.14 изображена структурная схема цифрового фазометра, а на рисунке 6.15 — временные диаграммы работы цифрового фазометра [1].

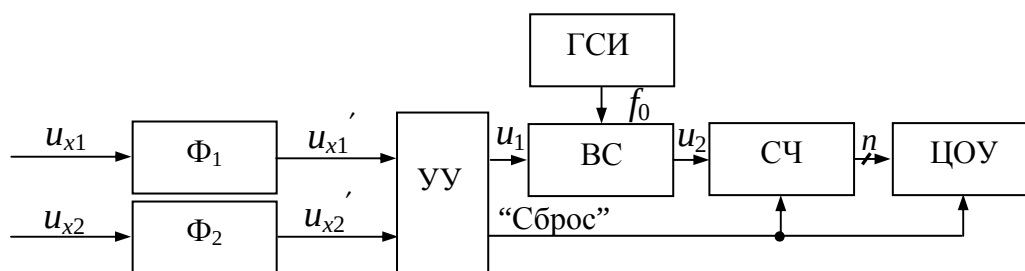


Рисунок 6. 14 — Структурная схема цифрового фазометра

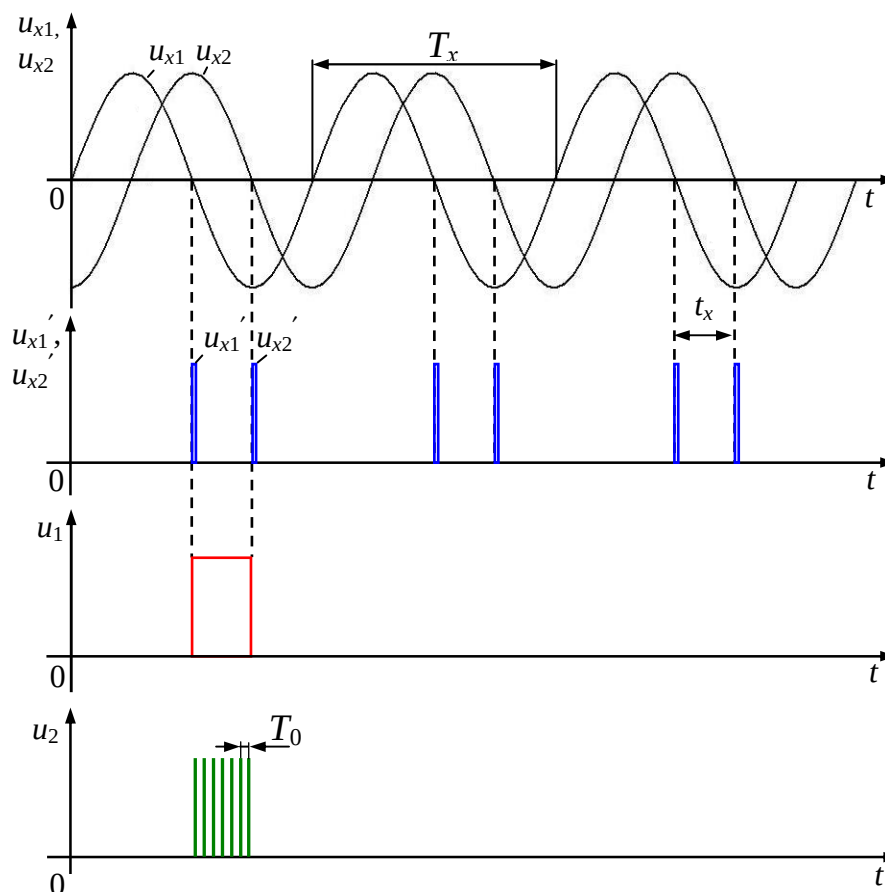


Рисунок 6.15 — Временные диаграммы работы фазометра

Принцип работы фазометра следующий. Цикл работы прибора начинается с подачи импульса “Сброс” с устройства управления УУ, который переводит в состояние “логического нуля” счетчик импульсов СЧ, а также цифровое отсчетное устройство ЦОУ. Для определения сдвига по фазе φ_x между напряжениями u_{x1} и u_{x2} сравниваемые напряжения поступают на формирователи Φ_1 и

Φ_2 , формирующие короткие импульсы в моменты перехода кривых напряжения u_{x1} и u_{x2} через нулевые значения. Период изменения напряжений u_{x1} и u_{x2} с частотой f_x равен $T_x=1/f_x$. Эти импульсы формируют в управляющем устройстве УУ прямоугольный импульс длительностью t_x , открывающий на это время временной селектор ВС. При открытом ВС импульсы от генератора счетных импульсов (ГСИ) начинают поступать на вход счетчика импульсов СЧ.

После окончания временного интервала t_x временной селектор закрывается. Число импульсов, прошедших на СЧ будет пропорционально измеряемому фазовому сдвигу φ_x [1]:

$$N=t_x/T_0=t_x f_0=(\varphi_x T_x f_0)/2\pi=\varphi_x f_0/(2\pi f_x),$$

а значение измеряемого фазового сдвига φ_x будет составлять:

$$\varphi_x=2\pi N f_x/f_0.$$

Из последнего выражения следует, что для измерения фазового сдвига φ_x необходимо, кроме подсчета числа импульсов с помощью частотомера измерять частоты сигналов и знать значение частоты ГСИ.

Преобразование цифрового кода с выхода СЧ и отображение значения измеренного фазового сдвига на индикаторе осуществляется с помощью ЦОУ.

Данная схема фазометра может применяться для измерения фазового сдвига φ_x при низких частотах сигналов, так как для уменьшения погрешности измерений значение частоты f_0 счетных импульсов должно во много раз превышать значение частоты измеряемого сигнала. Для того чтобы измерять фазовый сдвиг φ_x без измерения частоты, применяют схему фазометра, измеряющего среднее значение фазового сдвига φ_x за несколько периодов.

На рисунке 6.16, изображена структурная схема цифрового фазометра с измерением среднего значения фазового сдвига, а на рисунке 6.17 — временные диаграммы работы прибора [1].

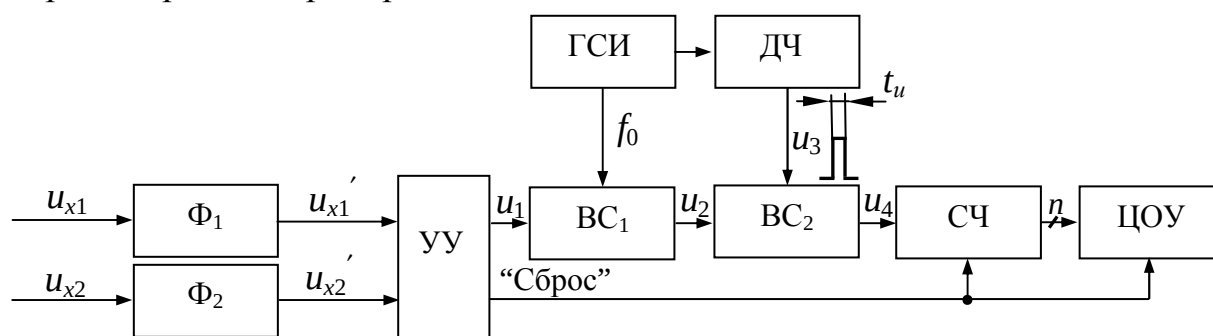


Рисунок 6.16 — Структурная схема цифрового фазометра с измерением среднего значения фазового сдвига

Принцип работы фазометра следующий. В отличие от предыдущей схемы фазометра, в данной схеме фазометра установлен дополнительный временной селектор $ВС_2$, управляемый делителем частоты ДЧ, с помощью которого частота ГСИ делится в k раз. В результате чего, делитель частоты ДЧ выдает управляющий импульс длительностью $t_u=kT_0$, где T_0 — период следования счетных импульсов. Коэффициент деления k выбирается кратным 2π .

За время длительности t_u импульса, поступающего с делителя частоты ДЧ на вход счетчика импульсов СЧ проходит t_u/T_x пачек импульсов с частотой $f_0=1/T_0$.

В каждой пачке находится t_x/T_0 импульсов. Число импульсов, подсчитанное счетчиком СЧ, будет пропорционально измеряемому фазовому сдвигу φ_x :

$$N=(t_u/T_x) \quad (t_x/T_0)=\varphi_x k/(2\pi),$$

а значение измеряемого фазового сдвига φ_x будет составлять:

$$\varphi_x=2\pi N/k.$$

Преобразование цифрового кода с выхода СЧ и отображение значения измеренного фазового сдвига на индикаторе осуществляется с помощью ЦОУ.

Для расширения частотного диапазона измерения фазового сдвига применяют метод преобразования частоты измеряемых сигналов в сторону более низких частот.

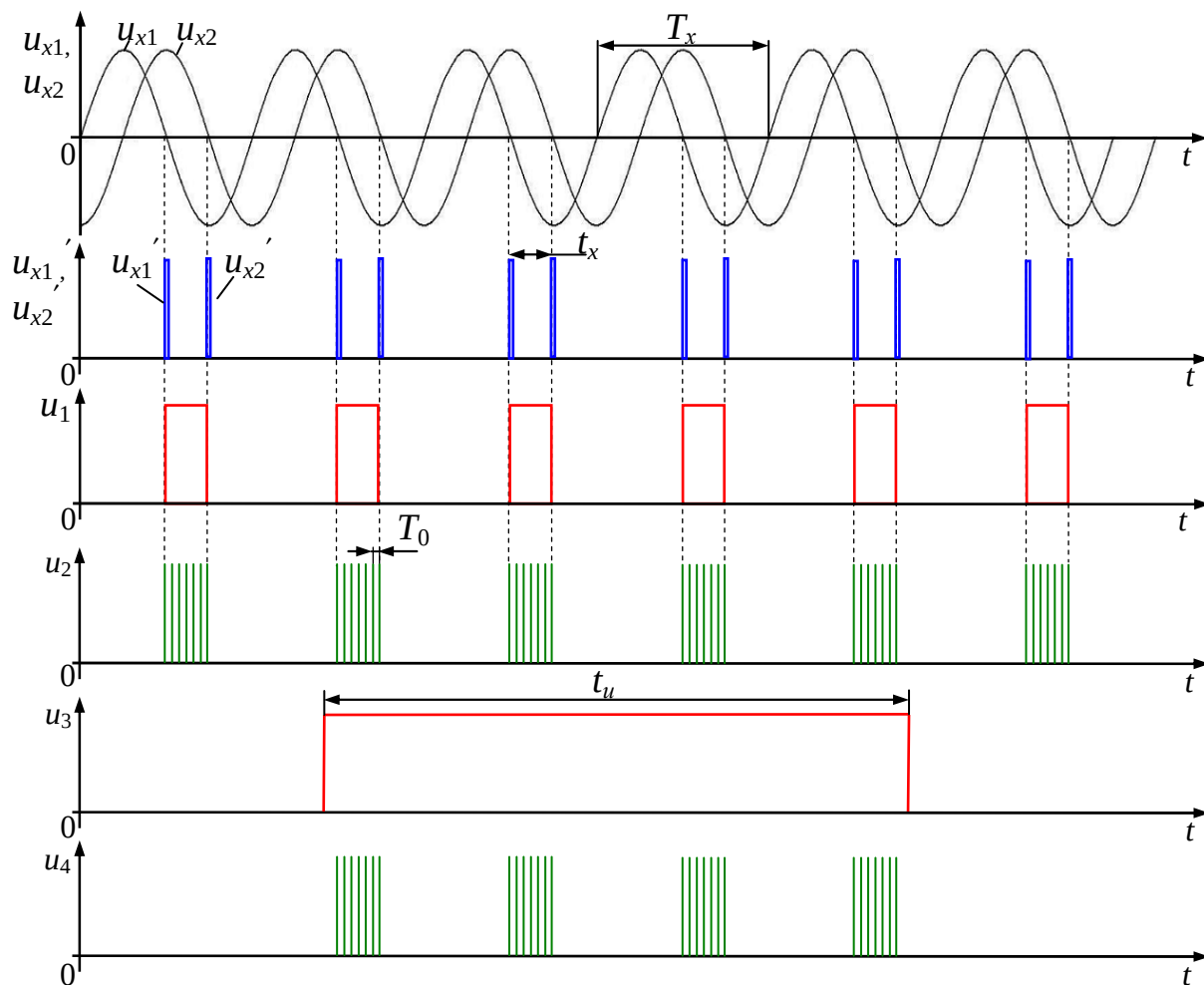


Рисунок 6. 17 — Временные диаграммы работы фазометра с измерением среднего значения фазового сдвига

6.2.2 Цифровые частотомеры

На рисунке 6.18 изображена структурная схема частотомера, а на рисунке 6.19 — временные диаграммы работы частотомера [12].

Принцип работы прибора заключается в подсчете числа периодов измеряемой частоты за известный высокостабильный интервал времени.

Перед началом цикла измерения управляющее устройство УУ формирует импульс “Сброс”, устанавливающий счетчик импульсов СЧ и цифровое отсчетное устройство ЦОУ в исходное состояние.

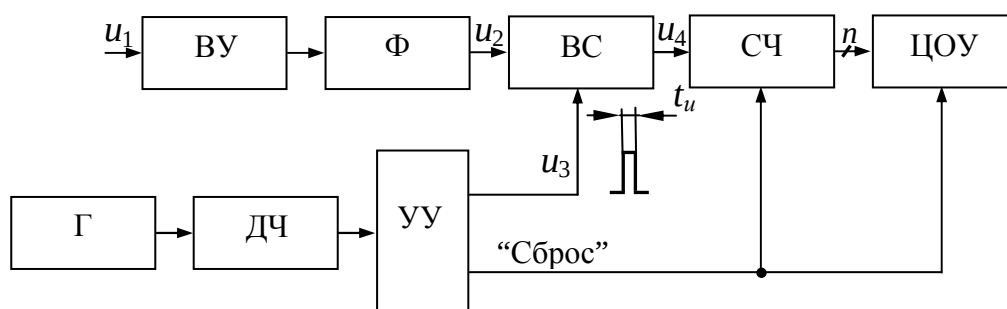


Рисунок 6.18 — Структурная схема цифрового частотомера

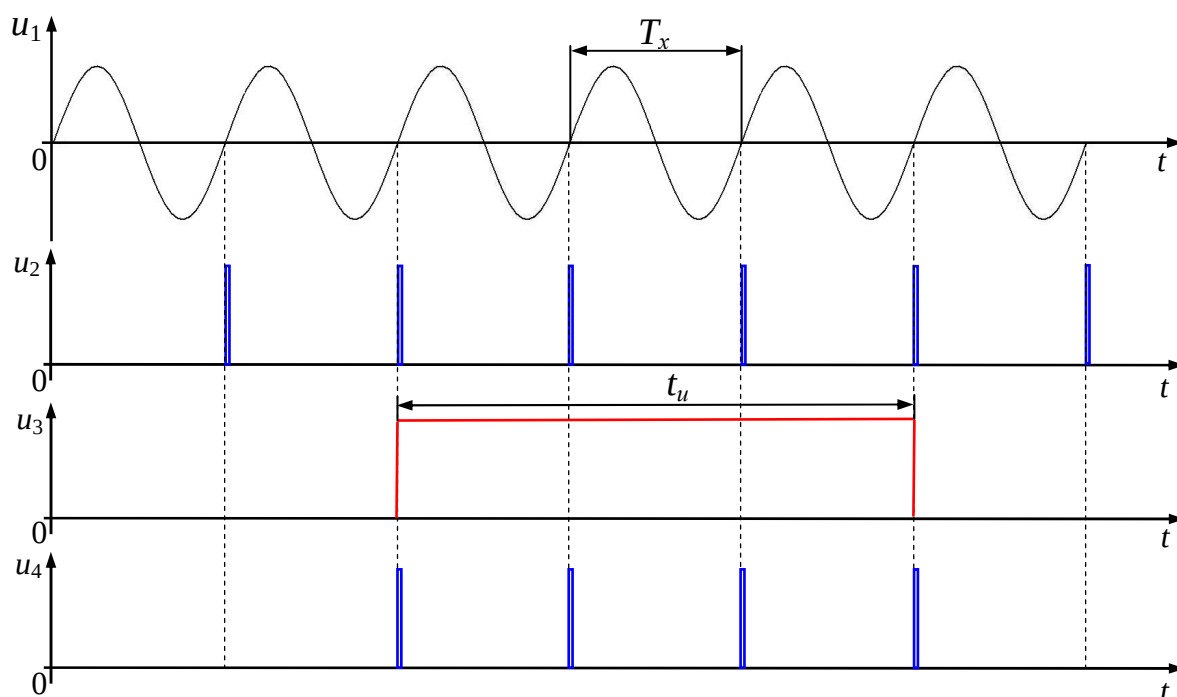


Рисунок 6.19 — Временные диаграммы работы частотомера

По схеме, изображенной на рисунке 6.18, напряжение измеряемой частоты f_x подается на входное устройство ВУ, предназначенное для согласования входного сопротивления частотомера с выходным сопротивлением источника измеряемой частоты, а также для нормализации входного напряжения с целью обеспечения нормальной работы формирователя Ф. Входное устройство включает аттенюатор и усилитель.

С выхода ВУ сигнал измеряемой частоты f_x подается на вход формирователя, предназначенного для преобразования сигнала измеряемой частоты из синусоидальной формы в короткие прямоугольные импульсы напряжения той же частоты, преобразованные по уровням напряжения для работы с цифровыми микросхемами. Импульсы с выхода формирователя Ф возникают в моменты перехода измеряемого сигнала через ноль.

С выхода формирователя Ф импульсы поступают на вход временного селектора ВС, предназначенного для пропускания поступающих импульсов на вход счетчика импульсов СЧ в течение интервала времени измерения t_u . Интервал времени измерения t_u формируется управляющим устройством УУ из сигнала, поступающего с делителя частоты ДЧ. Делитель частоты предназначен для повышения точности измерений, путем увеличения интервала времени измерения t_u автоматически или вручную. Для повышения точности формирования интервала t_u блоком ДЧ

из напряжения опорного генератора Г применяется генератор с кварцевой стабилизацией частоты, заключенный в специальный термостат с автоматическим поддержанием постоянной температуры кварца.

По окончании импульса с длительностью t_u ВС закрывается, а на выходных шинах СЧ формируется код N , соответствующий количеству импульсов напряжения, прошедших на счетчик СЧ. Этот цифровой код подается на цифровое отсчетное устройство ЦОУ, где отображается в виде цифр на индикаторе.

В результате измерения количество импульсов N , прошедших на счетчик СЧ за интервал времени t_u будет равен [12]:

$$N = t_u / t_x = t_u f_x,$$

где t_x — период импульсов измеряемого сигнала, откуда значение измеряемой частоты составит значение

$$f_x = N / t_u.$$

Относительная погрешность измерения частоты цифровым частотомером определяется как:

$$\delta_{\text{ч}} = \delta_{\text{г}} + 1 / (f_x t_u),$$

где $\delta_{\text{г}}$ — нестабильность частоты кварцевого генератора.

Вследствие того что, нестабильность частоты генератора является малой величиной по сравнению со вторым слагаемым в последнем выражении, то ею можно пренебречь.

При измерении низких частот значение второго слагаемого в последнем выражении растет с понижением частоты, поэтому с помощью частотомера предпочитают измерять период сигнала.

На рисунке 6.20, в качестве примера, изображен частотомер ЧЗ-63/1.

Частотомер ЧЗ-63/1 предназначен для измерения: частоты и периода синусоидальных сигналов; частоты и периода повторения импульсных сигналов; длительности импульсов; отношения частот электрических сигналов, подсчета числа импульсов.



Рисунок 6.20 — Частотомер ЧЗ-63/1

Основные характеристики прибора [79]:

- диапазон измеряемых частот синусоидальных 0,1 Гц...1500 МГц;
- диапазон измеряемых импульсных сигналов 0,1 Гц...200 МГц;
- напряжение входного сигнала в диапазоне 0,1 Гц...1000 МГц лежит в пределах 0,03...10 В;
- мощность входного сигнала в диапазоне частот 1000...1500 МГц лежит в пределах 30 мкВт...10 мВт;
- погрешность измерения частоты, не более $\pm 5 \cdot 10^{-7} \pm 1$ ед. сч;
- диапазон измеряемых периодов сигнала — в пределах 0,1 мкс... 10^{-4} с.

6.2.3 Контрольные вопросы

1. Каково назначение цифрового фазометра?
2. Для каких целей может применяться фазометр?
3. В чем заключается принцип работы схемы фазометра?
4. Какие достоинства есть у цифровых фазометров по сравнению с аналоговыми фазометрами?
5. В чем преимущество работы цифрового фазометра с усреднением?
6. Какие достоинства есть у цифровых частотомеров по сравнению с аналоговыми частотомерами?
7. Каково устройство и принцип действия цифровых частотомеров?
8. От чего зависит точность работы цифровых частотомеров?
9. Для каких целей применяется цифровой частотомер?
10. От чего зависит погрешность работы цифрового частотомера?

Часть 7. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

7.1 Устройство приборов для измерений неэлектрических величин

Принцип измерения неэлектрических величин (давление, температура, влажность, перемещение и т.д.) заключается в преобразовании их в электрические сигналы с помощью измерительных преобразователей (ИП) и последующем их измерении с помощью электрических измерительных приборов (ЭИП).

На рисунке 7.1 показана структурная схема прибора для измерения неэлектрической величины [7]. На этой схеме измеряемая неэлектрическая величина x подается на вход измерительного преобразователя (ИП). С выхода ИП электрический сигнал y подается на измерительное устройство (ИУ). Зависимость выходной величины преобразователя от его входной величины в общем виде выражается уравнением преобразования $y = f(x)$.

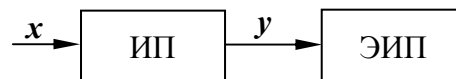


Рисунок 7.1 — Структурная схема прибора для измерения неэлектрической величины

Преимущества применения электроизмерительных приборов для измерений неэлектрических величин заключаются в следующем:

- измерения можно осуществлять дистанционно;
- удобство в регистрации и последующей обработке измеряемых параметров;
- возможность создания приборов с высокой чувствительностью, за счет применения усилителя электрических сигналов.

Принципы работы ЭИП рассмотрены в предыдущих параграфах.

7.2 Измерительные преобразователи

7.2.1 Общие характеристики измерительных преобразователей

Одной из важных характеристик ИПР является **чувствительность**, определяемая через отношение приращения показания указателя прибора $d\alpha$ к приращению dx измеряемой величины x , как $S = \frac{d\alpha}{dx}$.

Любой ИПР имеет **порог чувствительности**, под которым понимают минимальное измеренное значение входной величины, которое может быть зарегистрировано прибором.

Другой характеристикой является **предел преобразования**, под которым понимают максимальное значение входной величины, которое может быть воспринято преобразователем без его повреждения.

Качество работы прибора зависит от **погрешности** измерительного преобразователя. Для того чтобы погрешность измерения неэлектрической величины была минимальной, необходимо иметь линейную характеристику зависимости $y = f(x)$.

У ИП различают основную и дополнительную погрешность. Основная погрешность ИП — это погрешность, возникающая при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в ГОСТе или в технических условиях (ТУ) на сред-

ство измерения. Дополнительная погрешность ИП — это погрешность, появляющаяся при отклонении условий эксплуатации СИ от нормальных, соответствующих ТУ или ГОСТу.

В зависимости от того явления, которое используется для преобразования неэлектрической величины в электрическую величину, преобразователи делятся на следующие группы:

- электромеханические (контактные, реостатные, тензометрические, электростатические, электромагнитные);
- тепловые и электрохимические (термоэлектрические, термосопротивления, электрохимические);
- электронные и ионизационные (электронные, ионные, ионизационные).

По виду получаемой на выходе преобразователя выходной величины все типы преобразователей можно разделить на две группы:

- параметрические;
- генераторные.

В параметрическом ИП входная неэлектрическая величина преобразуется в один из параметров электрической цепи. Для измерения этого параметра необходимо применение вспомогательного источника тока. Кроме терморезисторов, к параметрическим ИПР относят: резистивные, индуктивные и взаимноиндуктивные, емкостные, электролитические и фотоэлектрические преобразователи.

В случае если неэлектрическая величина преобразуется в электродвижущую силу (ЭДС), то такой преобразователь называется генераторным. К генераторным ИП относят: индукционные, пьезоэлектрические и термоэлектрические преобразователи.

7.2.2 Реостатные измерительные преобразователи

Для измерения линейных и угловых перемещений, а также для измерения ряда других величин, которые могут быть механически преобразованы в линейные или угловые перемещения, в приборах применяются реостатные измерительные преобразователи (РИП). РИП представляет собой реостат, движок которого, перемещаясь под воздействием измеряемой неэлектрической величины F , создает зависимость:

$$R=f(F),$$

где R — сопротивление преобразователя.

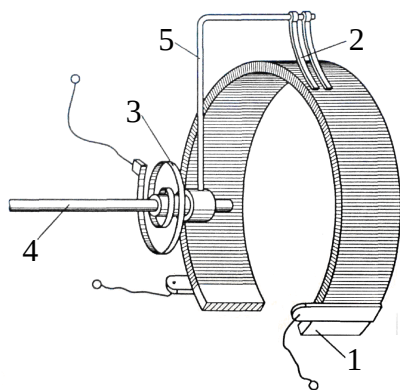


Рисунок 7. 2 — Устройство реостатного преобразователя

На рисунке 7.2 изображено устройство реостатного преобразователя, выполненного в виде изогнутой пластины 1 из изоляционного материала, на которую намотана проволока с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления, изготовленная из манганина или константана. В этом устройстве контактная щетка 2 перемещается по очищенной от изоляции обмотке посредством поводка 5, укрепленного на оси 4, связанной с объектом измерения.

Напряжение со щетки снимается через токоподвод к щетке (спиральную пружину) 3 [7].

Вид функции преобразования зависит от многих факторов. Наибольшую линейность имеют реохордные преобразователи. У этого типа преобразователей на верхнюю грань каркаса наносится пленка из металла или полупроводника, либо вдоль каркаса натягивается проволока (струна), по которым скользит щетка. Для получения нелинейной функции преобразования проволоку, по которой скользит щетка, наматывают на каркас специальной конфигурации. РП с нелинейной функцией преобразования называют функциональными преобразователями (ФП).

Для преобразования сопротивления РИП в электрическую величину используют измерительную схему, содержащую стабилизированный источник питания с выходным напряжением U .

На рисунке 7.3 изображена параллельная схема включения РИП. На этой схеме выходное напряжение, измеряемое вольтметром, определяется выражением [27]:

$$U_x = U \frac{\frac{R_1 R_V}{R_1 + R_V}}{R_2 + \frac{R_1 R_V}{R_1 + R_V}} = U \frac{R_1}{R + \frac{R_1 R_2}{R_V}},$$

где R_V — сопротивление вольтметра; $R = R_1 + R_2$ — полное сопротивление РИП; R_1 — значение сопротивления РИП между клеммой 2 (контактной щеткой) и клеммой 3; R_2 — значение сопротивления РИП между клеммами 1 и 2.

Из последнего выражения видно, что, если сопротивление РИП R по величине сравнимо или больше R_V , то зависимость $U_x = f(R_1)$ носит нелинейный характер. Однако если сопротивление вольтметра выбрать так, что $R_V \gg R$, то зависимость $U_x = f(R_1)$ становится очень близкой к линейной:

$$U_x = \frac{R_1}{R} U.$$

Если, кроме вольтметра к РИП подключается нагрузка, то ее сопротивление необходимо дополнительно учесть.

Таким образом, выбирая определенным образом соотношение между сопротивлениями вольтметра R_V и реостата R , можно обеспечить заданную чувствительность и требуемую линейность.

С целью увеличения чувствительности и повышения точности преобразования можно применить дифференциальное включение РИП в мостовую измерительную схему, содержащую в плечах моста сопротивления R_{M1} , R_{M2} и сопротивление РИП $R = R_1 + R_2$, где R_1 — значение сопротивления РИП между

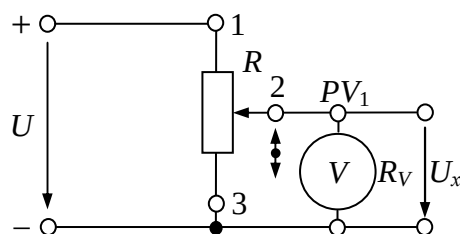


Рисунок 7.3 — Параллельная схема включения РИП

клеммой 2 (контактной щеткой) и клеммой 3; R_2 — значение сопротивления РИП между клеммами 1 и 2.

Дифференциальная схема включения РИП в мостовую измерительную схему изображена на рисунке 7.4 [27]. В этой схеме, для получения хорошей линейности, как и в предыдущей схеме, необходимо подобрать сопротивление нагрузки (вольтметра).

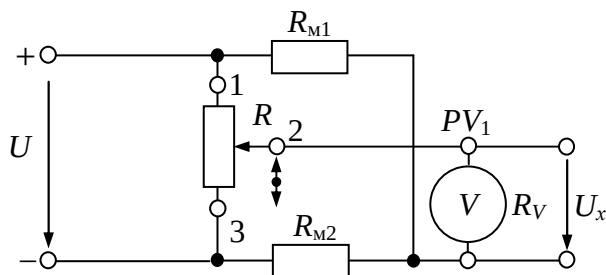


Рисунок 7.4 — Дифференциальная схема включения РИП в мостовую измерительную схему

Вследствие ступенчатого изменения сопротивления для проволочных РИП имеет место погрешность дискретности. Кроме того, на точность работы преобразователя влияет температура. Это влияние обусловлено значением температурного коэффициента сопротивле-

ния (ТКС) материала проволоки и неравенством температурных коэффициентов линейного расширения проволоки и каркаса РИП.

Достоинством РИП является большая выходная мощность, а недостатком — наличие трущегося контакта.

Реостатные ИП могут применяться в качестве прецизионных регулируемых резисторов (реохордов) в автоматических мостах и компенсаторах.

7.2.3 Тензометрические измерительные преобразователи

В целях исследования распределения деформаций и механических напряжений, возникающих под воздействием механических нагрузок в деталях машин, механизмов и аппаратов, применяются тензометрические преобразователи. В зависимости от принципа действия различают тензометрические преобразователи: электромагнитные; механические; оптические; резистивные и т.д. Наиболее широкое распространение получили резистивные тензометры, в основе которых лежит использование резистивных тензопреобразователей (РТНП). В основе работы РТНП лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации. Входной величиной РТНП является относительная деформация, а выходной — электрическое сопротивление.

В зависимости от того, какой материал используется для изготовления РТНП, различают проводниковые и полупроводниковые тензопреобразователи.

В проводниковых РТНП рабочими элементами являются проволочные и фольговые проводники. Наиболее широкое применение получили фольговые и пленочные тензопреобразователи.

На рисунке 7.5 изображен фольговый тензопреобразователь. Фольговые РТНП выпускаются по технологии изготовления печатных плат для электрооборудования и радиоаппаратуры. На этом рисунке введены обозначения: А — длина петель решетки; Б — ширина решетки. Основные преимущества фольго-

вых РТНП перед проволоочными РТНП заключаются в следующем:

- лучшие условия для теплоотдачи, что позволяет увеличивать ток через преобразователь и тем самым повысить чувствительность измерительной схемы;

- возможность реализации преобразователя практически любой конфигурации.

В качестве примера использования РТНП, на рисунке 7.6 изображен тензопреобразователь, предназначенный для измерения механических моментов. На этом рисунке изображены два РТНП, наклеиваемые взаимно перпендикулярно на поверхность скручиваемого упругого вала для реагирования на соответствующие составляющие деформаций ε_1 и ε_2 .

Вследствие того, что при деформации сопротивление полупроводников меняется значительно сильнее, чем у проводников, полупроводниковые РТНП обладают значительно большей чувствительностью к деформациям, чем проводниковые РТНП. Полупроводниковый РТНП представляет собой брусок из полупроводника с вплавленными в него проводниками. В сравнении с проводниковыми РТНП, недостатками полупроводниковых РТНП являются более сильная подверженность воздействию внешних магнитных полей и температуры.

Основной характеристикой материала РТНП является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как [27]:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l},$$

где $\varepsilon_R = \Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления проводника; $\varepsilon_l = \Delta l/l$ — относительное изменение длины проводника.

При деформации жидких материалов $k=2$, а при деформации твердых тел, вследствие того, что изменение длины проводника связано с изменением объема через коэффициент Пуассона [27]:

$$\mu = -\varepsilon_b / \varepsilon_l$$

где $\varepsilon_b = \Delta b/b$ — относительная величина поперечной деформации проводника с поперечным размером b , коэффициент относительной тензочувствительности определяется по выражению:

$$k_l = 1 + 2\mu.$$

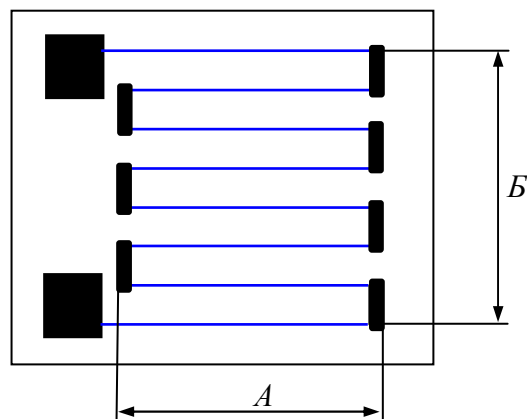


Рисунок 7.5 — Фольговый тензопреобразователь

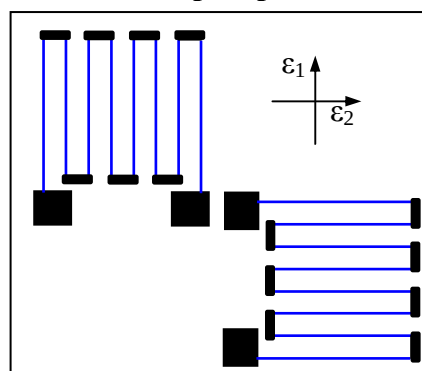


Рисунок 7.6 — Тензопреобразователь для измерения механических моментов

Для металлов значение коэффициента Пуассона составляет 0,24...0,4.

В общем случае при деформации геометрических размеров проводника изменяется еще величина удельного сопротивления материала проводника ρ , поэтому значение коэффициента относительной тензочувствительности следует определять по формуле [27]:

$$k = k_1 + k_2 = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho}{\rho},$$

где $k_2 = \frac{\Delta\rho}{\rho}$.

Для металлов $k_1 \gg k_2$, поэтому при расчете коэффициента относительной тензочувствительности часто учитывают только коэффициент k_1 . В тоже время для полупроводников $k_2 \gg k_1$, поэтому за коэффициент относительной тензочувствительности можно принять k_2 .

С целью повышения чувствительности прибора необходимо увеличивать ток через РТНП, однако при превышении его значения выше предельного это приводит к перегреву подложки, и, как следствие — росту погрешности преобразования. Кроме того, рост температуры РТНП приводит к тому, что номинальное сопротивление тензопреобразователя $R_{тп}$ получает дополнительное приращение сопротивления, что также сказывается на погрешности. Погрешность СИ, использующих РТНП, связана с их градуировкой. При отсутствии возможности непосредственно градуировать РТНП результирующая погрешность может составлять 10...15 %. Вклад в эту погрешность вносит качество наклейки РТНП на испытуемые детали, в которых измеряются деформации или механические напряжения.

Для точного измерения механических величин ТНП включают в мостовые измерительные схемы, которые бывают равновесные и неравновесные. Принцип работы мостовой схемы рассмотрен в § 5.1.1.

На рисунке 7.7 изображена схема моста с тензопреобразователями для измерения механических величин.

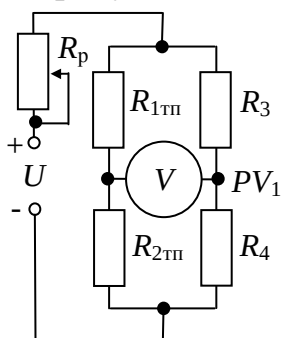


Рисунок 7.7 — Схема моста с тензопреобразователями для измерения механических величин

Равновесные схемы применяют для точных измерений механических величин с установлением зависимости $\Delta R/R = f(\Delta l/l)$ и определения коэффициента тензочувствительности. Мост этого типа находится в состоянии равновесия при выполнении условия:

$$R_{1тп} \cdot R_2 = R_{2тп} \cdot R_3.$$

В неравновесных мостовых схемах происходит преобразование изменения сопротивления РТНП $\pm\Delta R$ в напряжение, измеряемого вольтметром PV_1 , установленным в диагонали моста.

В мостах этого типа проще реализуется компенсация возникающей температурной погрешности. С целью компенсации возникающей температурной погрешности два однотипных преобразователя с сопротивлениями $R_{1тп}$, изме-

няющимися в значениях $(R_1 \dots R_1 + \Delta R)$, и $R_{2\text{тп}}$, изменяющимся в значениях $(R_2 \dots R_2 - \Delta R)$, включают в смежные плечи моста, изображенного на рисунке 18.7. При этом РТНП с сопротивлением R_1 является рабочим, воспринимающим механическую силу, а РТНП с сопротивлением R_2 является компенсационным, поставленным в одинаковые тепловые условия, что и рабочий РТНП, воспринимающий деформацию противоположного знака. Регулируемый потенциометр R_p включен для подстройки значений измеряемых величин в шкалу измерительного прибора.

В тех случаях, когда необходимо улучшить компенсацию погрешности, возникающей из-за влияния температуры, можно применить схему моста для измерения механических величин с температурной компенсацией. Эта схема изображена на рисунке 7.8.

В этой схеме моста прецизионные РТНП, установленные в противоположных плечах воспринимают деформации одного знака, а смежных плечах — деформации противоположного знака.

Значения сопротивлений преобразователей $R_{1\text{тп}}$ и $R_{4\text{тп}}$ изменяются в пределах $(R_1 \dots R_1 + \Delta R)$ и $(R_4 \dots R_4 + \Delta R)$ соответственно, а преобразователей $R_{2\text{тп}}$ и $R_{3\text{тп}}$ — в пределах $(R_2 \dots R_2 - \Delta R)$ и $(R_3 \dots R_3 - \Delta R)$ соответственно.

В качестве примера, на рисунке 7.9 изображена схема измерителя давления с использованием проволочных РТНП [7]. Схема включает измерительный преобразователь, выполненный в виде стального цилиндра с наклеенными внутри тензорезисторами, имеющими сопротивления $R_{1\text{тп}}$ и $R_{2\text{тп}}$.

С помощью тензорезистора $R_{1\text{тп}}$ воспринимается деформация, а с помощью тензорезистора $R_{2\text{тп}}$ осуществляется температурная компенсация. Тензорезисторы включены в мостовую схему, включающую еще сопротивления R_1 и R_2 . Разность потенциалов с моста, пропорциональная измеряемому давлению, усиливается дифференциальным усилителем. К выходу усилителя подключен измерительный механизм ИМ. При измерении давления поверхность цилиндра испытывает деформации. Зависимость давления P_x от деформации определяется по выражению [7]:

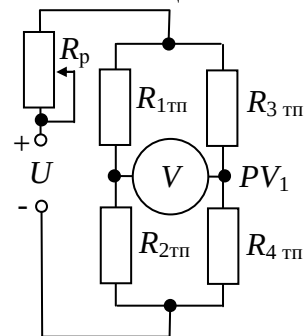


Рисунок 7.8 — Схема моста для измерения механических величин с температурной компенсацией

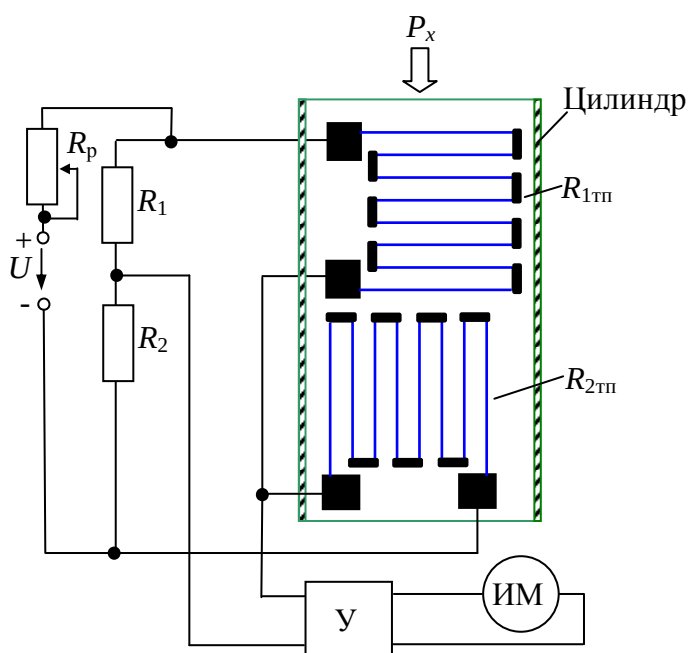


Рисунок 7.9 — Схема манометра с РТНП

$$P_x = \frac{Eh}{r} \epsilon,$$

где E — модуль упругости стали; r и h — радиус и толщина стенок цилиндра.

Диапазон измеряемых давлений составляет $5 \cdot 10^4 \dots 10^7$ Па, а приведенная погрешность $\pm 1,5$ %.

7.2.4 Индукционные измерительные преобразователи

В индукционном преобразователе измеряемая неэлектрическая (механическая) величина преобразуется в индуцированную ЭДС.

Индукционные преобразователи нашли применение в приборах для измерения скорости линейных или угловых перемещений.

Кроме того, частности индукционные преобразователи применяются в приборах для измерения скорости вращения (в тахометрах), а также в приборах для измерения параметров вибраций. Существуют два типа индукционных преобразователей:

- с неизменным сопротивлением на пути постоянного магнитного потока;
- с сопротивлением на пути постоянного магнитного потока.

Рассмотрим схемы индукционных преобразователей, предназначенных для измерения скорости вращения (тахометров).

На рисунке 7.10 изображена схема датчика тахометра с индукционным преобразователем, а на рисунках 7.11, а и 7.11, б — диаграммы изменения магнитного сопротивления воздушного зазора (R_m) и ЭДС в катушке (e) от угловой скорости, соответственно [25].

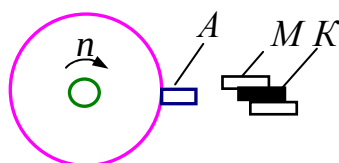


Рисунок 7.10 — Схема датчика тахометра с индукционным преобразователем

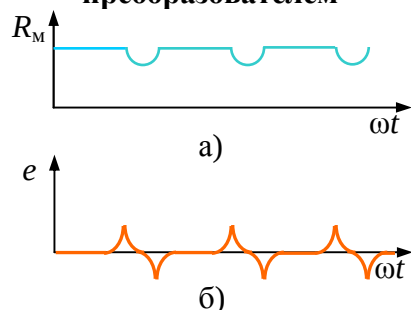


Рисунок 7.11 — Диаграммы изменения от угловой скорости:
а) — магнитного сопротивления воздушного зазора;
б) — ЭДС в катушке

Принцип работы датчика тахометра с индукционным преобразователем следующий. На валу механизма укреплен стальной зуб А.

При вращении вала стальной зуб проходит мимо зазора между валом и установленной рядом магнитной системы с постоянным магнитом М, уменьшая сопротивление воздушного зазора так, как изображено на рисунке 7.11,а.

В катушке К, надетой на магнит, согласно закону электромагнитной индукции наводятся импульсы ЭДС, форма которых изображена на рисунке 7.11,б.

Частота наведенных импульсов в катушке, выраженная в герцах, будет в точности равна скорости вращения вала, выраженной в числе оборотов в секунду.

Для измерения скорости вращения существуют специальные электрические машины, представляющие собой небольшие генераторы постоянного или переменного тока, вал которых механически свя-

зан с валом двигателя, скорость вращения которого необходимо определить.

При использовании генератора переменного тока электродвижущая сила генератора E , как известно, выражается уравнением [25]:

$$E = c\Phi \frac{pn}{60},$$

где c — конструктивная постоянная, определяемая числом витков и числом пар параллельных ветвей; Φ — поток возбуждения, создаваемый постоянными магнитами; p — число пар полюсов; n — число оборотов в минуту (скорость вращения). В тоже время, частота переменной ЭДС, индуцируемой в генераторе определяется как [25]:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Таким образом, через значение ЭДС генератора E или частоты f можно определить значение измеряемой скорости вращения.

7.2.5 Электромагнитные измерительные преобразователи

На рисунке 7.12 изображен индуктивный преобразователь с переменной длиной воздушного зазора, а на рисунке 7.13 — мостовая схема с дифференциальным включением двух идентичных абсолютных индуктивных преобразователей [34].

К электромагнитным измерительным преобразователям относятся индуктивные и трансформаторные измерительные преобразователи.

Преобразователь, изображенный на рисунке 18.12, состоит из магнитопровода с обмоткой и перемещающимся под внешним воздействием сердечника, закрепленного на пружинах. Принцип работы такого преобразователя заключается в следующем.

При воздействии перемещения X происходит перемещение якоря в зазоре магнитопровода, приводящее к изменению магнитного сопротивления магнитной цепи, приводящее к изменению индуктивности обмотки (или обмоток). Для измерения перемещения преобразователь включают в мостовую схему.

С целью повышения точности измерений и увеличения чувствительности применяют мостовую измерительную цепь, включенную на переменный ток с дифференциальным включением двух идентичных абсолютных преобразователей, как изображено на рисунке 7.13.

В упрощенном виде, через коэффициент k , определяемый параметрами схемы, ток в диагонали моста можно записать как [34]:

$$I_p \approx k (Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3),$$

где Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 — полные сопротивления плеч мостовой измерительной цепи.

При перемещении якоря в дифференциальном преобразователе значения

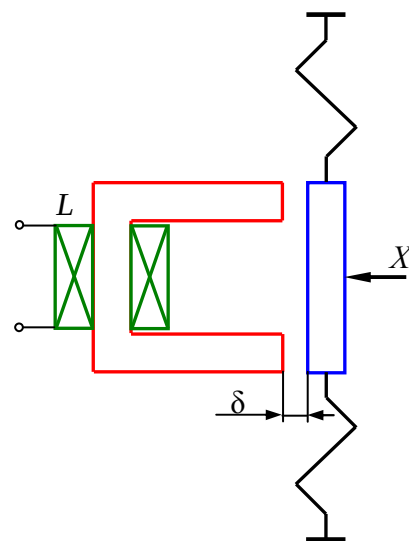


Рисунок 7.12 — Индуктивный преобразователь с переменной длиной воздушного зазора

полных сопротивлений Z_1 и Z_2 имеют приращения с разными знаками, что приводит к удвоению чувствительности по сравнению со случаем использования одиночного преобразователя.

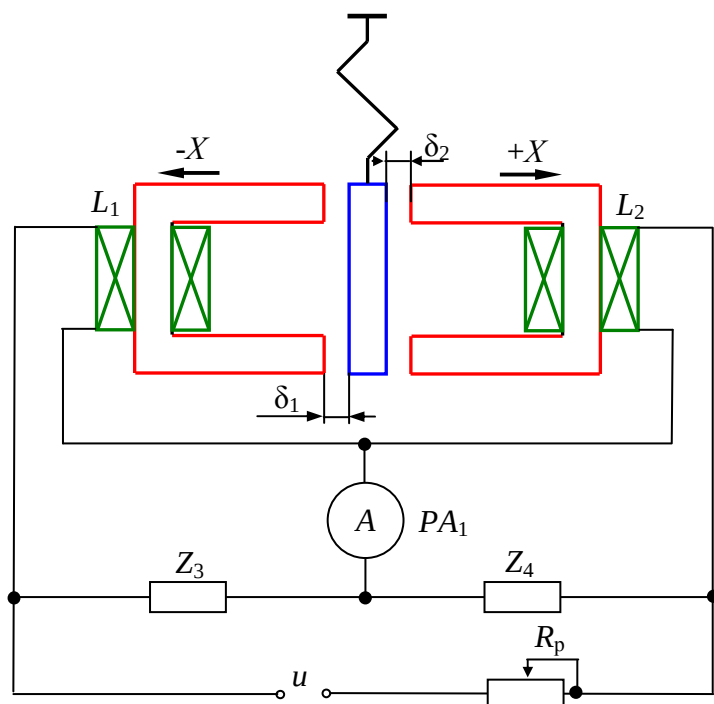


Рисунок 7.13 — Мостовая схема с дифференциальным включением двух идентичных абсолютных индуктивных преобразователей

Рабочее перемещение подвижной части такого типа ИПР лежит в пределах 0,01...5 мм.

Магнитная цепь преобразователя может быть соленоидного типа. В этом случае электромагнитный преобразователь не имеет магнитопровода. Такой преобразователь содержит одну или несколько обмоток и перемещающийся внутри них сердечник.

7.2.6 Емкостные измерительные преобразователи

Ёмкостные преобразователи представляют собой плоские или цилиндрические конденсаторы, ёмкость которых изменяется под воздействием неэлектрической величины.

Для плоского конденсатора емкость определяется по формуле [4]:

$$C = \frac{\epsilon_a S}{\delta},$$

а для цилиндрического конденсатора [16]:

$$C = \frac{2\pi l \epsilon_a S}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора; S — площадь обкладок конденсатора; δ — расстояние между обкладками; l — длина активной части электродов цилиндрического конденсатора; d_1 , d_2 — радиусы внутреннего и внешнего электродов цилиндрического конденсатора.

Ёмкостные преобразователи используются при измерении различных неэлектрических величин, функционально связанных с любым из изменяющихся параметров конденсатора.

Рассмотрим примеры применения емкостных преобразователей.

На рисунке 7.14 изображена схема использования емкостного преобразователя прибора для измерения уровня жидкости [24].

Преобразователь представляет собой коаксиальный конденсатор.

Для каждого значения уровня емкость преобразователя может быть определена как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов. Один конденсатор образован частью электродов и диэлектриком — жидкостью, уровень которой измеряется, а второй образован остальной частью электродов и диэлектриком. Если трубка преобразователя заполнена воздухом, то емкость конденсатора определяется по выражению [24]:

$$C_0 = al_0\epsilon_0,$$

где a — конструктивный параметр преобразователя, зависящий от поверхности внутреннего стержня, внутренней поверхности трубки и расстояния между электродами; l_0 — полная длина преобразователя; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Если часть трубки длиной l заполнена жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ то емкость этой части преобразователя определится по формуле [24]:

$$C_1 = al\epsilon$$

а полная емкость преобразователя:

$$C = al\epsilon + a(l_0 - l)\epsilon_0.$$

Таким образом, емкость преобразователя является функцией длины трубки, заполненной жидкостью $C = f(l)$.

С помощью таких приборов можно осуществлять световую и звуковую сигнализации контролируемых уровней, а также поддерживать постоянный уровень среды автоматической подпиткой резервуара рабочей жидкостью.

Емкостной преобразователь может использоваться для измерения малых перемещений.

На рисунке 7.15 изображена схема емкостного преобразователя для измерения малых перемещений X или других механических величин (силы, давления и т.д.), вызывающих перемещение подвижной обкладки 1 конденсатора относительно его неподвижной обкладки 2.

При эксплуатации емкостных преобразователей следует свести к минимуму паразитные емкости соединительных проводов относительно земли и применять защитное экранирование самого преобразователя от влияния электрических полей. Достоинства емкостных преобразователей являются простота устройства, высокая чувствительность и малая инерционность. К недостаткам можно отнести малую выходную мощность и необходимость использования источников питания повышенной частоты.

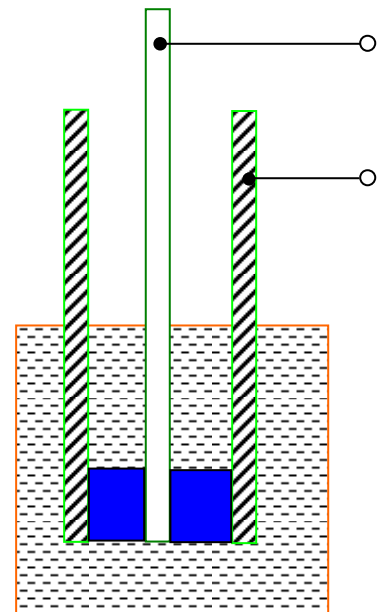


Рисунок 7.14 — Схема емкостного преобразователя для измерения уровня жидкости

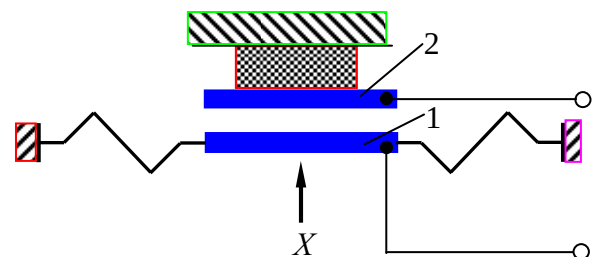


Рисунок 7.15 — Схема емкостного преобразователя для измерения малых перемещений

7.2.7 Тепловые измерительные преобразователи

Для измерения температуры наибольшее применение получили терморезисторы и термоэлектрические преобразователи (термопары).

Терморезистор — это измерительный преобразователь температуры, в котором используется зависимость электрического сопротивления материала резистора от температуры. На рисунке 7.16 изображена мостовая схема с включенным терморезистором для измерения температуры.

Нашли применение металлические и полупроводниковые измерительные преобразователи. Металлические терморезисторы обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), колеблющимся от 0,35 до 0,7 % на один градус изменения температуры. Для изготовления терморезисторов применяются металлы, обладающие высокой стабильностью ТКС. К таким металлам относят: платину; медь и никель.

Платиновые терморезисторы используются в диапазоне температур от -200 до $+600$ °С. Платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка $0,001$ °С. Сопротивление платиновых терморезисторов выражается соотношениями [27]:

— в диапазоне $0 \dots +650$ °С: $R_t = R_0(1 + At^0 + B(t^0)^2)$;

— в диапазоне $0 \dots 200$ °С: $R_t = R_0(1 + At^0 + B(t^0)^2 + C(t-100)^3)$,

где R_0 — сопротивление измерительного преобразователя при 0 °С; A , B , C — коэффициенты, определяемые свойствами материала преобразователя.

Медные терморезисторы применяются в диапазоне от -60 до $+180$ °С. При расчёте сопротивления медных терморезисторов пользуются соотношением [27]:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t^0),$$

где α — ТКС меди.

Металлические термометры сопротивлений являются одним из наиболее точных преобразователей температуры. Полупроводниковые терморезисторы имеют меньшие габариты и большие значения ТКС. Температурная зависимость полупроводникового терморезистора описывается выражением [27]:

$$R_t = A e^{(\beta/T)},$$

где T — абсолютная температура; A , β — коэффициенты. Погрешность измерения температуры с помощью полупроводникового терморезистора составляет порядка $0,01$ К. С помощью полупроводникового терморезистора можно измерять температуру в диапазоне от -2000 до 10000 °С. Недостатками полупроводниковых терморезисторов являются — нелинейная зависимость от температуры и плохая взаимозаменяемость, вследствие значительного разброса параметров от образца к образцу. Кроме терморезисторов в датчиках температуры нашли применение термодиоды и термотранзисторы, работающие в диапазоне от 800 °С до 1500 °С на основе открытых и закрытых р-п переходов. Достоинством тер-

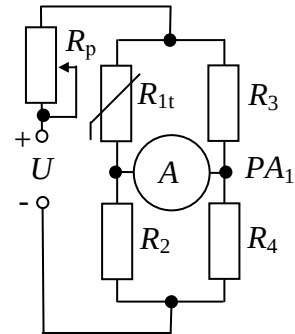


Рисунок 7.16 — Мостовая схема с включенным терморезистором для измерения температуры

модиодов и терморезисторов является то, что они являются недорогими, имеют малые габариты и могут быть взаимозаменяемыми.

К следующей группе измерительных преобразователей температуры относятся термоэлектрические преобразователи (термопары). На рисунке 7.17 изображена схема термопары. Термопара представляет собой два проводника или полупроводника A и B , два конца которых соединены между собой (рабочий спай 1), а два других (свободные концы 2) включены в цепь измерительного прибора. Рабочий спай нагревается до измеряемой температуры t^0 , а свободные концы имеют постоянную температуру t_0 . В цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила E_t , которая является функцией разности температур $E_t = f(t^0 - t_0)$ [7]. Измерение термоЭДС производится либо милливольтметром, либо компенсатором. Милливольтметр с термопарой образует термоэлектрический термометр. Точность преобразования термопар ниже, чем у терморезисторов, так как на показания прибора влияет нестабильность температуры свободных концов и изменение сопротивления термоэлектродов. Достоинствами термопары являются широкий диапазон измеряемых величин и надёжность. Предел длительного измерения зависит от материала термоэлектродов. Например, если материал термоэлектродов хромель – алюмель, то предел измерений составляет от -200 до $+1000$ $^{\circ}\text{C}$.

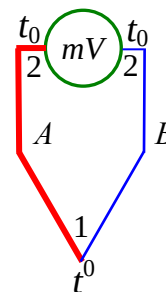


Рисунок 7.17 — Схема термопары

На рисунке 7.18, в качестве примера, изображен погружной термопреобразователь ТСП1-3-100П-В-3-400-8-70-Д-(-50...500), предназначенный для измерения температуры жидких, сыпучих и газообразных сред в диапазоне от -50 до 500 $^{\circ}\text{C}$ [80]. Термопреобразователи выпускаются двух видов: с головкой и монтажными проводами.



Рисунок 7.18 — Погружной термопреобразователь ТСП1-3-100П-В-3-400-8-70-Д-(-50...500)

В зависимости от: класса допуска; модели и исполнения, максимальный предел допускаемого отклонения от номинальной статической характеристики (НСХ) для термосопротивлений составляет $+(0,30 + 0,0050t)$ $^{\circ}\text{C}$, а для термопар — $\pm (0,5...2,5)$ $^{\circ}\text{C}$. Преобразователи этого типа имеют диапазон измеряемых температур от -50 до $+800$ $^{\circ}\text{C}$ [80].

7.2.8 Пьезоэлектрические измерительные преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи нашли применение для измерения: силы; давления; перемещения и количества вещества. На рисунке 7.19 изображена схема пьезопреобразователя.

Принцип действия пьезоэлектрических измерительных преобразователей

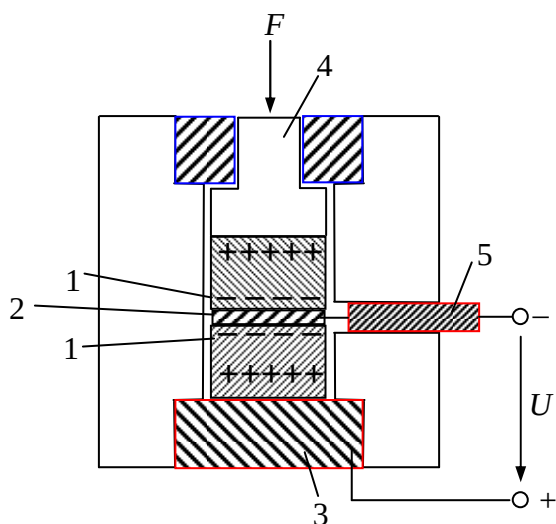


Рисунок 7.19 — Схема пьезопреобразователя

основан на пьезоэлектрическом эффекте, то есть возникновении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков под действием механических сил или деформаций [8]. Различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.

Прямой пьезоэлектрический эффект состоит в появлении электрических зарядов на гранях пьезоэлектриков при их сжатии или растяжении. При прекращении действия силы, приложенной к пьезоэлектрику, заряды на его гранях исчезают. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в изменении геометрических размеров пьезоэлектрика при введении его

в электрическое поле. Наибольшее распространение получили кварцевые пьезоэлектрики. У кварца пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокими механической прочностью и изоляционными качествами. Преобразователь состоит: из двух пьезопластинок 1, расположенных так, чтобы их обращенные друг к другу грани имели заряды одного знака; из металлической прокладки 2; основания 3; нажимного устройства 4 и вывода 5 [24]. Под действием измеряемой силы F пьезопластины прижимаются друг к другу и на выводе 5 появится отрицательный потенциал, а на основании 3 — положительный потенциал. С выхода преобразователя постоянное напряжение подается для усиления на усилитель постоянного тока. Основная погрешность приборов с применением пьезоэлектрического преобразователя не превышает 1...2 % [24].

7.3 Контрольные вопросы

1. Каково устройство приборов для измерений неэлектрических величин?
2. Для каких целей используются емкостные измерительные преобразователи?
3. На чем основан принцип действия тензорезистивных преобразователей?
4. Где применяются резистивные тензопреобразователи?
5. В чем заключаются достоинства и недостатки электромагнитных измерительных преобразователей?
6. Где применяются электростатические измерительные преобразователи?
7. Каково устройство и принцип действия тепловых измерительных преобразователей?
8. Для каких целей применяются реостатные измерительные преобразователи?
9. Каково назначение реостатных измерительных преобразователей?
10. Каков принцип действия пьезоэлектрических измерительных преобразователей?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы метрологии и электрические измерения [Текст]: учеб. / Е.М. Душин [и др.]; под ред. Е.М. Душина. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
2. Классон К.Б. Основы измерений. Электрические методы и приборы в измерительной технике [Текст] / К.Б. Классон. — М.: Постмаркет, 2000. — 351с.
3. Никифоров А.Д. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / А.Д. Никифоров, Т.А. Бакиев. — М.: Высшая школа, 2003. — 422 с.
4. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения [Текст] / Ф.В. Кушнир. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 320 с.
5. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии [Текст]: учеб. / Г.Д. Крылова. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. — 711 с.
6. Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения [Текст]: учеб. / А.С. Елизаров. — Минск.: Вышейш. шк., 1986. — 320 с.
7. Панфилов В.А. Аналоговые методы и средства электрических измерений [Текст] / В.А. Панфилов. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2006. — 112 с.
8. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.
9. Драхсел Р. Основы электроизмерительной техники [Текст] / под ред. В.Ю. Кончаловского. — М.: Энергоиздат, 1982. — 296 с.
10. Афонский А.А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Серия “Библиотека инженера” [Текст] / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; под ред. В.П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. — 544 с.
11. Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. Серия “Библиотека инженера” [Текст] / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; под ред. В.П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. — 248 с.
12. Тычино К.К. Многофункциональные цифровые измерительные приборы [Текст] / К.К. Тычино, Н.К. Тычино. — М.: Радио и связь, 1981. — 128 с.
13. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / А.М. Турчин [и др.]; под ред. П.В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.
14. Кравцов А.В. Метрология и электрические измерения [Текст]: учеб. / А.В.Кравцов. — М.: Колос, 1999. — 215 с.
15. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах [Текст]: учеб. / В.И. Нефедов [и др.]; под ред. В.И. Нефедова. — М.: Высшая школа, 2001. — 383 с.
16. Тартаковский Д.М. Метрология, стандартизация и технические средства измерений [Текст]: учеб. / Д.М. Тартаковский, А.С. Ястребов. — М.: Высшая школа, 2001. — 205 с.
17. Радкевич Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст]: учеб. / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, Б. И. Лактионов. — М.: Высшая школа, 2004. — 767 с.
18. Боднер В.А. Измерительные приборы. В 2-х т. Т.1. Теория измерительных приборов. Измерительные преобразователи [Текст]: учеб. / В.А. Боднер,

А.В. Алферов. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 392 с.

19. Лифиц И.М. Основы стандартизации, метрологии и сертификации [Текст]: учеб. / И.М. Лифиц. — М.: Юрайт, 2000. — 285 с.

20. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.

21. Бурдун Г.Д. Основы метрологии [Текст]: учеб. пособие / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 305 с.

22. Сергеев, А. Г. Метрология. Стандартизация. Сертификация [Текст]: учеб. пособие / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. — М.: Логос, 2005. — 559 с.

23. Дворяшин, Б. В. Метрология и радиоизмерения [Текст]: учеб. пособие / Б. В. Дворяшин. — М.: Академия, 2005. — 297 с.

24. Измерение электрических и неэлектрических величин [Текст]: учеб. пособие / Н.Н.Евтихийев [и др.]; под ред. Евтихьева Н.Н. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.

25. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи [Текст]: учеб. пособие / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.

26. Электрические измерения [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. Н. Малиновский [и др.]; под ред. В. Н. Малиновский. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 416 с.

27. Измерение электрических и неэлектрических величин [Текст] : учеб. пособие / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров; под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.

28. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин [Текст]: учеб. пособие / Э.Г. Атамалян. — М.: Высшая школа, 1989. — 384 с.

29. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст]: учеб. пособие / П.П. Орнатский. — К: Выща школа, 1976. — 287 с.

30. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности [Текст]: учебно-справочное руководство / Л. А. Сена. — М.: Наука, 1988. — 432 с.

31. Основные термины в области метрологии [Текст]: словарь-справочник / М.Ф. Юдин, М.Н. Селиванов, О.Ф. Тищенко, А.И. Скороходов; под ред. Ю.В. Тарбеева. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 113 с.

32. Любимов Л.И. Поверка средств электрических измерений [Текст]: справочная книга / Л.И. Любимов, И.Д. Форсилова; под ред. Т.Б. Рождественской. — Л.: Энергия, 1979. — 192 с.

33. Епифанов С.Н. Электроизмерительные приборы [Текст]: справочн.-метод. пособие / С.Н. Епифанов, А.А. Красных. — Киров: Изд-во ВятГТУ, 2005. — 42 с.

34. Справочник по электроизмерительным приборам [Текст] / К.К. Илюнин, Д.И. Леонтьев, Л.И. Набенина; под ред. К.К. Илюнина. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 784 с.

35. Справочник по радиоизмерительным приборам. В 3 т. Т. 1. Измерение напряжений, параметров элементов и цепей. Источники питания [Текст] / под ред. В.С. Насонова. — М.: Сов. Радио, 1976. — 232 с.
36. Справочник по радиоизмерительным приборам. В 3 т. Т. 2. Измерение частоты, времени и мощности. Измерительные генераторы [Текст] / под ред. В.С. Насонова. — М.: Сов. Радио, 1977. — 272 с.
37. Справочник по радиоизмерительным приборам. В 3 т. Т. 3. Измерение электромагнитных полей. Анализ спектра. Импульсные измерения [Текст] / под ред. В.С. Насонова. — М.: Сов. Радио, 1979. — 424 с.
38. Измерения в электронике [Текст]: справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др; под ред. В.А. Кузнецова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 512 с.
39. Метрологическое обеспечение электронных средств измерений электрических величин [Текст]: справочная книга /А.М. Федоров, Н.Я. Цыган, В.И. Мичурин. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.
40. Правила улаштування електроустановок / Мінпаливенерго України. — К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2006. — 187 с.
41. Регистр судоходства Украины. Руководство по освидетельствованию морских судов в эксплуатации (РОМСЭ-2009). Бюллетень изменений и дополнений № 1/ Регистр судоходства Украины; сост. О.И. Тарасенко. — Киев: Официальное издание Регистра судоходства Украины, 2010. — 89 с.
42. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения [Текст]. Введ. 2001-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 63 с.
43. ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97). Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 1. Определения и основные требования, общие для всех частей [Текст]. Введ. 2003-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 32 с.
44. ГОСТ 8711-93 (МЭК 51-2-84). Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам [Текст]. Введ. 1996-01-01. — Минск: Изд-во стандартов, 1995. — 20 с.
45. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования [Текст]. Введ. 1981-01-07. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 16 с.
46. ДСТУ 2708. Метрология. Поверка средств измерительной техники. Организация и порядок проведения [Текст]. Введ. 2006-07-01. — Киев.: Изд-во стандартов, 2006. — 18 с.
47. ДСТУ 3989 — 2000. Метрология. Калибровка средств измерительной техники. Организация и порядок проведения и оформления результатов [Текст]. Введ. 2000-25-09. — М.: Изд-во Госстандарт Украины, 2000. — 11 с.
48. ГОСТ 2.710-81. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. [Текст]. Введ. 1981-01-07. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 5 с.

49. ГОСТ 2.729-68. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Приборы электроизмерительные [Текст]. Введ. 1971-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 8 с.
50. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. [Текст]. Введ. 1977-01-01. — М.: Изд-во Госстандарт Украины, 1977. — 7 с.
51. МИ 2083–90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей [Текст]. Введ. 1992-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 11 с.
52. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Щитовые круглошкальные приборы для жестких условий эксплуатации. Вольтметр М1420 [Электронный ресурс]. — Западприбор.— Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/m1420/](http://zapadpribor.com/m1420/) — 23.06.2013 г.
53. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Амперметры и вольтметры переменного тока низкочастотные (до 1000 Гц). Амперметр Э350 [Электронный ресурс] / — Западприбор.— Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/e350/](http://zapadpribor.com/e350/) — 23.06.2013 г.
54. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Щитовые круглошкальные приборы для жестких условий эксплуатации. Синхроноскоп Э1505 [Электронный ресурс]. — Западприбор.— Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/e1505/](http://zapadpribor.com/e1505/) — 23.06.2013 г.
55. Электроизмерительные приборы. Ваттметры, варметры лабораторные. Ваттметр Д5066 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/category/vattmetry-varmetry-laboratornye/](http://zapadpribor.com/category/vattmetry-varmetry-laboratornye/) — 23.06.2013 г.
56. Электроизмерительные приборы. Вольтметры лабораторные. Киловольтметр С197 электростатический [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/s197/](http://zapadpribor.com/s197/) — 23.06.2013 г.
57. Измерение больших токов и высоких напряжений. [Электронный ресурс]. — Elektrica.info. — Режим доступа: [www. URL: http://elektrica.info/izmerenie-bol-shih-tokov-i-vy-sokih-napryazhenij/](http://elektrica.info/izmerenie-bol-shih-tokov-i-vy-sokih-napryazhenij/) — 23.06.2013 г.
58. Электроизмерительные приборы. Мосты измерительные. Потенциометр постоянного тока ПП-63 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа : [www. URL: http://zapadpribor.com/pp-63/](http://zapadpribor.com/pp-63/) — 23.06.2013 г.
59. ТШЛ-СЭЩ-0,66 трансформатора тока измерительный сухой [Электронный ресурс]. — ТД “Автоматика”.—Режим доступа: [www.URL: http://www.tdtransformator.ru/catalog/izmeritelnye/toka/0-66-kv/tshl-sesch-0-66.htm/](http://www.tdtransformator.ru/catalog/izmeritelnye/toka/0-66-kv/tshl-sesch-0-66.htm/) — 23.06.2013г.
60. Электроизмерительные приборы. Трансформаторы промышленные. Измерительные трансформаторы тока. Класс напряжения 10 кВ. Трансформатор тока ТПОЛ-10М [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/tpol-10m-2/](http://zapadpribor.com/tpol-10m-2/) — 23.06.2013 г.
61. Электроизмерительные приборы. Трансформаторы промышленные. Трансформаторы напряжения. Однофазные трансформаторы напряжения. Незаземляемый трансформатор напряжения НОЛ.12-0,38 [Электронный ресурс].

— Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/nol12-038/](http://zapadpribor.com/nol12-038/) — 23.06.2013 г.

62. Электроизмерительные приборы. Вольметры. Милливольтметр ВЗ-56 аналоговый переменного тока [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v3-56/](http://zapadpribor.com/v3-56/) — 23.06.2013 г.

63. Электроизмерительные приборы. Вольметры. Вольтметр В7-26 универсальный [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v7-26/](http://zapadpribor.com/v7-26/) — 23.06.2013 г.

64. Электроизмерительные приборы. Вольметры. Микровольтметр В6-9 селективный [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v6-9/](http://zapadpribor.com/v6-9/) — 23.06.2013 г.

65. Электроизмерительные приборы. Вольметры. Милливольтметр ВЗ-48 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v3-48/](http://zapadpribor.com/v3-48/) — 23.06.2013 г.

66. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Фазометры. Фазометры однофазные. Фазометр Д31 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/d31/](http://zapadpribor.com/d31/) — 23.06.2013 г.

67. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Частотомеры. Частотомер В80 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v80/](http://zapadpribor.com/v80/) — 23.06.2013 г.

68. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Щитовые круглошкальные приборы для жестких условий эксплуатации. Частотомер Д1606 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/d1606/](http://zapadpribor.com/d1606/) — 23.06.2013 г.

69. Электроизмерительные приборы. Частотомеры лабораторные. Частотомер Ф5043 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/f5043/](http://zapadpribor.com/f5043/) — 23.06.2013 г.

70. Электроизмерительные приборы. Анализаторы спектра, шума. Анализатор спектра С4-74 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/s4-74/](http://zapadpribor.com/s4-74/) — 23.06.2013 г.

71. Электроизмерительные приборы. Измерители нелинейных искажений. Измеритель нелинейных искажений СК6-13 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/sk6-13/](http://zapadpribor.com/sk6-13/) — 23.06.2013 г.

72. 3-х фазный анализатор мощности и гармоник на 1000А (3000А) типа Extech 382096 [Электронный ресурс]. — ООО “ЮгЭнергоКонсалтинг”. — Режим доступа: <http://yec.uaprom.net/p13663112-analizator-kachestva-elektroenergii.html> / — 23.06.2013 г.

73. Радиоизмерительные приборы. Осциллографы. Осциллографы универсальные. Осциллограф С1-96 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/s1-96/](http://zapadpribor.com/s1-96/) — 23.06.2013 г.

74. Электроизмерительные приборы. Меры и магазины. Прибор Р4833. [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapad-pribor.com/r4833/](http://zapad-pribor.com/r4833/) — 23.06.2013 г.

75. Электроизмерительные приборы. Омметры (измерители сопротивления). Мегаомметр М4100/1 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/m4100-1/](http://zapadpribor.com/m4100-1/) — 23.06.2013 г.

76. Электроизмерительные приборы. Щитовые аналоговые приборы. Щитовые круглошкальные приборы для жестких условий эксплуатации. Мегаомметр М1423.1 [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/m1423-1/](http://zapadpribor.com/m1423-1/) — 23.06.2013 г.

77. Цифровой мультиметр Omix P99-AVF-1-1.0. [Электронный ресурс]. — АРК “Энергосервис”. — Режим доступа: [www. URL: http://www.kipspb.ru/catalog/6616/element256799.php/](http://www.kipspb.ru/catalog/6616/element256799.php/) — 23.06.2013 г.

78. Радиоизмерительные приборы. Вольтметры. Вольтметр В7-40/5 универсальный цифровой [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/v7-40-5/](http://zapadpribor.com/v7-40-5/) — 23.06.2013 г.

79. Электроизмерительные приборы. Частотомеры, синтезаторы, стандарты частоты. Частотомер ЧЗ-63/1 электронно-счетный [Электронный ресурс]. — Западприбор. — Режим доступа: [www. URL: http://zapadpribor.com/ch3-63-1/](http://zapadpribor.com/ch3-63-1/) — 23.06.2013 г.

80. Датчики температуры ТСМ, ТСП. Термопреобразователи сопротивления медные и платиновые [Электронный ресурс]. ЧАО “ТЭРА”. — Режим доступа: [www. URL: http://gribovod.kiev.ua/t-sensors.htm](http://gribovod.kiev.ua/t-sensors.htm) / — 23.06.2013 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень единиц физических величин и приставок, согласно ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97). Буквенные коды приборов

Таблица А.1 — Перечень единиц физических величин и приставок

Единицы физических величин			Приставки и множители			
Наименование	Обозначение		Приставка	Множитель	Обозначение приставки	
	международное	русское			международное	русское
Ампер	A	А	экса	10^{18}	E	Э
Децибел	dB	дБ	пета	10^{15}	P	П
Герц	Hz	Гц	тера	10^{12}	T	Т
Ом	Ω	Ом	гига	10^9	G	Г
Секунда	s	с	мега	10^6	M	М
Сименс	S	См	кило	10^3	k	к
Тесла	T	Тл	гекто*	10^2	h	г
Вольт	V	В	дека*	10	da	да
Вольт-ампер	V·A	В·А	деци*	10^{-1}	d	д
Реактивная мощность	var	вар	санτι*	10^{-2}	c	с
Ватт	W	Вт	милли	10^{-3}	m	м
Коэффициент мощности	cos Φ или cos ϕ	cos ϕ	микро	10^{-6}	μ	мк
			нано	10^{-9}	n	н
			пико	10^{-12}	p	п
Градус			фемто	10^{-15}	f	ф
Цельсия	°C	°C	атто	10^{-18}	a	а

Примечание — Приставки, обозначенные знаком «*», — нерекомендуемые, их применения следует избегать.
Обозначение приставки следует писать рядом с обозначением единицы без интервала.
Если указано значение, то за ним следует интервал перед приставкой и обозначением единицы. Например: 23 °C.

Таблица А.2 — Буквенные коды электроизмерительных приборов согласно
ГОСТ 2.710- 81

Первая буква кода	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
Р	Приборы, изме- рительное обо- рудование	Амперметр Счетчик импульсов Частотомер Счетчик активной энергии Счетчик реактивной энергии Омметр Регистрационный прибор Секундомер, часы Вольтметр Ваттметр Варметр	РА РС РФ РІ РК РР РС РТ РV РW РVА

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Классификация электронных измерительных приборов

Таблица Б.1 — Классификация электронных ИП

Подгруппы	Виды
Подгруппа А приборы для измерения силы тока	А1 — установки или приборы для поверки амперметров
	А2 — амперметры постоянного тока
	А3 — амперметры переменного тока
	А7 — амперметры универсальные
	А9 — преобразователи тока
Подгруппа Б источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов	Б2 — источники переменного тока
	Б4 — источники калиброванного напряжения и тока
	Б5 — источники постоянного тока
	Б6 — источники с регулируемыми параметрами
	Б7 — источники постоянного и переменного тока универсальные
Подгруппа В приборы для измерения напряжения	В1 — установки или приборы для поверки вольтметров
	В2 — вольтметры постоянного тока
	В3 — вольтметры переменного тока
	В4 — вольтметры импульсного тока
	В5 — вольтметры фазочувствительные (векторметры)
	В6 — вольтметры селективные
	В7 — вольтметры универсальные
	В8 — измерители отношения напряжений и (или) разности напряжений
	В9 — преобразователи напряжений
Подгруппа Г генераторы измерительные	Г1 — установки для поверки измерительных генераторов
	Г2 — генераторы шумовых сигналов
	Г3 — генераторы сигналов низкочастотные
	Г4 — генераторы сигналов высокочастотные
	Г5 — генераторы импульсов
	Г6 — генераторы сигналов специальной формы
	Г8 — генераторы качающейся частоты (сви́п-генераторы)
Подгруппа Д аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений	Д1 — установки или приборы для поверки аттенюаторов и приборов для измерения ослаблений
	Д2 — аттенюаторы резисторные и емкостные
	Д3 — аттенюаторы поляризационные
	Д4 — аттенюаторы предельные
	Д5 — аттенюаторы поглощающие
	Д6 — аттенюаторы электрически управляемые
Подгруппа Е приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными	Е1 — меры, установки или приборы для поверки измерителей параметров компонентов и цепей
	Е2 — измерители полных сопротивлений и (или) полных проводимостей
	Е3 — измерители индуктивностей
	Е4 — измерители добротности
	Е6 — измерители сопротивлений
	Е7 — измерители параметров универсальные
	Е8 — измерители емкостей
	Е9 — преобразователи параметров компонентов и цепей

Продолжение таблицы Б.1 — Классификация электронных ИП

Подгруппы	Виды
Подгруппа К комплексные измерительные установки	К2 — установки измерительные комплексные
	К3 — установки измерительные комплексные автоматизированные
	К4 — приборы (блоки) комплексных измерительных установок
	К6 — приборы (блоки) комплексных автоматизированных измерительных установок
Подгруппа Л приборы общего применения для измерения параметров ламп и приборов	Л2 — измерители параметров (характеристик) полупроводниковых приборов
	Л3 — измерители параметров (характеристик) ламп
	Л4 — измерители шумовых параметров полупроводниковых приборов
Подгруппа М приборы для измерения мощности	М1 — установки или приборы для поверки ваттметров
	М2 — ваттметры проходящей мощности
	М3 — ваттметры поглощаемой мощности
	М5 — преобразователи приемные (головки) ваттметров
Подгруппа П приборы для измерения напряженности поля и радиопомех	П1 — установки (приборы) для поверки приборов для измерения напряженности поля и радиопомех
	П2 — индикаторы поля
	П3 — измерители напряженности поля
	П4 — измерители радиопомех
	П5 — приемники измерительные
	П6 — антенны измерительные
	П7 — измерители параметров антенн
Подгруппа Р приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными	Р1 — линии измерительные
	Р2 — измерители коэффициента стоячей волны
	Р3 — измерители полных сопротивлений
	Р4 — измерители комплексных коэффициентов передач
	Р5 — измерители параметров линий передач
	Р6 — измерители добротности
	Р9 — преобразователи параметров
Подгруппа С приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра	С1 — осциллографы универсальные
	С2 — измерители коэффициента амплитудной модуляции
	С3 — измерители девиации частоты (девиометры)
	С4 — анализаторы спектра
	С6 — измерители нелинейных искажений
	С7 — осциллографы скоростные, стробоскопические
	С8 — осциллографы запоминающие
	С9 — осциллографы специальные
Подгруппа У усилители измерительные	У2 — усилители селективные
	У3 — усилители высокочастотные
	У4 — усилители низкочастотные
	У5 — усилители напряжения постоянного тока
	У7 — усилители универсальные
Подгруппа Ф приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания	Ф1 — установки или приборы для поверки измерителей разности фаз и группового времени запаздывания
	Ф2 — измерители разности фаз
	Ф3 — фазовращатели измерительные
	Ф4 — измерители группового времени запаздывания

Окончание таблицы Б.1 — Классификация электронных ИП

Подгруппа Х приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств	X1 — приборы для исследования АЧХ
	X2 — приборы для исследования переходных характеристик
	X3 — приборы для исследования фазочастотных характеристик
	X4 — приборы для исследования амплитудных характеристик
	X5 — измерители коэффициента шума
	X6 — приборы для исследования корреляционных характеристик
	X8 — установки или прибору для поверки измерителей характеристик радиоустройств
Подгруппа Ч приборы для измерения частоты и времени	Ч1 — стандарты частоты и времени
	Ч2 — частотомеры резонансные
	Ч3 — частотомеры электронно-счетные
	Ч4 — частотомеры гетеродинные, емкостные и мостовые
	Ч5 — синхронизаторы частоты и преобразователи частоты
	Ч6 — синтезаторы частот; делители и умножители частоты
	Ч7 — синхронометры и приемники сигналов эталонных частот и сигналов времени
	Ч9 — преобразователи частоты
Подгруппа Ш приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов	Ш1 — измерители электрических и магнитных свойств материалов на низких частотах;
	Ш2 — измерители электрических и магнитных свойств материалов на высоких частотах
Подгруппа Э измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов	Э1 — трансформаторы
	Э2 — переходы, соединители
	Э3 — переключатели
	Э4 — модуляторы
	Э5 — направленные ответвители, разветвители датчики полных сопротивлений
	Э6 — вентили; циркуляторы
	Э7 — головки детекторные; головки смесительные
	Э8 — фильтры
	Э9 — нагрузки
Подгруппа Я блоки радиоизмерительных приборов	Я1 — блоки приборов для измерения силы тока и напряжения, параметров компонентов и цепей
	Я2 — блоки измерителей параметров элементов и трактов с распределенными постоянными
	Я3 — блоки приборов для измерения частоты и времени; блоки измерителей разности фаз и группового времени запаздывания
	Я4 — блоки приборов для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра
	Я5 — блоки измерителей характеристик радиоустройств и блоки приборов для импульсных измерений
	Я6 — блоки приборов для измерения напряженности поля и радиопомех и блоки усилителей измерительных
	Я7 — блоки измерительных генераторов и приборов для измерения ослаблений
	Я8 — блоки источников питания
	Я9 — блоки преобразователей измерительных; блоки для индикации результатов измерений; блоки коммутации

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обозначения электроизмерительных приборов, согласно ГОСТ 2.729-68

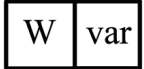
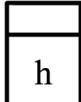
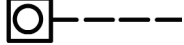
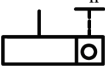
Таблица В.1— Обозначения электроизмерительных приборов

Наименование	Обозначение
1а. Датчик измеряемой неэлектрической величины	
1. Прибор электроизмерительный	
а) показывающий	
б) регистрирующий	
в) интегрирующий (например, счетчик электрической энергии) Примечания: 1. При необходимости изображения нестандартизованных электроизмерительных приборов следует пользоваться сочетания соответствующих основных обозначений, например, комбинированный прибор, показывающий и регистрирующий. 2. Для указания назначения электроизмерительного прибора в его обозначение вписывают условные графические обозначения, установленные в стандартах ЕСКД, а также буквенные обозначения единиц измерения или измеряемых величин, которые помещают внутри графического обозначения электроизмерительного прибора	 
а) амперметр	A
б) вольтметр	V
в) вольтметр двойной	v
г) вольтметр дифференциальный	ΔV
д) вольтамперметр	VA
е) ваттметр	W
ж) ваттметр суммирующий	ΣW
з) варметр (измеритель активной мощности)	var
и) микроамперметр	μA
к) миллиамперметр	mA
л) милливольтметр	mV
м) омметр	Ω
н) мегаомметр	M Ω
о) частотомер	Hz
п) волномер	λ
р) фазометр:	φ
измеряющий сдвиг фаз	$\cos \varphi$
измеряющий коэффициент мощности	Ah
с) счетчик ампер-часов	Wh
т) счетчик ватт-часов	varh
у) счетчик вольт-ампер-часов реактивный	t°
ф) термометр, пирометр	±
х) индикатор полярности	n
ц) тахометр	Pa или P
ч) измеритель давления	
ш) измеритель уровня жидкости	dB
щ) измеритель уровня сигнала	

Продолжение таблицы В.1— Обозначения электроизмерительных приборов

Наименование	Обозначение
3. В обозначения электроизмерительных приборов допускается вписывать необходимые данные согласно действующим стандартам на электроизмерительные приборы. 4. Если необходимо указать характеристику отсчетного устройства прибора, то в его обозначение вписывают следующие квалифицирующие символы: а) прибор, подвижная часть которого может отклоняться в одну сторону от нулевой отметки: вправо влево б) прибор, подвижная часть которого может отклоняться в обе стороны от нулевой отметки допускается применять обозначение в) прибор вибрационной системы г) прибор с цифровым отсчетом д) прибор с непрерывной регистрацией (записывающий) е) прибор с точечной регистрацией (записывающий) ж) прибор печатающий с цифровой регистрацией з) прибор с регистрацией перфорированием Например: вольтметр с цифровым отсчетом вольтметр с непрерывной регистрацией амперметр, подвижная часть которого отклоняется в обе стороны от нулевой отметки 2. Гальванометр 3. Синхроноскоп 4. Осцилоскоп 5. Осциллограф 6. Гальванометр осциллографический: а) тока или напряжения б) мгновенной мощности 7. Счетчик импульсов 8. Электрометр 9. Болومتر полупроводниковый	

Продолжение таблицы В.1— Обозначения электроизмерительных приборов

Наименование	Обозначение
10. Датчик температуры	 или 
10а. Датчик давления	 или 
Примечание: При необходимости указания конкретной величины, в которую преобразуется неэлектрическая величина, допускается применять следующие обозначения, например, датчик давления	 U 
11. Термоэлектрический преобразователь: а) с бесконтактным нагревом б) с контактным нагревом. п.12 по ГОСТ 2.728-74	По ГОСТ 2.768-90 По ГОСТ 2.768-90
13. Часы вторичные	
Примечание. Для указания часов, минут и секунд используют следующее обозначение	
14. Часы первичные	
15. Часы с контактным устройством	
16. Часы синхронные, например, на 50 Гц	
17. Индикатор максимальной активной мощности, имеющий обратную связь с ваттметром	
18. Дифференциальный вольтметр	
19. Соленомер	
20. Самопишущий комбинированный ваттметр и варметр	
21. Счетчик времени	
22. Счетчик ватт-часов, измеряющий энергию, передаваемую в одном направлении	
23. Счетчик ватт-часов с регистрацией максимальной активной мощности	
24. Отличительный символ функции счета числа событий	
25. Счетчик электрических импульсов с ручной установкой на n (установка на нуль при n=0)	

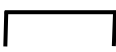
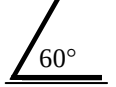
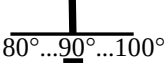
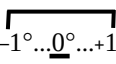
Окончание таблицы В.1— Обозначения электроизмерительных приборов

Наименование	Обозначение
26. Счетчик электрических импульсов с установкой на нуль электрическим путем	
27. Счетчик электрических импульсов с несколькими контактами; контакты замыкаются соответственно на каждой единице (10^0), десятке (10^1), сотне (10^2), тысяче (10^3) событий, зарегистрированных счетным устройством	
28. Счетное устройство, управляемое кулачком и управляющее замыканием контакта через каждые n событий	
Примечания к пп. 1-28 1. При изображении обмоток измерительных приборов разнесенным способом используют следующие обозначения:	
а) обмотка токовая	
б) обмотка напряжения	
в) обмотка секционирования с отводами:	
токовая	
напряжения	
г) обмотка секционирования переключаемая:	
токовая	
напряжения	
2. Обмотки в схемах измерительных приборов, отражающих их взаимное расположение в измерительном механизме, изображают следующим образом:	
а) обмотка токовая	
б) обмотка напряжения	
в) обмотки токовые для сложения или вычитания	
г) обмотки напряжения для сложения или вычитания	
Например, механизм измерительный:	
амперметра однообмоточного	
вольтметра однообмоточного	
ваттметра однофазного	
ваттметра трехфазного одноэлементного с двумя токовыми обмотками	
ваттметра трехфазного двухэлементного	
ваттметра трехфазного трехэлементного	
логометра четырехобмоточного (например, синхроскопа трехфазного)	

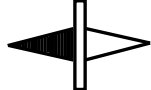
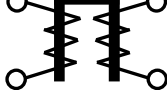
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей, согласно ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97)

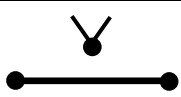
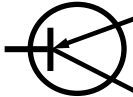
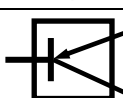
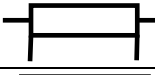
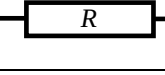
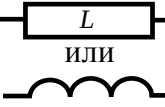
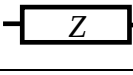
Таблица Г.1 — Обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей

Номер символа	Наименование	Обозначение символа	
В. Род измеряемой величины и количество измерительных элементов			
В-1	Цепь постоянного тока и (или) измерительный элемент, реагирующий на постоянный ток		
В-2	Цепь переменного тока и (или) измерительный элемент, реагирующий на переменный ток		
В-3	Цепь постоянного тока и (или) переменного тока и (или) измерительный элемент, реагирующий на постоянный и переменный ток		
В-4	Трехфазная схема переменного тока (основное обозначение)	3 ~	
В-6	Один измерительный элемент (Е) для трехпроводной цепи	3 ~ 1E	
В-7	Один измерительный элемент (Е) для четырехпроводной цепи	3N ~ 1E	
В-8	Два измерительных элемента (Е) для трехпроводной цепи с несимметричными нагрузками	3 ~ 2E	
В-9	Два измерительных элемента (Е) для четырехпроводной цепи с несимметричными нагрузками	3N ~ 2E	
В-10	Три измерительных элемента (Е) для четырехпроводной цепи с несимметричными нагрузками	3N ~ 3E	
Д. Положение при эксплуатации			
D-1	Прибор для использования с вертикальным циферблатом		
D-2	Прибор для использования с горизонтальным циферблатом		
D-3	Прибор для использования с циферблатом с наклоном (например, 60°) относительно горизонтальной плоскости		
D-4	Пример для прибора, используемого как D-1 с рабочей областью применения от 80° до 100°		
D-5	Пример для прибора, используемого как D-2 с рабочей областью применения от минус 1° до плюс 1°		
D-6	Пример для прибора, используемого как D-3 с рабочей областью применения от 45° до 75°		
Е. Класс точности			
Е-1	Обозначение класса точности (например, 1), кроме тех случаев, когда нормирующее значение соответствует длине шкалы или показываемому значению, или интервалу измерения	1	
Е-2	Обозначение класса точности (например, 1), когда нормирующее значение соответствует длине шкалы		

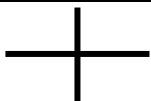
Продолжение таблицы Г.1 — Обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей

Номер символа	Наименование	Обозначение символа
Е-3	Обозначение класса точности (например, 1), когда нормирующее значение соответствует показываемому значению	
Е- 10	Обозначение класса точности (например, 1), когда нормирующее значение соответствует интервалу измерения	
F. Основные обозначения		
F-1	Магнитоэлектрический прибор с подвижной катушкой	
F-2	Магнитоэлектрический логометр (измеритель отношений)	
F-3	Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
F-4	Магнитоэлектрический логометр (измеритель отношений) с подвижным магнитом	
F-5	Электромагнитный прибор	
F-6	Поляризованный электромагнитный прибор	
F-7	Электромагнитный логометр (измеритель отношений)	
F-8	Электродинамический прибор без железного сердечника	
F-9	Электродинамический прибор с железным сердечником (ферродинамический)	
F-10	Электродинамический логометр (измеритель отношений) без железного сердечника	
F-11	Электродинамический (ферродинамический) логометр (измеритель отношений) с железным сердечником	
F-12	Индукционный прибор	
F-13	Индукционный измеритель отношений	
F-15	Биметаллический прибор	
F-16	Электростатический прибор	

Продолжение таблицы Г.1 — Обозначения для маркировки приборов и вспомогательных частей

Номер символа	Наименование	Обозначение символа
F-17	Вибрационный прибор	
F-18	Термопара (термопреобразователь) неизолированная	
F-19	Изолированная термопара (термопреобразователь)	
F-20	Электронное устройство в измерительной цепи	
F-21	Электронное устройство в вспомогательной цепи	
F-22	Выпрямитель	
F-23	Шунт	
F-24	Добавочное сопротивление	
F-25	Добавочная катушка индуктивности	
F-26	Добавочное полное сопротивление	
F-27	Электрический экран	
F-28	Магнитный экран	
F-29	Астатический прибор	Ast
F-30	Напряженность магнитного поля, выраженная в кА/м, вызывающая изменение показаний, соответствующее обозначению класса точности (например, 2 кА/м)	
F-31	Зажим «земля» (основное обозначение)	
F-32	Регулятор нуля (интервала измерения)	
F-33	См. отдельный документ	
F-34	Напряженность электрического поля, выраженная в кВ/м, вызывающая изменение показаний, соответствующее обозначению класса точности (например, 10 кВ/м)	

Окончание таблицы Г.1 — Обозначения для маркировки приборов
и вспомогательных частей

F-35	Общая вспомогательная часть	
F-37	Ферромагнитная опорная плоскость толщиной X мм	Fe X
F-38	Ферромагнитная опорная плоскость любой толщины	Fe
F-39	Неферромагнитная опорная плоскость любой толщины	Nfe
F-42	Зажим корпуса или шасси	
F-43	Зажим защитного заземления	
F-44	Зажим заземления, свободный от помех	
F-45	Зажим сигнала низкого уровня	
F-46	Положительный зажим	
F-47	Отрицательный зажим	
F-48	Управление установлением диапазона сопротивления	
F-49	Прибор снабжен устройством защиты от перегрузок	
F-50	Управление возвратом в исходное состояние устройства защиты от перегрузок	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д **Табличные данные для оценки случайных погрешностей** **и статистической обработки результатов измерений**

Таблица Д.1 — Интеграл вероятности $\Phi(t)$

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,00000	1,00	0,68269	2,00	0,95450	3,0	0,99730
0,05	0,03988	1,05	0,70628	2,05	0,95964	3,10	0,99806
0,10	0,07966	1,10	0,72867	2,10	0,96427	3,20	0,99863
0,15	0,11924	1,15	0,74986	2,15	0,96844	3,30	0,99903
0,20	0,15852	1,20	0,76986	2,20	0,97219	3,40	0,99933
0,25	0,19741	1,25	0,78870	2,25	0,97555	3,50	0,99953
0,30	0,23582	1,30	0,80640	2,30	0,97855	3,60	0,99968
0,35	0,27366	1,35	0,82298	2,35	0,98123	3,70	0,99978
0,40	0,31084	1,40	0,83849	2,40	0,98360	3,80	0,99986
0,45	0,34729	1,45	0,85294	2,45	0,98571	3,90	0,99990
0,50	0,38292	1,50	0,86635	2,50	0,98758	4,00	0,99994
0,55	0,41768	1,55	0,87886	2,55	0,98922	4,10	0,99996
0,60	0,45149	1,60	0,89040	2,60	0,99069	4,20	0,99997
0,65	0,48431	1,65	0,90106	2,65	0,99195	4,30	0,99999
0,70	0,51607	1,70	0,91087	2,70	0,99307	4,40	0,99999
0,75	0,54675	1,75	0,91988	2,75	0,99404	4,50	0,99999
0,80	0,57629	1,80	0,92814	2,80	0,99489		
0,85	0,60468	1,85	0,93569	2,85	0,99563		
0,90	0,63188	1,90	0,94257	2,90	0,99627		
0,95	0,65789	1,95	0,94882	2,95	0,99682		

Таблица Д.2 — Интегральная функция нормального распределения

$F(t)$	t	$F(t)$	t	$F(t)$	t
0,0005	-3,2905	0,35	-0,3853	0,75	+0,6745
0,005	-2,5750	0,40	-0,2533	0,80	+0,8416
0,01	-2,3267	0,45	-0,1257	0,85	+1,0364
0,05	-1,6449	0,50	-0,0000	0,90	+1,2816
0,10	-1,2816	0,50	+0,0000	0,95	+1,6449
0,15	-1,0364	0,55	+0,1257	0,99	+2,3267
0,20	-0,8416	0,60	+0,2533	0,995	+2,5750
0,25	-0,6745	0,65	+0,3853	0,9995	+3,2905
0,30	-0,5244	0,70	+0,5244		

Таблица Д.3 — Интеграл вероятности по закону Стьюдента

Число опытов n	Значения $t_{P,n}$ при вероятности P							
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
2	1,000	1,376	1,963	3,078	6,134	12,706	31,821	63,657
3	0,816	1,061	1,336	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
4	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
5	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
6	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,570	3,365	4,032
7	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
8	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
9	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
10	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
12	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
14	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
16	0,691	0,866	1,074	1,340	1,753	2,131	2,602	2,947
20	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
23	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
25	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,429	2,797
30	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756

Таблица Д.4 — Предельные значения коэффициента t_T
для определения наличия промахов

Объем выборки n	Предельные значения t_T при уровне значимости q			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
6	1,73	1,77	1,82	1,89
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,44	2,53	2,68
20	2,38	2,46	2,56	2,71

Таблица Д.5 — Квантили распределения d для проверки согласия экспериментального распределения нормальному с помощью критерия 1

Объем выборки n	$d_2\left(\frac{q_1}{2}\right)$		$d_1\left(1 - \frac{q_1}{2}\right)$	
	0,01	0,05	0,95	0,99
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,7360	0,7040
31	0,8826	0,8625	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,7440	0,7167
41	0,8722	0,8540	0,7470	0,7216
46	0,8682	0,8508	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,7518	0,7291

Таблица Д.6 — Значения m_T и α , соответствующие различным n и q для проверки согласия экспериментального распределения нормальному с помощью критерия 2

Объем выборки n	m_T	α при уровне значимости q_2 равном		
		0,01	0,02	0,05
10	1	0,98	0,98	0,96
11...14	1	0,99	0,98	0,97
15...20	1	0,99	0,99	0,98
21...22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24...27	2	0,98	0,98	0,97
28...32	2	0,99	0,98	0,97
33...35	2	0,99	0,98	0,98
36...49	2	0,99	0,99	0,98

Учебное пособие
Матвеев Юрий Валентинович

МЕТРОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Навчальний посібник
Матвєєв Юрій Валентинович

МЕТРОЛОГІЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРОВАННЯ

Корректор Л.П. Светлых
Нормоконтролер И.А. Черевкова
Компьютерный набор и верстка Ю.В. Матвеев

Отпечатано в типографии «ИП Тимохина»
Формат 420х297. Бумага офсетная. Печать офс.
Объем 14,5 п.л. Гарнитура “Times”. Тираж 300 экз. Зак. 17.
г. Севастополь, пр. Гагарина, 22. тел. (0692) 53-63-53, +7 978 704 36 54.
