



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

**«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

**«Основы метрологии и
радиоизмерений»**

(электронный конспект лекций)

**Санкт-Петербург
2023 г.**



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Введение

Санкт-Петербург
2024 г.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*



"Основы метрологии и радиоизмерений"

Для студентов ФРТ и ОФ, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и специалистов:

- 210400 - радиотехника; 210700 - инфокоммуникационные технологии и системы связи;
- 211000 - конструирование и технология электронных средств
- 11.05.01 - «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Читается на 2 курсе (4 семестр):

- 36 лекционных часов (1 лекция в неделю) ;
- 18 часов лабораторных работ (допуск к экзамену) ;
- экзамен.

Ведущие лекторы:

- доцент каф. ТОР, к.т.н., **Данилин Александр Алексеевич**
- ст. преподаватель каф. ТОР **Москалец Дмитрий Олегович**

Список лабораторных работ:

1. **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**
2. **ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫМИ ВОЛЬТМЕТРАМИ**
3. **ЭЛЕКТРОННО–ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ**
4. **ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА**
5. **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ**
6. **ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**
7. **ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА И ВОЛЬТМЕТРА**

Лаборатория ОмРИ - 1 корпус , 2 этаж , а. 1243

Основная литература-1

“Основы метрологии и радиоизмерений”



Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике/Учеб пособие. – СПб.: Издательство Лань, 2017. - 408с. (шифр библиотеки ЛЭТИ 3 842/ Д18)



Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Приборы и техника радиоизмерений/ Учеб.пособие. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. -204с



Данилин А.А. , Москалец Д.О., Сосновский В.А. Приборы и техника радиоизмерений в вопросах и ответах. Учеб. Пособие\Под ред. А.А. Данилина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. -124с



Баруздин С.А., Данилин А.А. Основы метрологии и радиоизмерений: лабораторный практикум/ СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015 - 124с (Шифр библиотеки ЛЭТИ 322/Б24))

Основная литература-2

“Основы метрологии и радиоизмерений”



Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения / Учеб. пособие для студентов ВУЗов, - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 304с (Шифр библиотеки ЛЭТИ Ж10/Д24)



Метрология и радиоизмерения / Учебник для ВУЗов.
/Под ред. В.И.Нефедова, -М.:, Высшая школа, 2003. -526 с (Шифр библиотеки ЛЭТИ Ж10/М54)



Хамадулин Э.Ф. Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах: учеб. Пособие. - М.: Издательство "Юрайт", 2016.-365с.

Основная литература-3

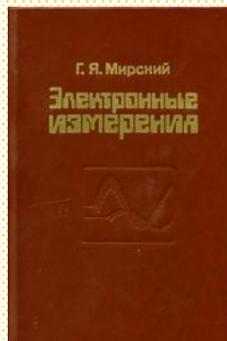
“Основы метрологии и радиоизмерений”



Метрология, стандартизация и технические измерения: Учеб. для вузов/А.С. Сигов, В.И.Нефедов. - М.: Высш. шк., 2008 – 624с.



Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г.
Электрорадиоизмерения. - М.: Высшая школа.,
1986. -351с



Мирский Г.З. Электронные измерения. -
М.: Радио и связь, 1986.- 440с

Дополнительная литература

1. Измерения в электронике. Справочник /Под ред. В.А. Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512с.
2. Афонский А. А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: СОЛОН_ПРЕСС, 2007.- 544с.
3. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2009. —384 с.
4. Захаров И.П., Павленко Ю.Ф. Эталоны в области электрорадиоизмерений. Справочное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008.-192 с.

Интернет-ресурсы

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

<http://www.tor.eltech.ru:8000/edu/bachelor/omri>

Экзаменационные вопросы (34 шт) по дисциплине «Основы метрологии и радиоизмерений» 2023г.

1. Основные понятия метрологии. Классификация измерений и средств измерений. Принципы и методы измерений.
2. Характеристики средств измерений. Структурные схемы средств измерений. Особенности измерений в радиоэлектронике. Измерительные сигналы.
3. Эталоны и меры, используемые в радиоизмерениях. Измерительные преобразователи и отсчетные устройства.

4. Общие понятия о погрешностях измерений, их классификация. Систематические погрешности, методы их уменьшения.
5. Метрологические характеристики средств измерения, их нормирование. Класс точности, интервальная оценка допускаемой погрешности.
6. Случайные погрешности и их описание. Законы распределения и их параметры.
7. Прямые однократные и многократные измерения и их погрешности. Алгоритм их оценки. Погрешности косвенных измерений.

Экзаменационные вопросы -2

8. Классификация электромеханических измерительных приборов и преобразователей. Принципы их работы, конструкция общих узлов.
 9. Магнитоэлектрические измерительные приборы. Принцип действия, измерение токов и напряжений.
 10. Электродинамические измерительные приборы. Принцип действия, измерение токов, напряжений и мощности.
 11. Электромагнитные и электростатические измерительные приборы. Принцип действия. Особенности измерения токов и напряжений.
-
12. Параметры измеряемых напряжений. Классификация вольтметров. Их параметры и структурные схемы. Вольтметры постоянного тока.
 13. Измерение средневыпрямленных значений напряжений.
 14. Измерение среднеквадратических значений напряжений сигналов произвольной формы.
 15. Измерение амплитудных значений напряжений импульсных и ВЧ сигналов.
 16. Цифровые вольтметры, принцип работы, структурная схема и параметры

Экзаменационные вопросы -3

17. Классификация осциллографов. Электронно-лучевая трубка осциллографа и ее характеристики. Принцип действия электронно-лучевого осциллографа.
 18. Виды разверток. Режимы работы генератора развертки осциллографа и их назначение. Синхронизация и запуск осциллографа, режимы синхронизации.
 19. Структурная схема универсального осциллографа – канал Y. Двухлучевой и двухканальный осциллографы.
 20. Структурная схема универсального осциллографа – каналы X и Z.
 21. Основные характеристики и параметры осциллографов. Измерение напряжения и временных интервалов методом калиброванных шкал.
-
22. Измерение фазового сдвига. Осциллографические методы измерения фазового сдвига.
 23. Компенсационный метод измерения фазового сдвига (нулевой метод). Калиброванные фазовращатели. Фазовый детектор.
 24. Фазометры с преобразованием фазового сдвига в напряжение.

Экзаменационные вопросы -4

25. Измерение частоты осциллографическим и гетеродинным методами. Погрешности методов.

26. Измерение частоты резонансным методом. Метод дискретного счета и его использование для измерения частоты в ЭСЧ.

27. Классификация измерительных генераторов. Генераторы низкой частоты. Структурная схема, характеристики и параметры.

28. Генераторы высокой частоты. Структурная схема, характеристики и параметры.

29. Импульсные генераторы. Функциональные генераторы сигналов сложной формы. Структурные схемы, характеристики и параметры.

30. Измерение активных сопротивлений методом амперметра-вольтметра. Электронные омметры с операционным усилителем.

31. Мостовые методы измерения параметров компонентов цепей. Четырехплечие измерительные мосты для измерения R, L, C.

32. Трансформаторные мосты, их использование для измерения полных сопротивлений.

33. Цифровые методы измерения полных сопротивлений с преобразованием $Z \rightarrow U$.

34. Измерение АЧХ. Метод измерения АЧХ по точкам, погрешности метода. .

**Контрольные вопросы для тестирования и самоподготовки
по дисциплине «Основы метрологии и радиоизмерений»
2023г.**

Общие вопросы измерений. Метрология

1. Дайте определение понятию ИЗМЕРЕНИЕ. Чем измерение отличается от других способов определения значений физических величин?
2. Что такое ТОЧНОСТЬ измерения? Как ее выразит количественно?
3. Чем отличается МЕТОД измерения от ПРИНЦИПА измерения?
4. Что такое СРЕДСТВО измерения? Какие основные свойства средства измерения отличают его от других средств, используемых в науке и технике?
5. Как классифицируют методы измерений по точности? В каких случаях применяют те или иные методы?
6. Что такое ПОКАЗАНИЕ средства измерений? Когда оно не является окончательным результатом измерения?
7. Как классифицируют измерения по методу получения результата (по виду уравнения измерения)?
8. Как классифицируют измерения по количеству наблюдений? По форме выражения результата?
9. Какие основные этапы измерений можно выделить? Какие задачи решают на каждом этапе?

10. Чем отличаются технические (рабочие) измерения от эталонных и контрольно-поверочных?
11. Что такое ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ РАДИОСИГНАЛ? Какими параметрами его характеризуют?
12. Какие виды ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ используются в радиоизмерительной технике? Что такое МОДУЛЯЦИЯ радиосигнала?
13. Что такое ИМПУЛЬС как вид измерительного сигнала? Какими параметрами его характеризуют?
14. Укажите параметры реального импульса, близкого по форме к прямоугольному.
15. Что такое СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ напряжения (тока)?
16. Что такое СРЕДНЕВЫПРЯМЛЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ напряжения (тока)?
17. Что такое СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ напряжения (тока)?
18. Что такое АМПЛИТУДНОЕ ЗНАЧЕНИЕ напряжения (тока)?
19. Укажите первичные (элементарные) средства измерений и их назначение.
20. Как классифицируют средства измерений по точности ? по способу управления?
21. Для какой цели применяют эталоны и меры? Чем мера отличается от эталона?
22. Что такое измерительный преобразователь? В чем состоит отличие измерительного преобразователя от измерительного прибора?

23. Что такое отсчетное устройство как средство измерения? Какие характеристики и параметры измерений оно определяет?
24. Что такое измерительный прибор? Какие первичные средства измерений входят в его состав?
25. Что такое измерительная установка (стенд) и чем она отличается от измерительного прибора?
26. Дайте определение ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ. Чем измерительная система отличается от измерительной установки?
27. Перечислите основные обобщенные характеристики средств измерений. Что такое ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ средств измерений?
28. Чем отличаются ПОРОГ РЕАГИРОВАНИЯ от чувствительности средства измерения?
29. Что такое ВАРИАЦИЯ ПОКАЗАНИЙ средства измерения?
30. Что такое БЫСТРОДЕЙСТВИЕ средства измерения?
31. Что такое ДРЕЙФ НУЛЯ и СМЕЩЕНИЕ НУЛЯ средства измерения? Какой вид погрешности характеризует этот параметр?
32. Какие метрологические характеристики используют для оценки точности средств измерений?
33. Перечислите основные ОСОБЕННОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ по сравнению с электротехническими измерениями?
34. Укажите основные ЭТАЛОНЫ радиотехнических величин (напряжения, частоты, емкости и др.).

35. Укажите основные МЕРЫ радиотехнических величин (напряжения, частоты, емкости и др.).
36. Укажите основные виды ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ уровня и формы измерительных сигналов.
37. Укажите основные виды ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ частоты и вида измерительных сигналов.
38. Какими параметрами описывают свойства ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ?
39. Приведите классификацию общих методов измерения. Какие методы измерений по этой классификации более точные?
40. Что такое метод СОВПАДЕНИЯ? Какой обобщенной схеме средства измерения он соответствует?
41. Что такое метод ЗАМЕЩЕНИЯ? Какой обобщенной схеме средства измерения он соответствует?
42. Что такое метод УРАВНОВЕШИВАНИЯ? Какой обобщенной схеме средства измерения он соответствует?
43. В чем преимущество методов сравнения с мерой относительно метода непосредственной оценки?
44. Чем отличается метод уравнивания от метода замещения? В чем преимущества первого метода?

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

45. Как делят погрешности по форме выражения?
46. Что такое ПРИВЕДЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ средства измерения? Чем она отличается от относительной погрешности?
47. Что такое МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ измерения? Какие причины ее вызывают?
48. Чем отличаются ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ (аппаратная) и МЕТОДИЧЕСКАЯ погрешности?
49. Что такое СУБЪЕКТИВНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ измерения? Какие способы применяют для ее исключения?
50. Что такое ОСНОВНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ средства измерения? В чем ее отличие от дополнительной?
51. Дайте понятие СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ измерения. Чем она отличается от случайной погрешности?
52. Дайте определение СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ измерения. Какие методы применяют для ее описания?
53. Что такое ГРУБАЯ погрешность измерения (промах)? Какие методы применяют для ее исключения?
54. Что такое КЛАСС ТОЧНОСТИ средства измерения? Как он выражается для аналоговых (стрелочных) измерительных приборов?
55. Что такое КЛАСС ТОЧНОСТИ для цифрового средства измерения? Как он выражается для цифровых измерительных приборов?

56. Какие методы используются при исключении систематических погрешностей?
57. Чем отличается исключение систематической погрешности калибровкой от способа введения поправок (поправочных множителей)?
58. Какие стандартные законы распределения случайной величины используют для описания случайных погрешностей? Какими параметрами их описывают?
59. Что такое НОРМАЛЬНЫЙ (Гауссов) закон распределения случайной погрешности? Для каких случаев он наиболее пригоден?
60. Как рассчитать вероятность попадания случайной погрешности в заданный интервал при гауссовом законе распределения?
61. Что такое "правило трех сигм", используемое для оценки случайных погрешностей? Какой параметр средства измерения оценивают с его помощью?
62. Что такое ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА погрешности? Чем она отличается от предельной (точечной) и в каких случаях используется?
63. Укажите основные блоки алгоритма статистической обработки результатов измерения.
64. Каким образом проводят оценку закона распределения случайной погрешности при статистической обработке результатов измерения?
65. Как производят оценку среднеквадратического отклонения при статистической обработке результатов измерений?
66. Что такое "доверительный интервал" и "доверительная вероятность", используемые при оценке случайных погрешностей?

67. В каких случаях используют коэффициенты Стьюдента при статистической обработке результатов измерений?
68. Каким образом производят расчет погрешностей косвенных измерений?

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

69. Что такое «значение» напряжения (тока)? Как различаются вольтметры по измеряемому значению напряжения?
70. Что такое КОЭФФИЦИЕНТ АМПЛИТУДЫ?
71. Что такое КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ?
72. Почему измерение напряжения несинусоидальной формы вольтметром средневыпрямленного значения имеет систематическую погрешность градуировки?
73. В чем преимущество электронных вольтметров перед электромеханическими?
74. Укажите основные параметры вольтметров. Как задают РАБОЧУЮ ПОЛОСУ частот вольтметров переменного тока?
75. Как в вольтметрах производят деление всего рабочего диапазона напряжений на поддиапазоны?
76. Почему конечное входное сопротивление вольтметра вносит погрешность в результаты измерения? Каков характер этой погрешности?
77. Почему применение выносного делителя (пробника) приводит к уменьшению влияния вольтметра на результаты измерения?

78. Каков принцип действия электромеханических измерительных приборов?
79. Какова структурная схема электромеханических измерительных приборов?
80. Какие измерительные преобразователи используют совместно с измерительным механизмом?
81. Что такое ШУНТ электромеханического измерительного прибора? Как его рассчитать, исходя из требуемого увеличения предела измерения тока в N раз?
82. Что такое ДОБАВОЧНЫЙ РЕЗИСТОР (сопротивление), применяемый в составе электромеханических измерительных приборов? Для какой цели его используют?
83. Как устроены отсчетные устройства электромеханических измерительных приборов?
84. Запишите ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ электромеханического измерительного прибора, связывающего угол поворота подвижной части с изменением запасенной энергии.
85. Каков принцип действия МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО измерительного механизма? Запишите уравнение, связывающего угол поворота с измеряемым током.
86. Укажите основные свойства магнитоэлектрического измерительного прибора (положительные и отрицательные).
87. Укажите область применения магнитоэлектрических измерительных приборов.

88. Каков принцип действия ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО измерительного механизма? Запишите уравнение, связывающего угол поворота с измеряемым током.
89. Укажите основные свойства электродинамического измерительного прибора (положительные и отрицательные).
90. Укажите область применения электродинамических измерительных приборов.
91. Каков принцип действия ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО измерительных механизмов? Запишите уравнение, связывающего угол поворота с измеряемым током (напряжением).
92. Укажите основные свойства электромагнитного и электростатического измерительных приборов (положительные и отрицательные).
93. Укажите область применения электромагнитных и электростатических измерительных приборов.
94. Какие узлы входят в состав электронного ВОЛЬТМЕТРА ПОСТОЯННОГО ТОКА? Какие требования предъявляются к их параметрам?
95. Как устроен электронный ВОЛЬТМЕТР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (типа ВЗ)? В каких единицах градуируют его шкалу?
96. Как устроен детектор СРЕДНЕВЫПРЯМЛЕННЫХ значений? Какие требования предъявляются к его элементам?
97. Какими причинами ограничена чувствительность детектора средневывпрямленных значений?

98. Для какой цели в детекторе СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ значений используют диодную функциональную схему?
99. Какие функциональные преобразования необходимо реализовать в детекторе среднеквадратических значений? Как они реализованы в детекторе с термоэлектрическим преобразователем?
100. В чем отличие АМПЛИТУДНЫХ детекторов с «открытым» и «закрытым» входом? Почему в импульсных вольтметрах (типа В4) применяют детекторы с «закрытым» входом?
101. В чем причина появления НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ амплитудного (импульсного) вольтметра?
102. Почему амплитудный (импульсный) вольтметр имеет погрешность при малой скважности входных импульсов?
103. Почему ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ строят по схеме «детектор–усилитель», а не «усилитель–детектор»?
104. По какой причине чувствительность амплитудных вольтметров невелика (доли вольта)? Почему увеличение чувствительности вызывает затруднения?

ОСЦИЛЛОГРАФ

105. Какие типы осциллографов используются в измерительной технике? Укажите области их применения.
106. Какие ВИДЫ РАЗВЕРТОК применяются в универсальном осциллографе? Какая развертка является основной?

- 107.Что такое непрерывная развертка? При каком условии при непрерывной развертке можно наблюдать неподвижную осциллограмму?
- 108.Каковы причины использования ждущей развертки? В каких случаях ее применение совершенно необходимо?
- 109.Почему при наблюдении импульсов большой скважности применение непрерывной развертки не позволяет получить удобный масштаб осциллограммы?
- 110.Каково назначение ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА канала Y универсального осциллографа?
- 111.Для чего используется КАЛИБРОВАННЫЙ АТТЕНЮАТОР канала Y? В каких единицах градуирован его переключатель?
- 112.Каковы функции ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ канала Y универсального осциллографа?
- 113.Почему в канале Y универсального осциллографа используют не один, а два усилителя – предварительный и окончательный?
- 114.Какие задачи выполняет ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ в канале Y осциллографа? Для какого режима синхронизации осциллографа ее присутствие актуально?
- 115.Что такое КОЭФФИЦИЕНТ ОТКЛОНЕНИЯ осциллографа? Как устанавливают необходимое значение этого параметра?
- 116.Какие функции выполняет УСТРОЙСТВО СИНХРОНИЗАЦИИ И ЗАПУСКА осциллографа?

117. Укажите режимы работы устройства синхронизации и запуска осциллографа. Что такое “синхронизация от сети”?
118. В каких случаях применяют внутреннюю, а в каких случаях - внешнюю синхронизации?
119. Что такое КОЭФФИЦИЕНТ РАЗВЕРТКИ осциллографа? Как устанавливают необходимое значение этого параметра?
120. Какие требования предъявляют к генератору развертки осциллографа? Как от его параметров зависит точность осциллографических измерений?
121. Какие функции выполняет оконечный усилитель канала X универсального осциллографа? Что такое РЕЖИМ «РАСТЯЖКИ»?
122. Каким образом в универсальном осциллографе осуществляют гашение изображения обратного хода луча? Какой канал для этого используется?
123. Чем отличаются двухлучевой и двухканальный осциллографы? Укажите достоинства и недостатки этих осциллографов.
124. Какие ПАРАМЕТРЫ КАНАЛА Y универсального осциллографа характеризуют его быстродействие?
125. Дайте определение ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ осциллографа? Какими параметрами ее описывают?
126. Дайте определение АЧХ осциллографа? Какими параметрами ее описывают?
127. Какие ПАРАМЕТРЫ КАНАЛА X характеризуют точность измерения временных интервалов?

128.Что такое МЕТОД КАЛИБРОВАННЫХ ШКАЛ? При каких условиях можно применять этот метод в осциллографических измерениях?

129.Что такое КАЛИБРОВКА осциллографа? Опишите ее методику.

130.Что такое калибратор осциллографа? Какие виды сигналов выработывает калибратор? Для чего его используют?

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

131.Что такое «фазовый сдвиг» двух сигналов? Как он связан с их временным сдвигом?

132.Опишите ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ метод измерения фазового сдвига на экране двухканального осциллографа, его достоинства и недостатки, причины появления погрешностей.

133.Опишите осциллографический метод измерения фазового сдвига (МЕТОД “ЭЛЛИПСА ”), его достоинства и недостатки, причины появления погрешностей.

134.Опишите КОМПЕНСАЦИОННЫЙ метод измерения фазового сдвига, область его применения, достоинства и недостатки. Что такое «калиброванный фазовращатель», используемый в данном методе?

135.Какие нуль-индикаторы применяют в компенсационном методе измерения фазового сдвига? Что такое фазовый детектор?

136.Как строят фазометр с преобразованием фазового сдвига в напряжение?

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

137. Что такое «долговременная» и «кратковременная» нестабильности частоты? В чем отличие методов их измерения?
138. Укажите классификацию методов измерения частоты сигналов. Какие методы являются наиболее точными?
139. Как измеряют частоту ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ (метод «фигур Лиссажу»)? Почему его сложно использовать на высоких частотах?
140. Как строят частотомеры на основе ГЕТЕРОДИННОГО МЕТОДА сравнения частот? Для чего в них используют акустический контроль на наушниках?
141. Как используют РЕЗОНАНСНЫЙ способ для измерения частоты на ВЧ и СВЧ?
142. Опишите принцип, положенный в основу МЕТОДА ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА. Чем определяется его потенциальная точность?
143. Из каких соображений выбирают частоту кварцевого генератора электронно-счетного частотомера и коэффициент делителя частоты?
144. Чем определяется частотный диапазон измерения в методе дискретного счета? Какие причины ограничивают его снизу и сверху?

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

145. Что такое «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР»? Чем он отличается от других источников сигналов?
146. Как классифицируются измерительные генераторы?

147. Генераторы НИЗКОЙ частоты, принципы построения. Структурная схема генератора.
148. Генераторы ВЫСОКОЙ частоты, принципы построения Структурная схема генератора.
149. Укажите основные характеристики генераторов высокой частоты. Какие режимы модуляции в них предусматривают?
150. Генераторы ИМПУЛЬСОВ, структурная схема и основные характеристики.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ RLC

151. Дайте определение комплексного сопротивления (ИМПЕДАНСА) компонента цепи. Какие параметры компонентов измеряют?
152. Что такое метод ВОЛЬТМЕТРА–АМПЕРМЕТРА (метод омметра)?
153. Как строят ЭЛЕКТРОННЫЕ ОММЕТРЫ для измерения активных сопротивлений?
154. Опишите МОСТОВОЙ МЕТОД измерения комплексных сопротивлений компонентов (четырёхплечий мост или мост Уинстона).
155. Опишите ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ МОСТОВОЙ МЕТОД измерения параметров RLC. В чем его преимущество по сравнению с четырёхплечим мостом?
156. Как измеряют импеданс компонентов методом ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В НАПРЯЖЕНИЕ?

ИЗМЕРЕНИЕ АЧХ

157.Что такое “АЧХ цепи”? Какие условия надо выполнить при ее измерении?

158.Опишите метод измерения АЧХ с помощью ГЕНЕРАТОРА И ВОЛЬТМЕТРА (измерение «по точкам»).

159.Перечислите требования к генератору и вольтметру, которые используются при измерении АЧХ в дискретных точках.

160.Укажите ПОГРЕШНОСТИ метода измерения АЧХ с помощью генератора и вольтметра.

161.Как реализуют ПАНОРАМНЫЙ МЕТОД измерения АЧХ радиоэлектронных устройств. Приведите структурную схему измерителя АЧХ.

162.Укажите условия неискаженного воспроизведения формы АЧХ на экране измерителя панорамного типа.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

***Общие вопросы измерений.
Метрология***

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Основные понятия и определения-1

ГОСТ 16263-70, РМГ29-2013 ГСИ «Метрология. Термины и определения»

Метрология	<p>- наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Метрология в переводе с древнегреческого (Metron -«μετρον» - мера, logos - «λογος» - учение) означает учение о мерах.</p>
Физическая величина	<p>- качественно общее, но количественно различное свойство объектов окружающего мира.</p>
Измерение	<p>- нахождение значения физической величины <u>опытным</u> путем с помощью специальных <u>технических средств</u> методом сравнения с <u>общепринятыми единицами (ГОСТ 16263–70)</u></p> <p>- <u>Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины (РМГ 29-2013 ГСИ).</u></p>

Основные понятия и определения-2

Истинное значение физической величины	- значение физической величины - идеал, к которому надо стремиться при проведении измерений.
Действительное значение физической величины	- значение, настолько приближающееся к истинному значению, что может быть использовано вместо него.
Единство измерений	- свойство измерения, если результаты выражаются в общепринятых единицах и указана их точность
Точность измерений	- качество измерения, отражающее близость его результатов к истинному значению измеряемой величины. Количественно выражается ПОГРЕШНОСТЬЮ
Погрешность измерения	- отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям!!

Основные понятия и определения-3

Принцип измерения	- совокупность физических или других явлений, на которых основано данное измерение.
Метод измерения	- совокупность приемов использования принципов и средств измерений (алгоритм измерения).
Цель измерения	- совокупность требований к измерению и его результатам, определяемых конкретной задачей.
Объект измерения	-реальный объект природной или техногенной среды, который исследуется в процессе измерений
Модель объекта измерения	- представление объекта, которое строится на основе априорной информации об реальном объекте и отражает только существенные для измерения свойства

Основные понятия и определения-4

Средство измерений (СИ)	- техническое средство, используемое при измерениях и имеющее <u>нормированные метрологические</u> характеристики (оказывающие влияние на результат и погрешность измерения)
Условия измерения	- параметры окружающей среды, питающих напряжений и пр., влияющие на средства измерения и - поэтому - на результаты измерения и его точность
Уравнение измерения	- функция, связывающая измеряемую величину и результат измерения (опытные данные или конечный результат). Например, градуировочная характеристика
Показание средства измерений	- значение измеряемой величины, определяемое по отсчетному устройству средства измерений и выраженное в принятых единицах этой величины.
Система единиц	- Законодательно установленная система физических единиц, в которых выражаются результаты измерения.

МЕТРОЛОГИЯ

```
graph TD; A[МЕТРОЛОГИЯ] --> B[Основы метрологии как науки]; A --> C[Нормативная основа - стандарты, эталоны]; A --> D[Метрологические службы]; B --> E[Правовая основа - Госсистема единства измерения];
```

Основы
метрологии
как науки

Нормативная
основа-
стандарты,
эталонны

Метрологические
службы

Правовая основа - Госсистема
единства измерения

Классификация измерений-1

1. По виду измеряемой физической величины – измерения напряжения, тока, частоты и пр.
2. По виду уравнения измерения:
 - Прямые - опытные данные есть результат И.
 - Косвенные – опытные данные после обработки есть результат И.
 - Совместные – одновременное измерение нескольких неоднородных физических величин с целью определить их функциональную связь.
 - Совокупные – измерение нескольких одноименных физических величин в различных комбинациях. Позволяет улучшить точность измерения

Классификация измерений-2

3. По точности измерений:

- Эталонные И. – наивысшая точность, послеопытная оценка точности (апостериорная)
- Контрольно-поверочные – приближенная оценка точности в процессе И. Поверка рабочих средств И.
- Технические (рабочие) И. – априорная оценка точности, исходя их паспортных данных средств И. стандартные методы И.

4. По количеству опытов:

- Однократные И.
- Многократные И. – результат есть среднее от множества опытных данных

5. По временному режиму:

- Статические И.- результаты не зависят от времени
- Динамические И. – результаты И. меняются во времени

Классификация измерений-3

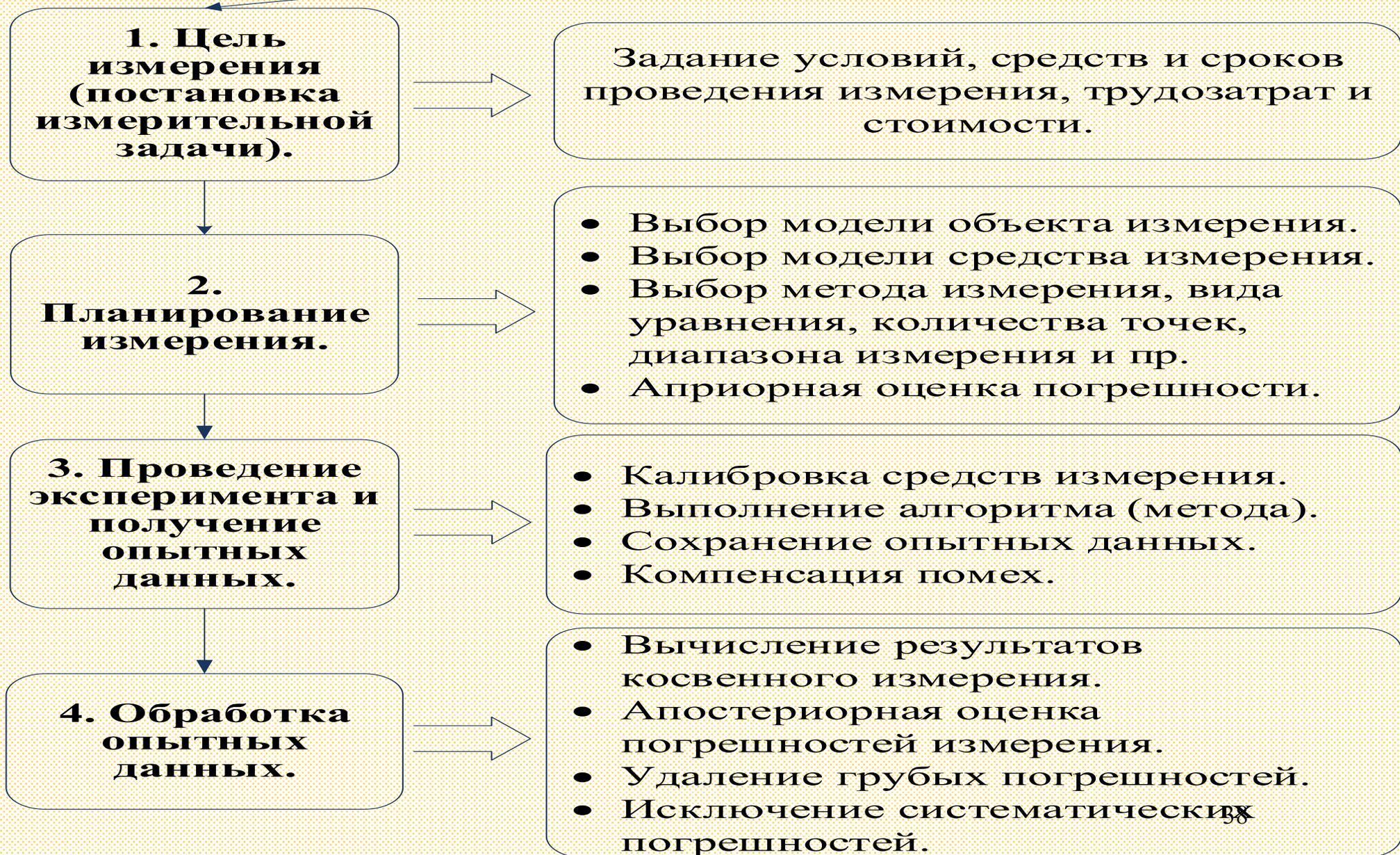
6. По форме выражения результата И.:

- Абсолютные – результат в системе единиц
- Относительные И. – выражается относительно заранее принятой условной единицы

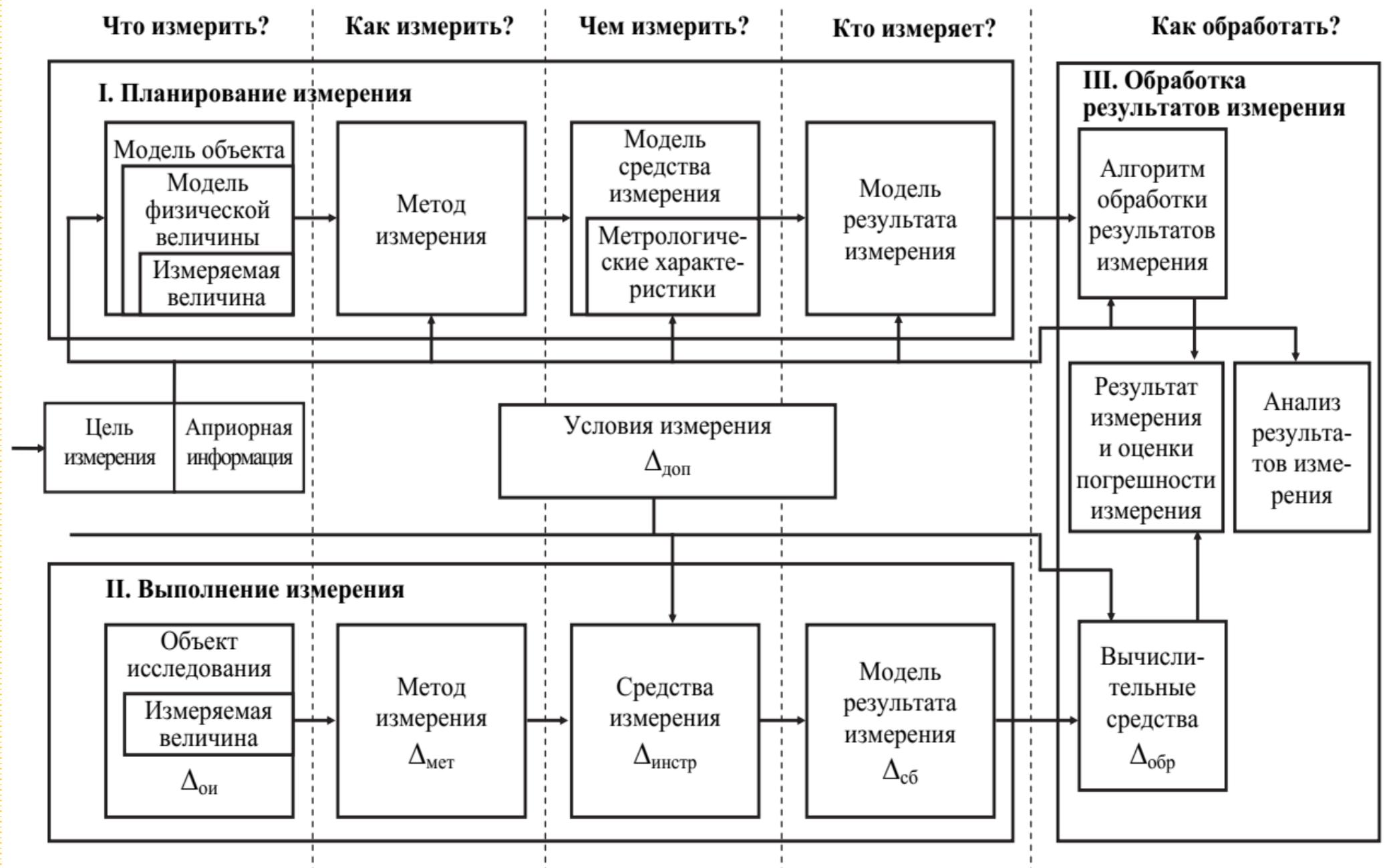
7. По зависимости точности от измеряемой величины:

- Равноточные И. – одинаковая точность в диапазоне измерений
- Неравноточные И. - имеют разную точность в пределах диапазона измеряемой величины

Основные этапы измерения



Полная структурная схема измерительного процесса



Выделение этапов И. позволяет *оценивать* результаты по отдельным стадиям и при необходимости *возвращаться* на предыдущий этап – вплоть до постановки новой измерительной задачи

Технические (рабочие) измерения используют стандартные методы и средства измерения (готовые методики и промышленные приборы с известными метрологическими параметрами).

Важно правильно сформировать *модель объекта измерения* на основе априорной информации. Неадекватная модель приводит к несоответствию результата И. и реальных свойств объекта. Приходится *переопределять* объект измерений, повторять выбор метода и средств измерений..

Измерительный сигнал – физический процесс во времени, отражающий информацию об исследуемом объекте. В радиоэлектронике чаще всего сигналом называют напряжение $u(t)$.

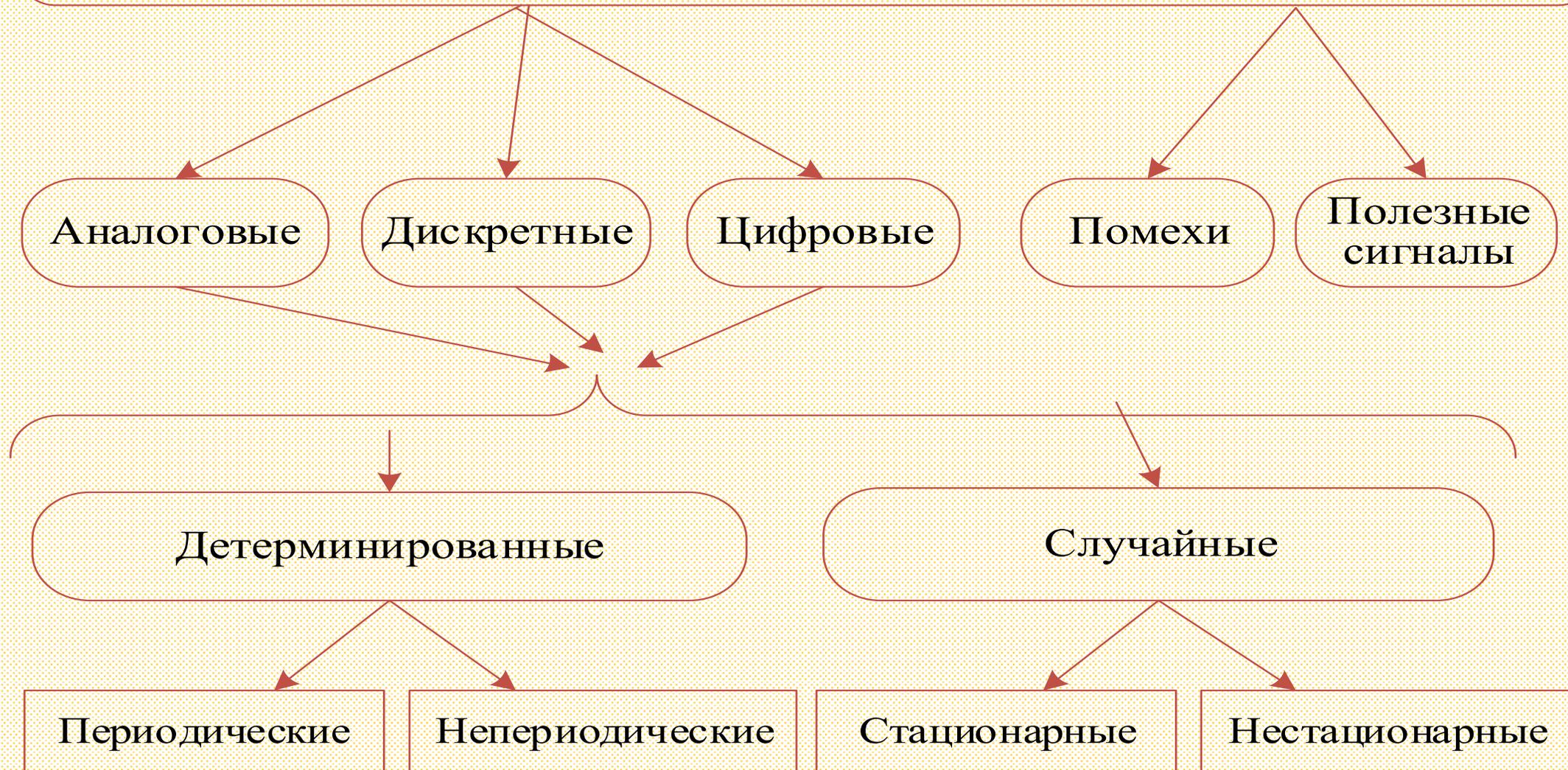
Термин "сигнал" происходит от слова signum (знак). Сигналы являются переносчиками знаков, образующих информационную основу (алфавит) передаваемых сообщений. Сигналы могут быть **входные** и **выходные, образцовые (испытательные)** и **измеряемые, детерминированные** и **случайные**.

Случайные – мгновенные значения неизвестны, могут быть **стационарными** – статистические свойства постоянны- и **нестационарными**.

Полезные измерительные сигналы – исследуемые, образцовые и пр.

Помехи – однородные с полезными, но являются мешающими, побочными. Могут быть аддитивными, мультипликативными и др.

Измерительные сигналы



Виды сигналов

```
graph TD; A[Виды сигналов] --> B[Непрерывные аналоговые сигналы]; A --> C[Дискретные сигналы]; A --> D[Цифровые сигналы];
```

Непрерывные аналоговые сигналы

Непрерывная функция
времени

Дискретные сигналы

Сигнал, полученный из
непрерывного
дискретизацией – взятием
выборки через интервал
времени

Цифровые сигналы

Дискретный сигнал,
квантованный по
уровню и
представляющий
собой
последовательность
числа (кодов уровня)

Представление сигналов

Временная функция $u(t)$

Спектральное представление $S(f)$ или ряд Фурье для периодических сигналов

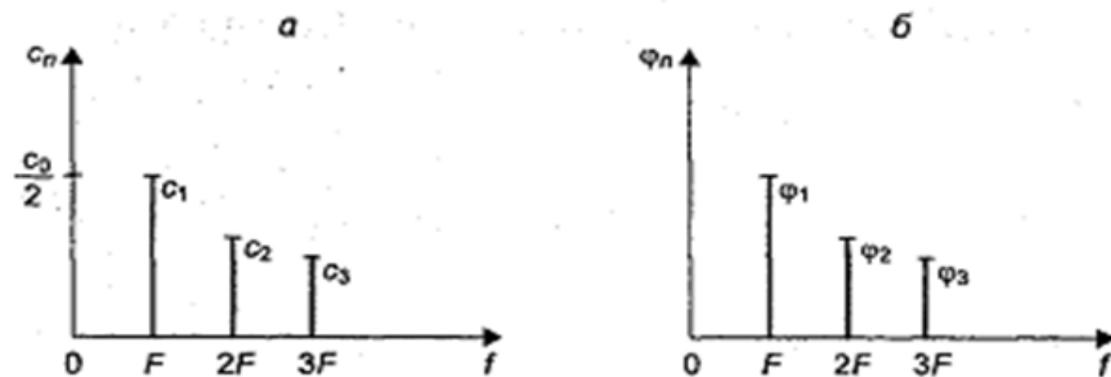
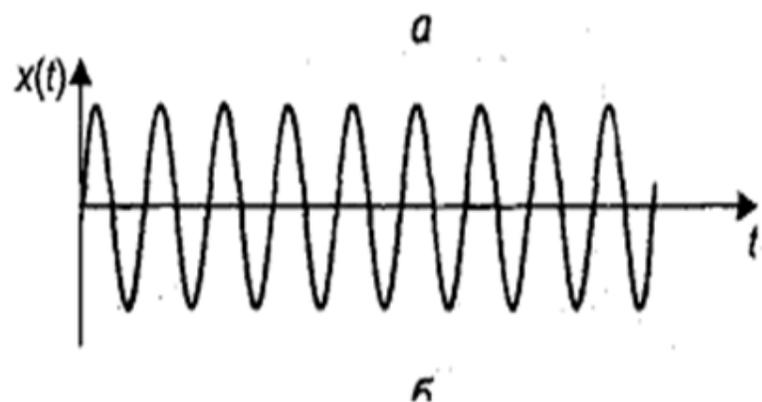
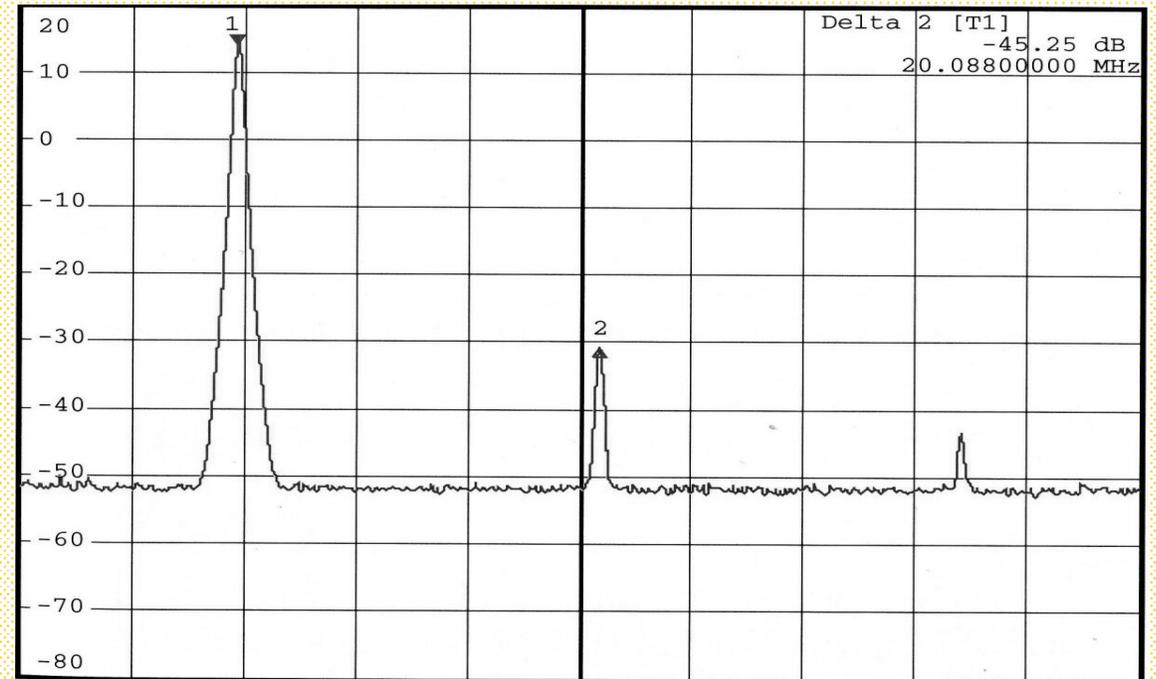
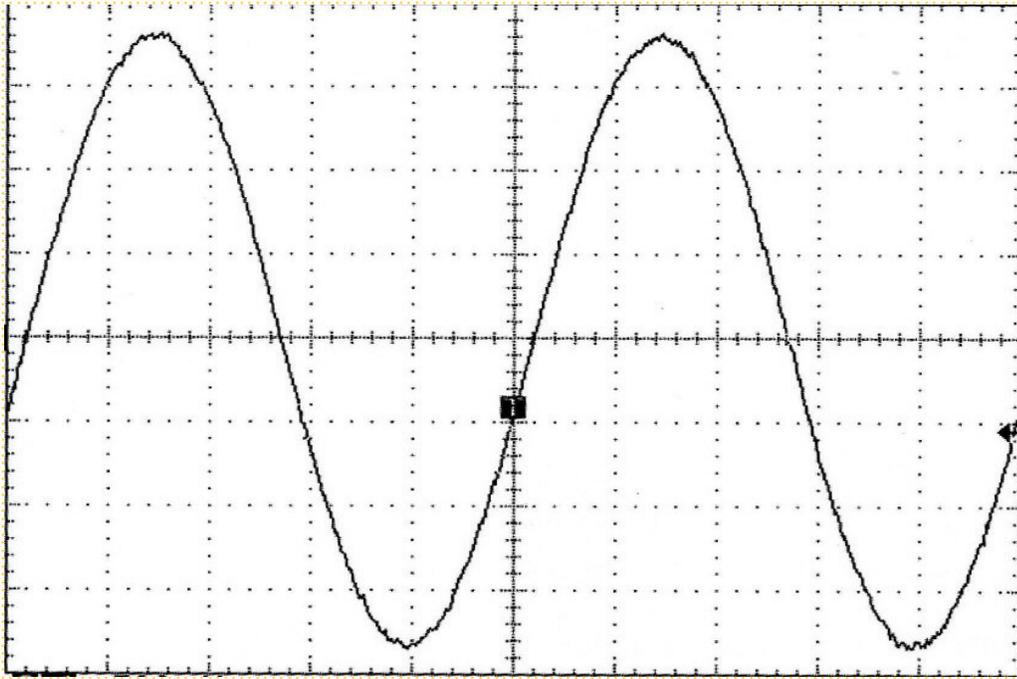


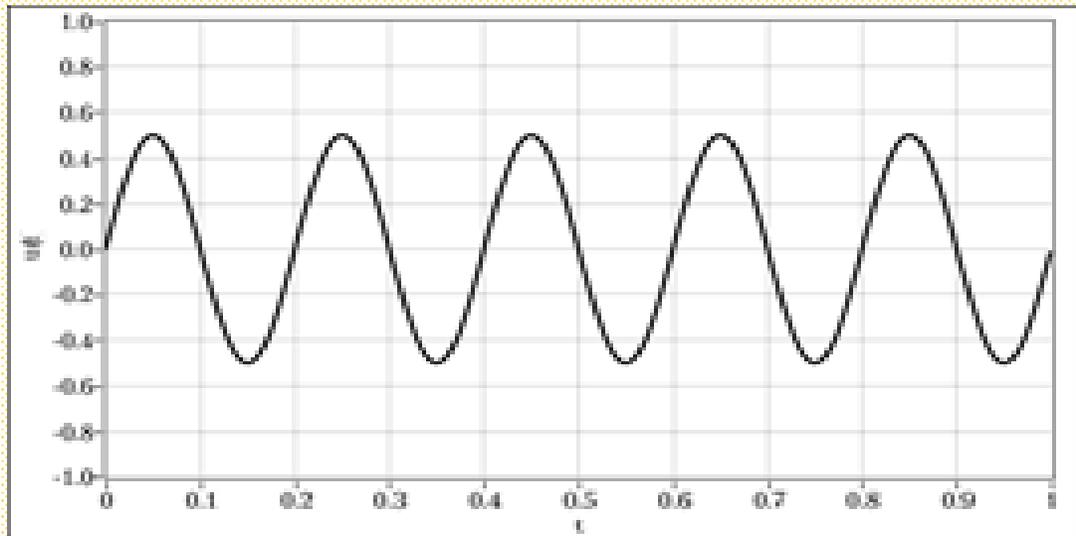
Рис. 3.1. АЧХ (а) и ФЧХ (б) периодического сигнала с периодом $T = 1/F$.



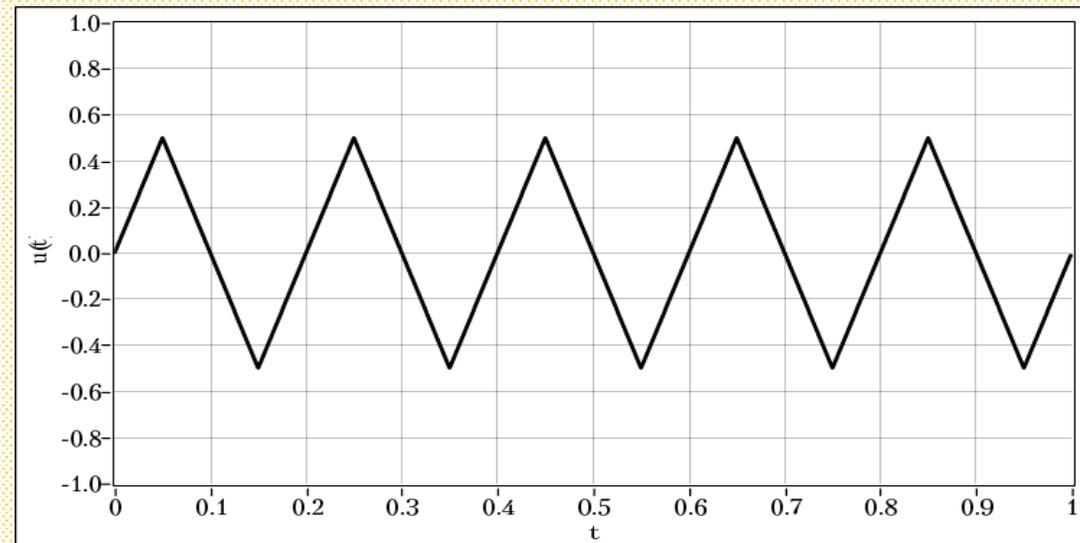
Реальная осциллограмма и спектрограмма сигнала

Сигналы делятся по виду временной зависимости:

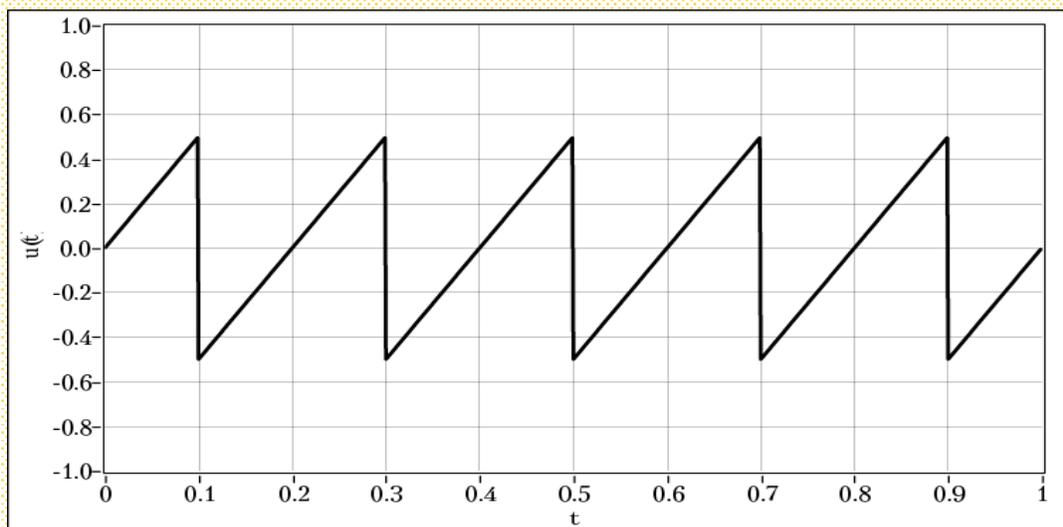
- Непрерывные (гладкие) сигналы
- Импульсные сигналы (большую часть периода равны нулю)
- Дискретные и цифровые сигналы (известны в отдельных точках)
- Модулированные сигналы (с медленно меняющимися параметрами)



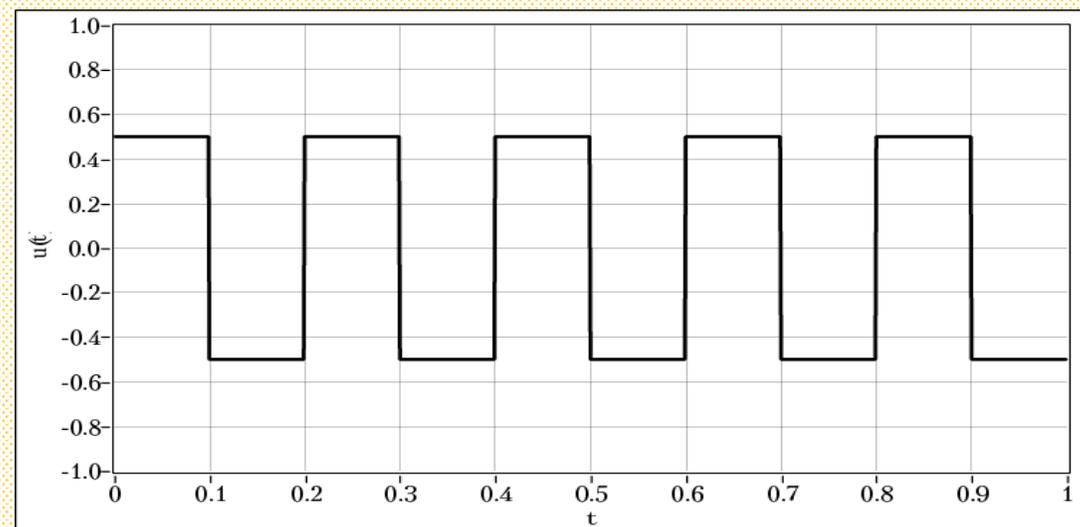
гармонический сигнал



треугольный сигнал

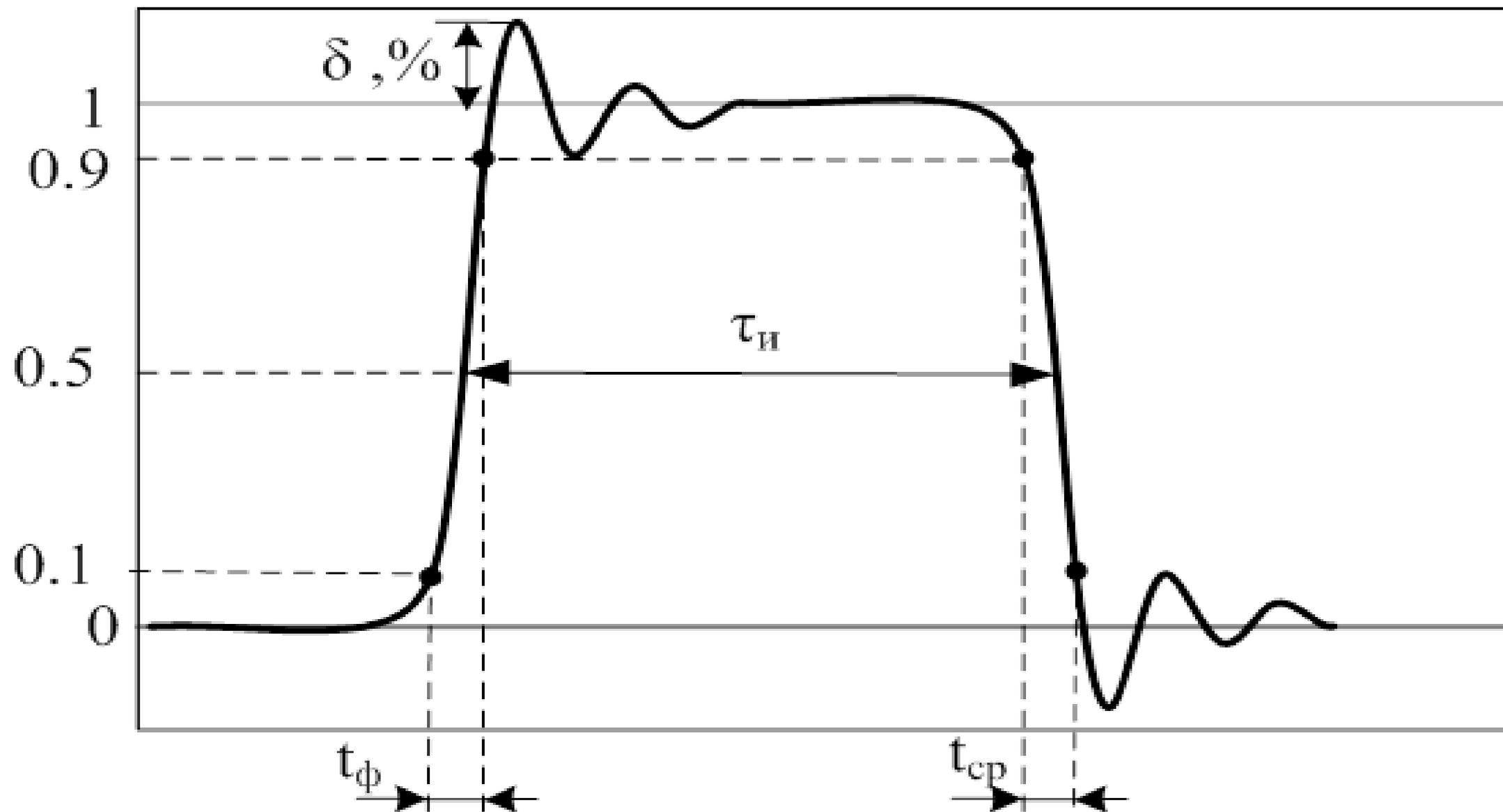


пилообразный сигнал



меандр

Прямоугольный импульс



Радиосигналы

В радиотехнике *модулированным* сигналом (**радиосигналом**) называют сигнал вида:

$$u(t) = U(t) \cdot \cos[\omega t + \varphi(t)] = \dots$$

$$\dots = U(t) \cdot \cos[2\pi f \cdot t + \varphi(t)] = U(t) \cos[\Phi(t)]$$

$U(t)$ – закон изменения амплитуды,

ω, f – несущая частота,

$\varphi(t)$ – закон изменения начальной фазы,

$\Phi(t)$ – полная фаза. Скорость изменения полной фазы принято называть мгновенной частотой радиосигнала.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = f + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

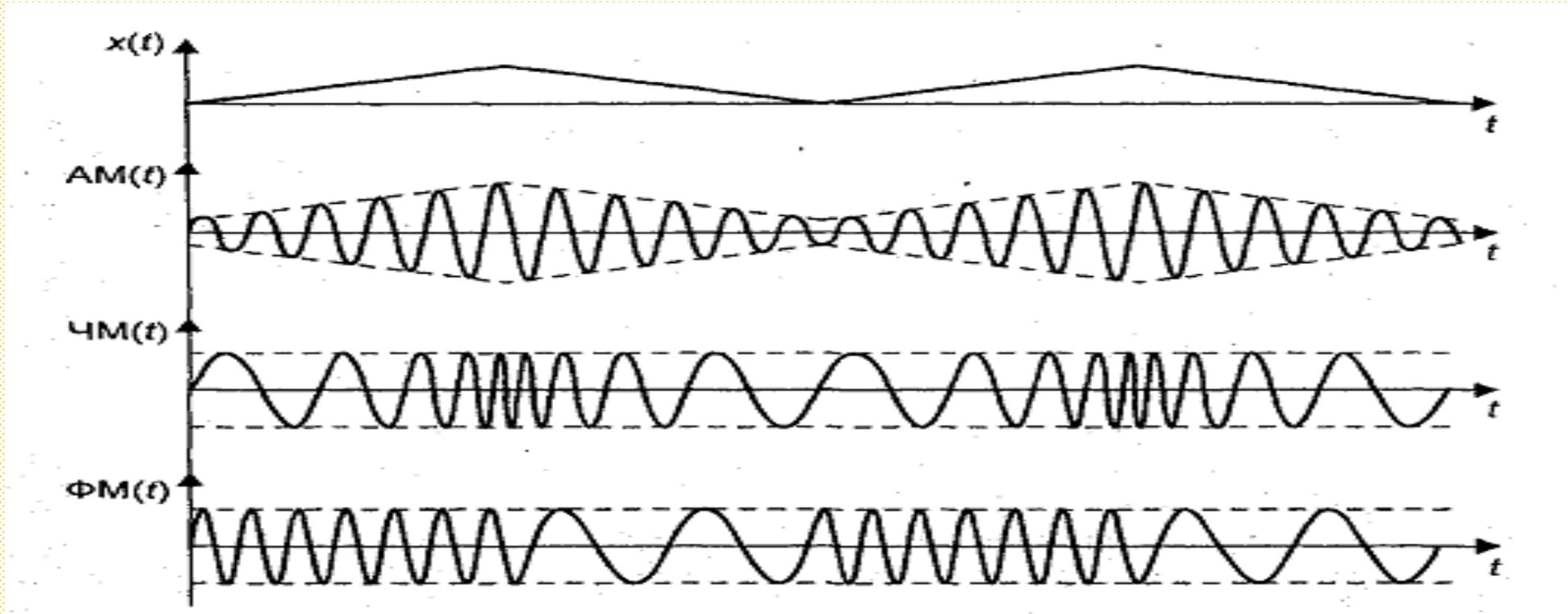
Виды модуляции радиосигналов-1

Амплитудная (АМ), частотная (ЧМ) и фазовая (ФМ)

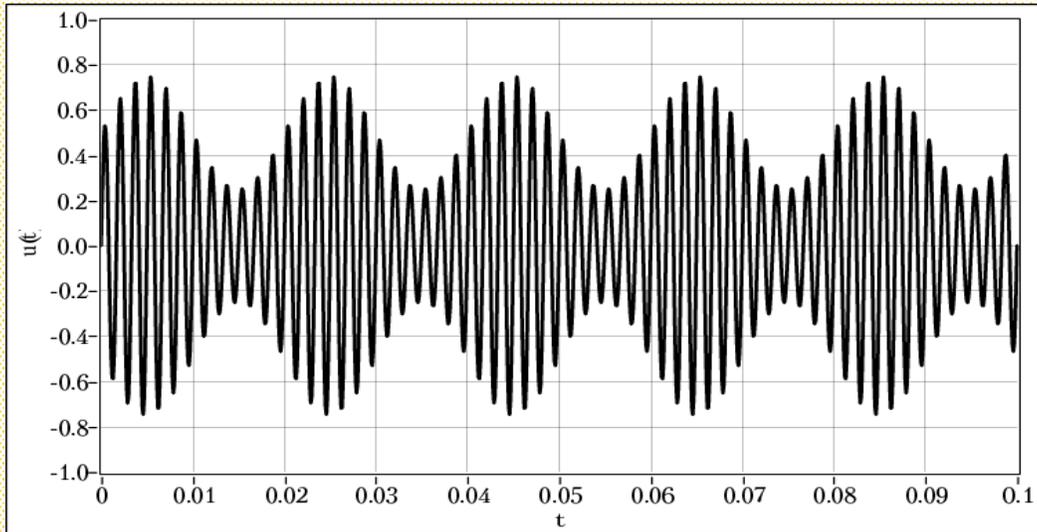
АМ: $U(t) = U_m(1 + m \cdot \cos(2\pi Ft + \theta)) \cos(2\pi ft + \varphi)$

ЧМ: $f(t) = f_0 + \Delta f \cdot \cos(2\pi F \cdot t + \theta)$

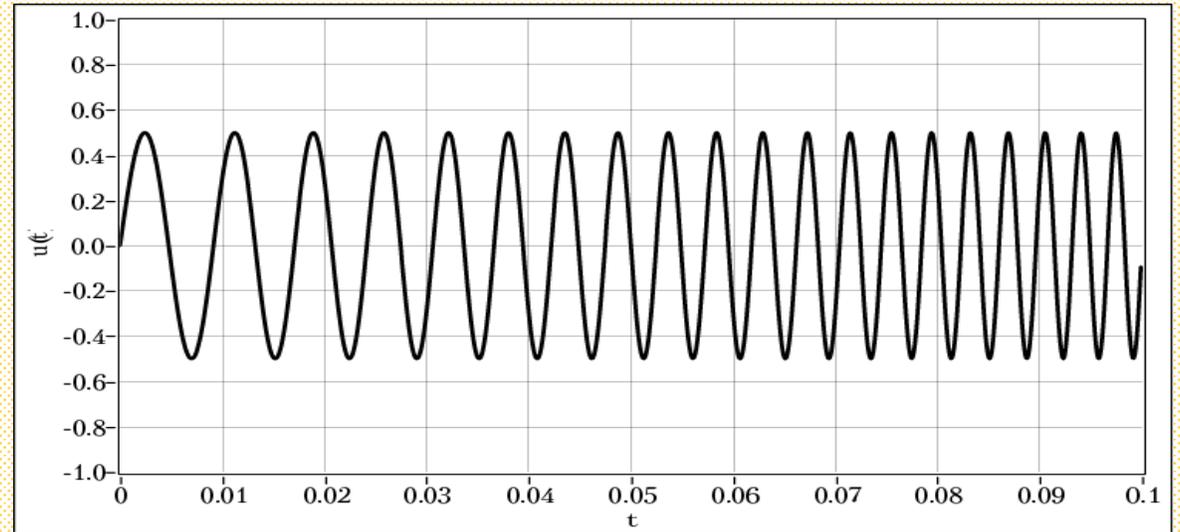
ФМ: $\Phi(t) = f_0 \cdot t + \beta \cdot \cos(2\pi F \cdot t + \theta)$



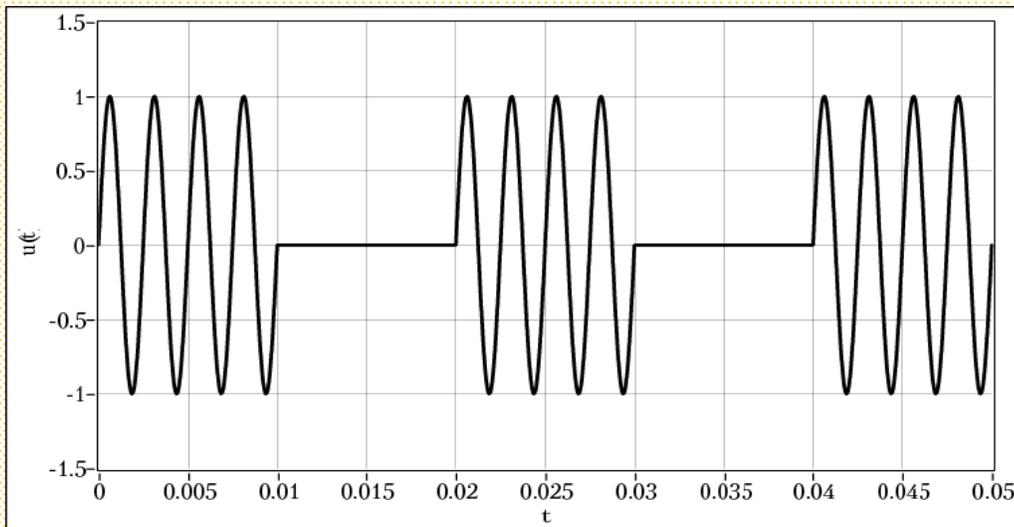
Виды модуляции радиосигналов-2



Амплитудная (АМ)

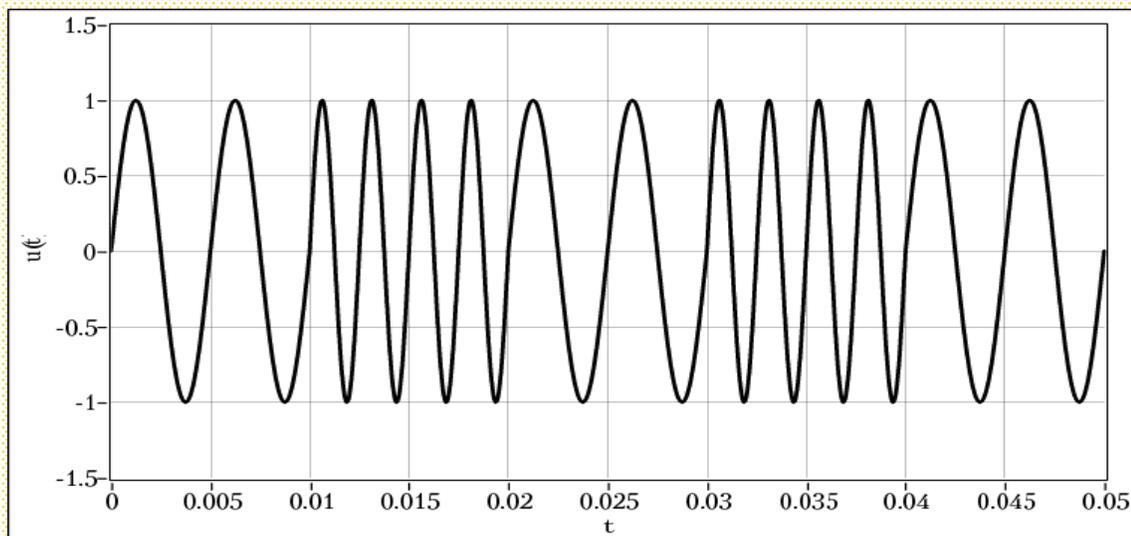


частотная (ЧМ)

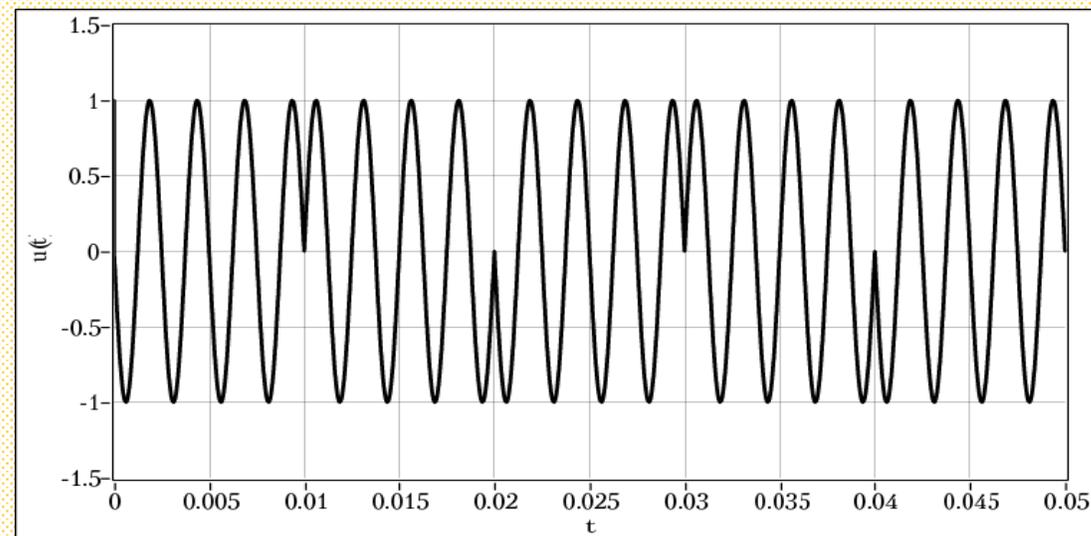


Амплитудная манипуляция

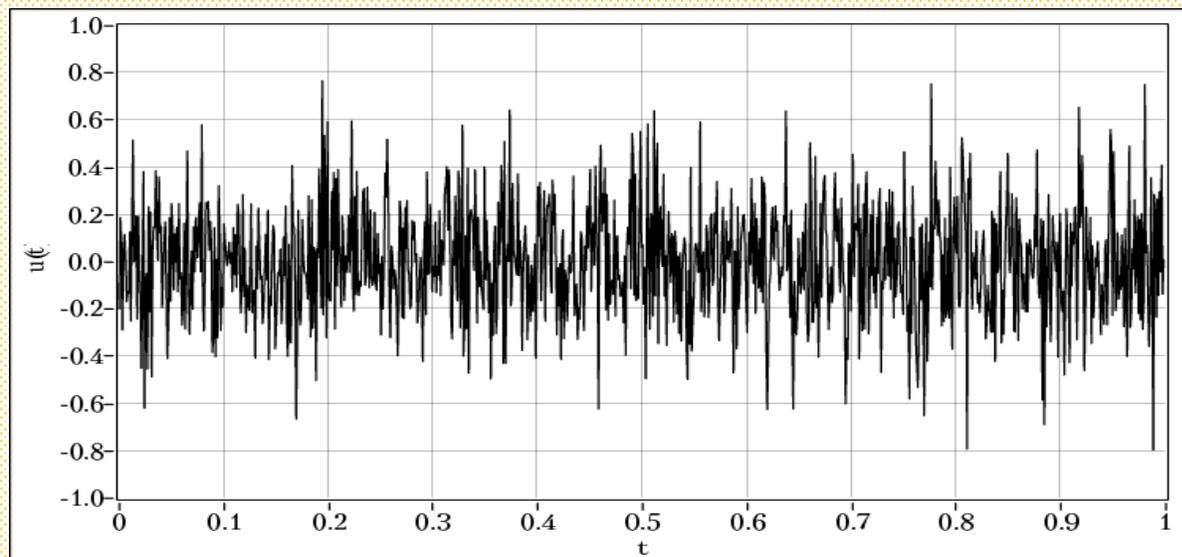
Виды модуляции радиосигналов-3



Частотная манипуляция



фазиимпульсная модуляция



Случайный (шумовой)
сигнал

Параметры измерительных сигналов-1

1. **Уровень сигнала** (напряжения, тока и пр.)

Среднее значение сигнала (**ПОСТОЯННАЯ составляющая**) определяется на интервале усреднения T (на периоде) как среднее значение $u(t)$:

$$U_{\text{cp}} = \bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Амплитудное (пиковое, максимальное) значение сигнала – наибольшее мгновенное значение напряжения за время измерения T :

$$U_{\text{m}} = U_{\text{пик}} = \max u(t) \Big|_{t \in [0, T]}$$

Минимальное значение сигнала – наименьшее мгновенное значение $u(t)$:

$$U_{\text{min}} = \min u(t) \Big|_{t \in [0, T]}$$

Параметры измерительных сигналов-2

Размах сигнала (U_{p-p} «пик-ту-пик:»)

$$U_{p-p} = U_{\max} - U_{\min}$$

Пиковые отклонения сигнала «вверх» и «вниз»

$$U_{m+} = U_{\max} - U_{cp} \quad U_{m-} = \left| U_{cp} - U_{\min} \right|$$

Средневыпрямленное значение сигнала – среднее значение модуля $u(t)$:

$$U_{cp.v.} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Параметры измерительных сигналов-3

Среднеквадратическое значение сигнала (root mean square – RMS) - корень из среднего значения квадрата временной зависимости сигнала

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Мощность сигнала - произведение мгновенных значений напряжения и тока (мгновенная мощность) на нагрузке 1 Ом:

$$p(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{1 \text{ Ом}}$$

Средняя мощность за заданный интервал T (за период):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{U^2}{1 [\text{Ом}]}$$

Параметры измерительных сигналов- 4

2. *Временные параметры сигнала:*

Период повторения T $u(t) = u(t \pm T)$

Частота повторения $f = 1/T = \omega / 2\pi, [Гц]$

Длительность сигнала τ (по определенному уровню, например 0.5 от максимума)

Временной сдвиг Δt - расстояние между однородными точками сигнала (например между фронтами импульсов).

Фазовый сдвиг $\Delta \varphi$ - временной сдвиг между гармоническими сигналами одной частоты, выраженный в долях периода 360 градусов. Он равен разности начальных фаз гармонических сигналов

Средства измерений

Элементарные
средства
измерений

Эталоны

Меры

Измерительные
преобразователи

Устройства
сравнения

Отсчетные
устройства

Установки-
стандарты

Поверочные
стенды

Эталонные
контрольно-
поверочные
приборы

Комплексные
средства
измерений

Измерительные
приборы

Установки и
стенды

Измерительные
системы

Элементарные средства измерений

1. Эталоны – средства измерения, воспроизводящие и хранящие единицы физических величин (стандарты физических величин)
2. Меры – СИ, воспроизводящих единицы в процессе рабочих измерений
3. Измерительные преобразователи - средство измерения для преобразования измерительной информации (измерительных сигналов). Датчик – ИП неэлектрической величины в электрическую.
4. Устройство сравнения (компаратор) – логическое устройство измерения, реализующее операцию сравнения измерительных сигналов ($=, >, <$). Преобразователь двух сигналов в логическую переменную «да-нет»
5. Отсчетное устройство – выдает измерительную информацию (опытные данные) оператору (табло, индикатор, экран, стрелка со шкалой)

Комплексные средства измерений

1. Измерительный прибор – совокупность элементарных средств, содержащих отсчетное устройство, показания которого воспринимаются оператором. Полностью решает одну или несколько измерительных задач
2. Измерительная установка (стенд) – совокупность средств измерения (приборов), собранных в одном месте и обслуживаемых оператором. Решает несколько измерительных задач
3. Измерительная система - совокупность средств измерения, управления и обработки, связанных между собой каналами передачи информации (измерительной и управляющей) .

Типы измерительных систем

1. Информационно-измерительные системы (ИИС) – системы сбора данных, системы контроля, системы диагностики.
2. Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) – включают управление и обработку результатов с помощью вычислительных средств
3. Компьютерные измерительные устройства (КИУ) и виртуальные приборы - включают компьютер, измерительные преобразователи и программное обеспечение для решения измерительных задач.

Типы средств измерений (СИ)

По точности:

1. Образцовые СИ – для поверки и градуировки других СИ (метрологические СИ).
2. Рабочие СИ – выполняют стандартные технические измерения. Не связаны с передачей единицы измерения от эталона.

По способу управления:

1. Ручное управление.
2. Автоматизированные СИ → ряд операций проводится без оператора (выбор диапазона, установка режима и пр.)
3. Автоматические СИ → программа измерений выполняется без участия оператора

Обобщенные характеристики и параметры СИ-1

1. Вид измеряемой физической величины;
2. Диапазон измерений – интервал значений физической величины, для которого гарантируется заданная точность;
3. Диапазон шкалы показаний СИ или число значащих цифр на индикаторе;
4. Уравнение измерения $y = f(x)$ функция связи показаний СИ с измеряемой физ. величиной, градуировочная характеристика;
5. Чувствительность – $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ производная от уравнения преобразования
6. Рабочий диапазон частот СИ - пределы частоты измеряемого гармонического сигнала, в которых гарантируется заданная точность;

Обобщенные характеристики и параметры СИ - 2

7. Предельная чувствительность – минимальная чувствительность, при которой гарантируется заданная точность;
8. Порог чувствительности – минимальный входной сигнал, при котором гарантируется заданная точность;
9. Разрешающая способность – минимальное изменение измеряемой величины ΔX_{\min} , которое можно зафиксировать с помощью данного СИ;
10. Вариация показаний – разность показаний измерения одной и той же физической величины при разном направлении ее установки – сверху или снизу;
11. Смещение и дрейф нуля – ненулевые показания при заведомо нулевом значении измеряемой величины;

Обобщенные характеристики и параметры СИ - 3

12. Время установления показаний;
13. Время измерения и быстродействие;
14. Входной импеданс (входное сопротивление) - определяет степень воздействия СИ на измеряемый объект. Характеризует часть мощности, потребляемую от исследуемого объекта⁴
15. Метрологические параметры СИ – параметры, характеризующие точность проводимых измерений с помощью данного СИ. Это класс точности, предел допускаемой основной и дополнительной погрешности и пр.

Особенности радиоизмерений

1. Большое число измеряемых физических величин (U, I, f, t, P, RLC, A и пр.)
2. Широкий диапазон измерения физических величин;
3. Широкий частотный диапазон исследуемых сигналов и устройств;
4. Сложный вид сигналов, наличии их модуляции требуется измерять форму сигналов и их частотный спектр
5. Широкое применение относительных измерений (не требующих эталонов физ. величин)  АЧХ, фазовый сдвиг и пр.)
6. Наличие устройств с большими внутренними сопротивлениями – малые токи, большие напряжение

**Следствие => многообразие принципов ,
методов и средств радиоизмерений**

Классификация электроизмерительных приборов

Обозначение электроизмерительных приборов согласно ГОСТ состоит из буквы русского алфавита, характеризующей тип измерительного механизма, и числа, определяющего вид и тип прибора:

Д - электродинамические; *И* - индукционные;

М - магнитоэлектрические; *Н* - самопишущие;

Р - меры, измерительные преобразователи, приборы для измерения параметров элементов электрических цепей;

С - электростатические; *Т* - термоэлектрические;

Ф - электронные, фотоэлектронные, цифровые;

Ц - выпрямительные и комбинированные; *Э* - электромагнитные.

Классификация радиоизмерительных приборов

Система обозначений ГОСТ 15094-86 состоит из: буквы русского алфавита, определяющей характер измерений и вид измеряемых величин (подгруппа) ; цифры (от 1 до 9), обозначающей тип измерительного прибора, и через дефис n-значного числа (n=1, 2, 3), указывающего порядковый номер модели

В обозначении модернизированных приборов добавляется русская буква (А,Б,В.. - например, В7-65А); для обозначения приборов, различающимися конструктивным исполнением, используется дополнительная цифра через дробь (например, В7-65/1). Многофункциональные приборы могут иметь в обозначении типа дополнительную букву "К" (например, СК6-13).

Классификация радиоизмерительных приборов

П/гр	Наименование подгруппы
А	Приборы для измерения силы тока
Б	Источники питания для измерений и измерительных приборов
В	Приборы для измерения напряжения
Г	Генераторы измерительные
Д	Аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений
Е	Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными
И	Приборы для импульсных измерений
К	Комплексные измерительные установки
Л	Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов
М	Приборы для измерения мощности
Н	Меры и калибраторы

П/гр	Наименование подгруппы
П	Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех
Р	Приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными
С	Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра
У	Усилители измерительные
Ф	Приборы для измерения фазового сдвига и группового времени запаздывания
Х	Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств
Ц	Анализаторы логических устройств
Ч	Приборы для измерения частоты и времени
Ш	Приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов
Э	Измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов
Я	Блоки радиоизмерительных приборов

Основные направления развития радиоизмерительной техники

- расширение состава и диапазона измеряемых физических величин;
- повышение точности и быстродействия измерений;
- расширение функциональных возможностей средств измерений;
- автоматизация измерений и информационная совместимость различных средств измерений;
- снижение массы, габаритов и стоимости;
- повышение надежности и помехозащищенности;
- снижение трудозатрат на техническое обслуживание средств измерений.

Реализация этих направлений возможна при условии:

- разработки новых принципов и методов измерения;
- использования современных достижений в изготовлении электронных приборов на новых физических явлениях;
- совершенствования технологий изготовления средств измерений;
- применения микропроцессорных средств и цифровой обработки сигналов.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Эталоны и меры. Измерительные преобразователи, компараторы и отсчетные устройства. Обобщенные методы измерений.

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Термины и определения

ГОСТ 8.057-80:

Эталон (measurement standard)- средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений.

Государственный эталон – утвержденный законодательно, признан Палатой Мер и Весов

Первичный эталон – наивысшая точность, используют для хранения и передачи единицы на вторичный эталон

Вторичный эталон – для передачи на рабочие эталоны и меры

Специальный эталон – для особых условий (например на СВЧ)

Эталон-свидетель – для проверки сохранности гос. эталона и его замены в случае порчи

Эталон-копия – для разгрузки первичного эталона

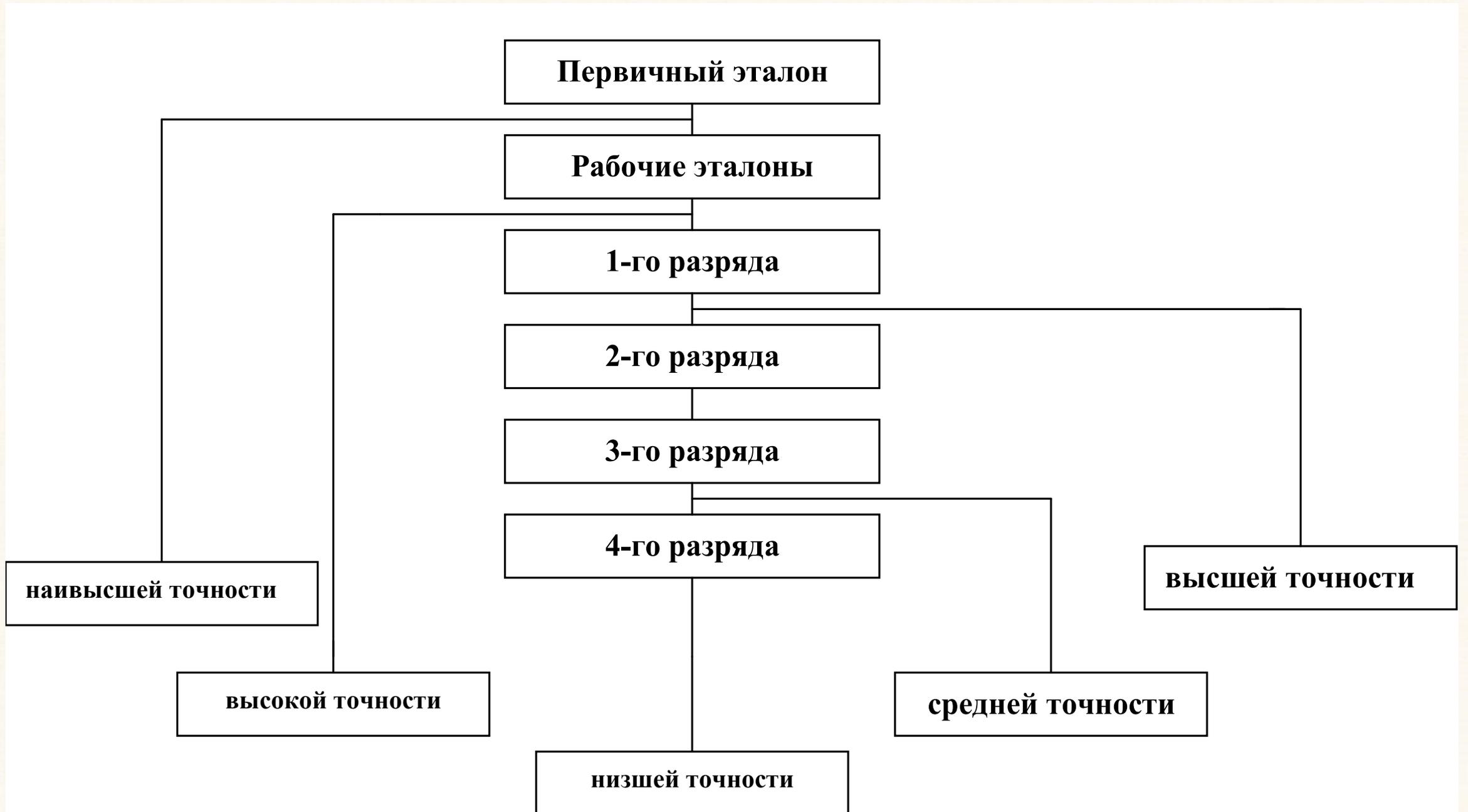
Эталон сравнения – для взаимного сличения эталонов, которые находятся в разных местах (например, в разных странах)

Рабочий эталон , мера = 1,2,3,4 разряды по точности

Классификация эталонов



Общий вид государственной поверочной схемы (по ГОСТ 8.057-80)



Система физических единиц

Международная система единиц СИ (Si – Sistema International d’Unites

Принята в 1960 г. Генеральной конференцией по мерам и весам. В СССР была принята как *предпочтительная* (1961 г.), а затем - ГОСТ 8.417—81 «ГСИ. Единицы физических величин»

- как *обязательная*. В России - закон РФ от 26.06.2008 №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» ГОСТ 8.417-2002 и ISO 1000 «Единицы СИ и рекомендации» 1992г., ISO 31 «Величины и единицы» 1992г.

7 Основных единиц СИ:

1. Длина, метр
2. Масса, кг
3. Время, с
4. Сила тока, Ампер
5. Сила света, кандела
6. Термодинамическая температура, градус Кельвина
7. Количество вещества, моль

Производные единицы - образуют по физическим законам, куда входят **фундаментальные постоянные**

Фундаментальные физические постоянные

Наименование	Обозначение	Значение
<u>скорость света</u>	c	299 792 458 м·с ⁻¹ = 2,9979246·10 ⁸ м·с ⁻¹
<u>гравитационная постоянная</u>	g	6,673 84(80)·10 ⁻¹¹ м ³ ·кг ⁻¹ ·с ⁻²
<u>постоянная Планка</u>	h	6,626 069 57(29)·10 ⁻³⁴ Дж·с
<u>элементарный заряд</u>	e	1,602 176 565(35)·10 ⁻¹⁹ Кл
<u>постоянная Больцмана</u>	k	1,380 6488(13)·10 ⁻²³ Дж·К ⁻¹
<u>электрическая постоянная</u>	$\varepsilon_0 = \frac{1}{(\mu_0 c^2)}$	8,854 187 817 620 ·10 ⁻¹² Ф·м ⁻¹
<u>магнитная постоянная</u>	$\mu_0 = \frac{1}{(\varepsilon_0 c^2)}$	1.25663706·10 ⁻⁶ Гн·м ⁻¹

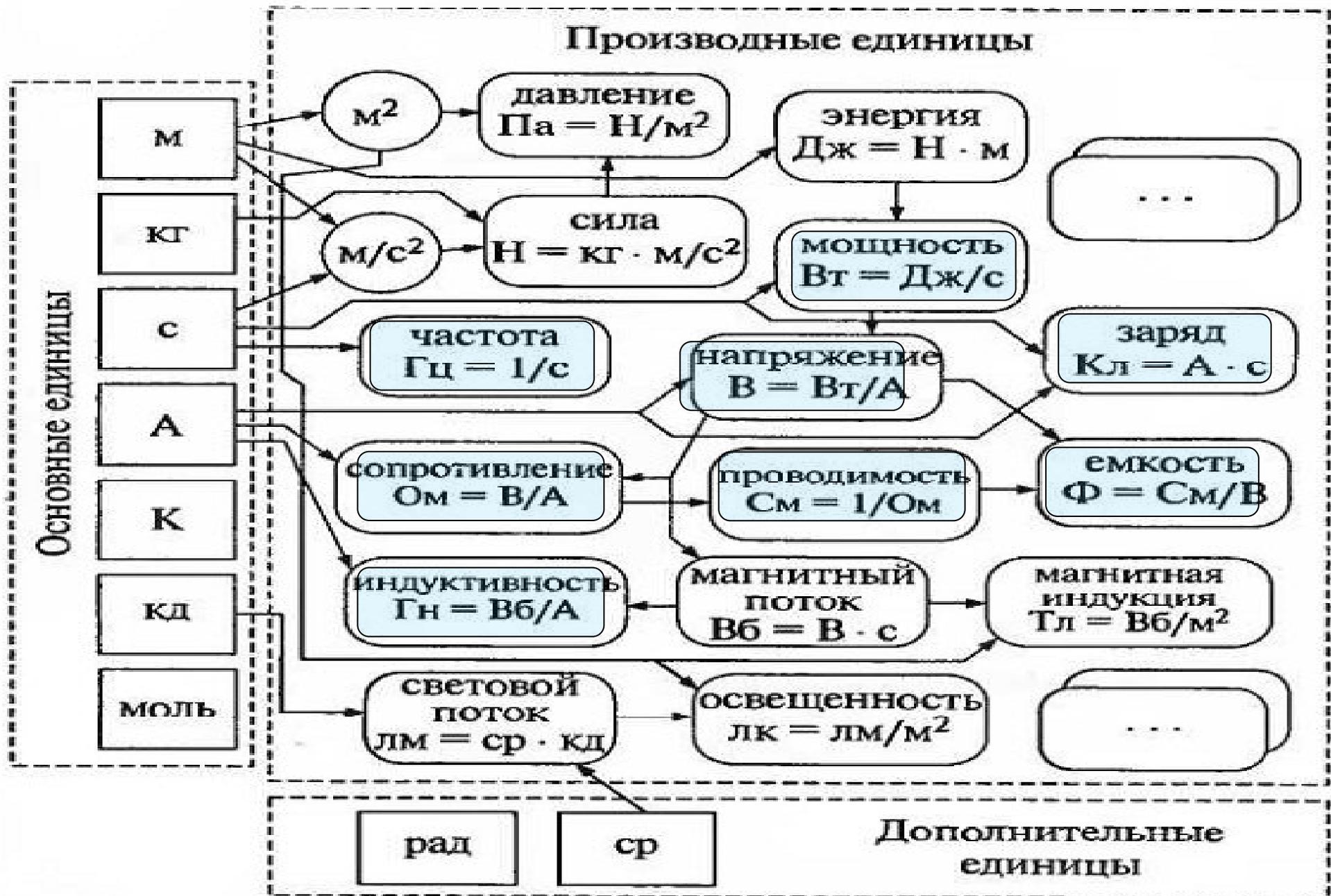
Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц.

Множитель	Приставка			Множитель	Приставка		
	наименование	обозначение			наименование	обозначение	
		русское	международное			русское	международное
10^{-18}	атто	а	а	10^1	дека	да	da
10^{-15}	фемто	ф	f	10^2	гекто	г	h
10^{-12}	пико	п	p	10^3	кило	к	k
10^{-9}	нано	н	n	10^6	мега	М	M
10^{-6}	микро	мк	μ	10^9	гига	Г	G
10^{-3}	мили	м	m	10^{12}	тера	Т	T
10^{-2}	санти	с	c	10^{15}	пета	П	P
10^{-1}	деци	д	d	10^{18}	экса	Э	E

Система электрических единиц системы СИ

Электрическая величина		Единица измерений		
наименование	обозначение	наименование	русское обозначение	международное обозначение
Сила тока	I	Ампер	А	А
Напряжение, ЭДС	U, E	Вольт	В	V
Мощность активная	P	Ватт	Вт	W
Сопротивление	R	Ом	Ом	Ω
Емкость	C	Фарада	Ф	F
Индуктивность, взаимная индуктивность	L, M	Генри	Гн	H
Частота	f	Герц	Гц	Hz
Длина волны	λ	метр	м	m
Фазовый сдвиг	ϕ	радиан	рад	rad

**Образование
производных
электрических
единиц**



Величина (наименование единицы измерения)	Обозначение	<u>Размерность</u>	Выражение
<u>Частота</u> (герц)	Гц	T^{-1}	c^{-1}
<u>Сила</u> (ньютон)	Н	$M \cdot L \cdot T^{-2}$	$кг \cdot м \cdot c^{-2}$
<u>Энергия</u> (джоуль)	Дж	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$	$Н \cdot м = кг \cdot м^2 \cdot c^{-2}$
<u>Мощность</u> (ватт)	Вт	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3}$	$Дж/с = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3}$
<u>Давление</u> (паскаль)	Па	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	$Н/м^2 = кг \cdot м^{-1} \cdot c^{-2}$
<u>Световой поток</u> (люмен)	лм	J	кд·ср
<u>Освещённость</u> (люкс)	лк	$J \cdot L^{-2}$	$лм/м^2 = кд \cdot ср/м^2$
<u>Электрический заряд</u> (кулон)	Кл	$I \cdot T$	$A \cdot c$
<u>Разность потенциалов</u> (вольт)	В	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$	$Дж/Кл = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
<u>Сопrotивление</u> (ом)	Ом	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$	$В/А = кг \cdot м^2 \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
<u>Электроёмкость</u> (фарад)	Ф	$T^4 \cdot I^2 \cdot M^{-1} \cdot L^{-2}$	$Кл/В = c^4 \cdot A^2 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-2}$
<u>Магнитный поток</u> (вебер)	Вб	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}$	$кг \cdot м^2 \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
<u>Магнитная индукция</u> (тесла)	Тл	$M \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}$	$Вб/м^2 = кг \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
<u>Индуктивность</u> (генри)	Гн	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}$	$кг \cdot м^2 \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
<u>Электрическая проводимость</u> (сименс)	См	$T^3 \cdot I^2 \cdot M^{-1} \cdot L^{-2}$	$Ом^{-1} = c^3 \cdot A^2 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-2}$
<u>Активность радиоактивного источника</u> (беккерель)	Бк	T^{-1}	c^{-1}
<u>Поглощённая доза ионизирующего излучения</u> (грей)	Гр	$L^2 \cdot T^{-2}$	$Дж/кг = м^2/с^2$
<u>Эффективная доза ионизирующего излучения</u> (зиверт)	Зв	$L^2 \cdot T^{-2}$	$Дж/кг = м^2/с^2$
<u>Активность катализатора</u> (катал)	кат	$N \cdot T^{-1}$	моль/с

Единицы для ОТНОСИТЕЛЬНЫХ измерений

Результат *относительных измерений* выражается:

- в *относительных единицах* (например, в *процентах* % (на сотню), *промилле* ‰ (лат. per mille — на тысячу), *ppm* - parts per million);
- в логарифмических единицах *децибелах (дБ, dB)*. В технике связи иногда используется внесистемная единица - *непер*.



Децибел (дБ) - относительная единица, основанная на десятичном логарифме отношения двух величин одинаковой размерности. В радиотехнике это отношение мощностей

$$N, \text{ дБ} = 10 \lg(P_2/P_1) = 20 \lg(U_2/U_1)$$

Непер (Нп) - относительная единица, равная натуральному логарифму отношения напряжений:

$$N, \text{ Нп} = \ln(U_2/U_1).$$

Связь Непера и дБ: 1 дБ = 0.115 Нп, 1 Нп = 8.686 дБ.

Из истории эталона массы



В **1889** году роль прототипа килограмма была «поручена» цилиндрической гире из платино-иридиевого сплава, а ее 40 точных копий стали международными эталонами. Две из них (№ 12 и № 26) были переданы России.

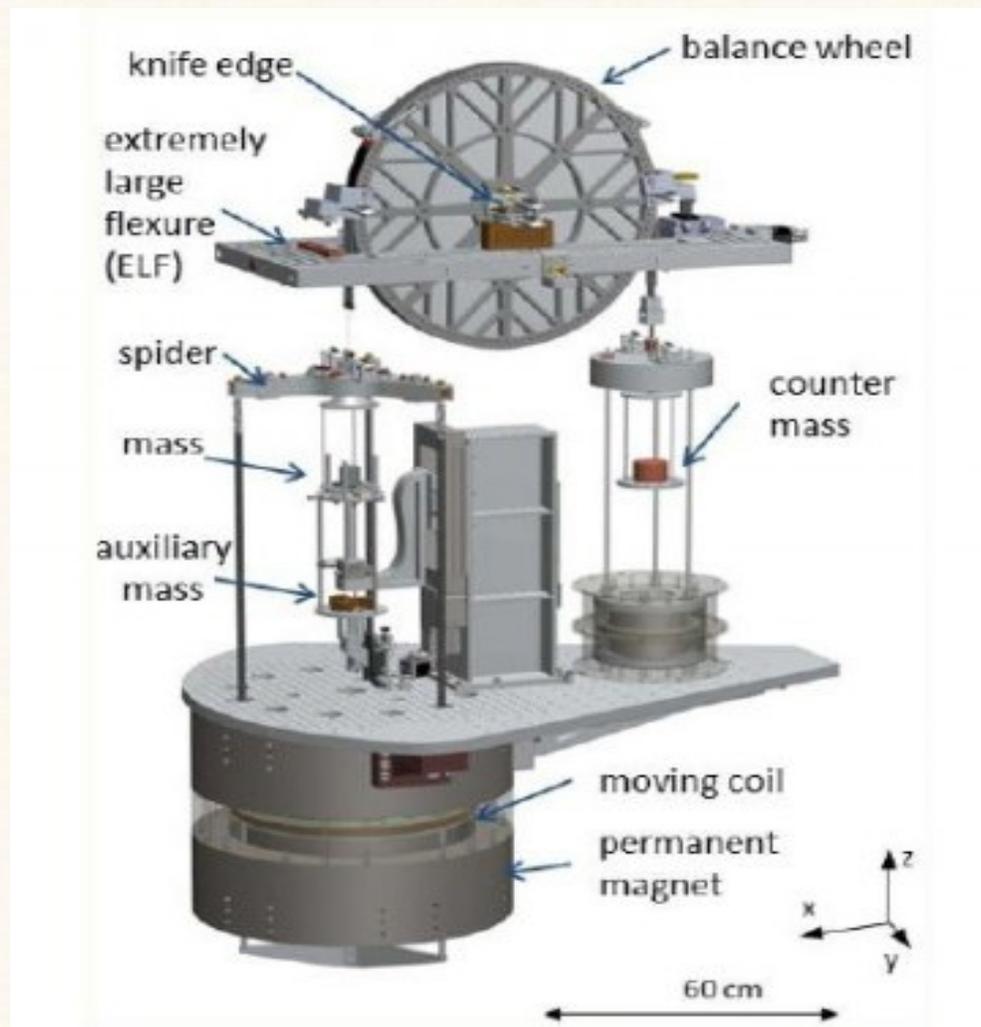
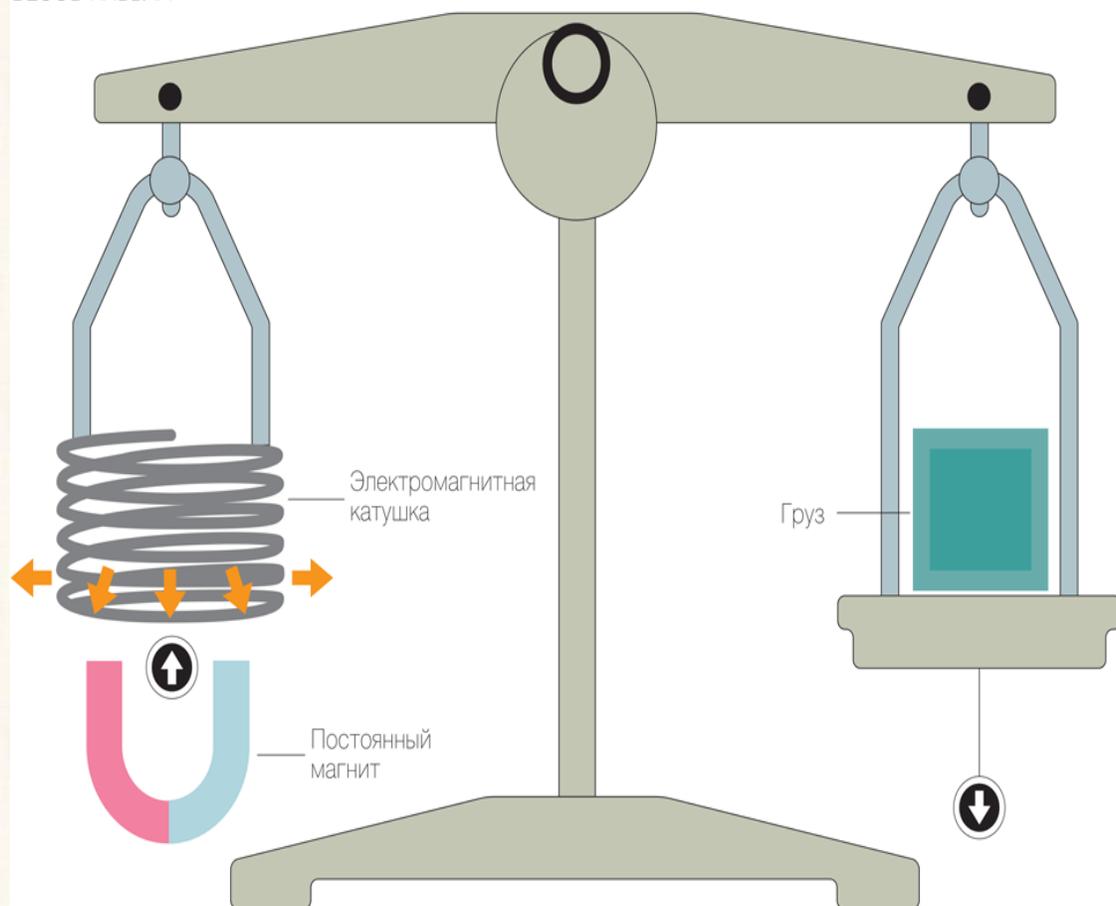
Эталон № 12 был принят в качестве Государственного первичного эталона массы. В настоящее время эталон хранится в институте метрологии им. Д. И. Менделеева в Санкт - Петербурге.

Самым первым международным прототипом килограмма взят цилиндр из сплава платины и иридия, высота и диаметр которого равны 39 мм. Этот эталон не связан ни с физическими постоянными, ни с какими-либо природными явлениями.

С 20 мая 2019 года введен эталон килограмма на основе **весов Киббла**, использующих взаимодействие эталонного тока и поля постоянного магнита. ВНИИ метрологии до 2025г будет использовать находящийся в России эталон килограмма (весы Киббла еще не построены)

КАК РАБОТАЮТ ВЕСЫ КИББЛА

ТОК СОЗДАЕТ СИЛУ (МАГНИТНОГО ПОЛЯ), КОТОРАЯ УРАВНОВЕШИВАЕТ ГРУЗ НА ДРУГОЙ ЧАШКЕ ВЕСОВ КИББЛА



Эталон единицы времени - секунда

Единица времени (и частоты) . За секунду раньше брали $1/86400$ часть средних солнечных суток (период вращения Земли). Затем (в 1960г.) стали брать $1/31556925.9744$ часть тропического года (оборот Земли вокруг Солнца).

Воспроизведение секунды – хронометры, эталонные маятниковые часы (точность порядка 10^{-4} сек в сутки). Кварцевые часы (генераторы) – точность порядка 10^{-6} с.

1967 год – Квантовый эталон времени – **цезиевый генератор**. В настоящее время – нестабильность на уровне 10^{-14}

Секунда- это 9192631770 периодов излучения, соответствующее переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Квантовый эталон времени - генератор СВЧ со стабилизацией парами цезия-133

(«цезиевый репер»)

Пассивная схема – атомно-лучевая трубка с нагретым цезием используется как квантовый дискриминатор (поглощающий резонатор) для стабилизации частоты кварцевого генератора до $3 \cdot 10^{-14}$

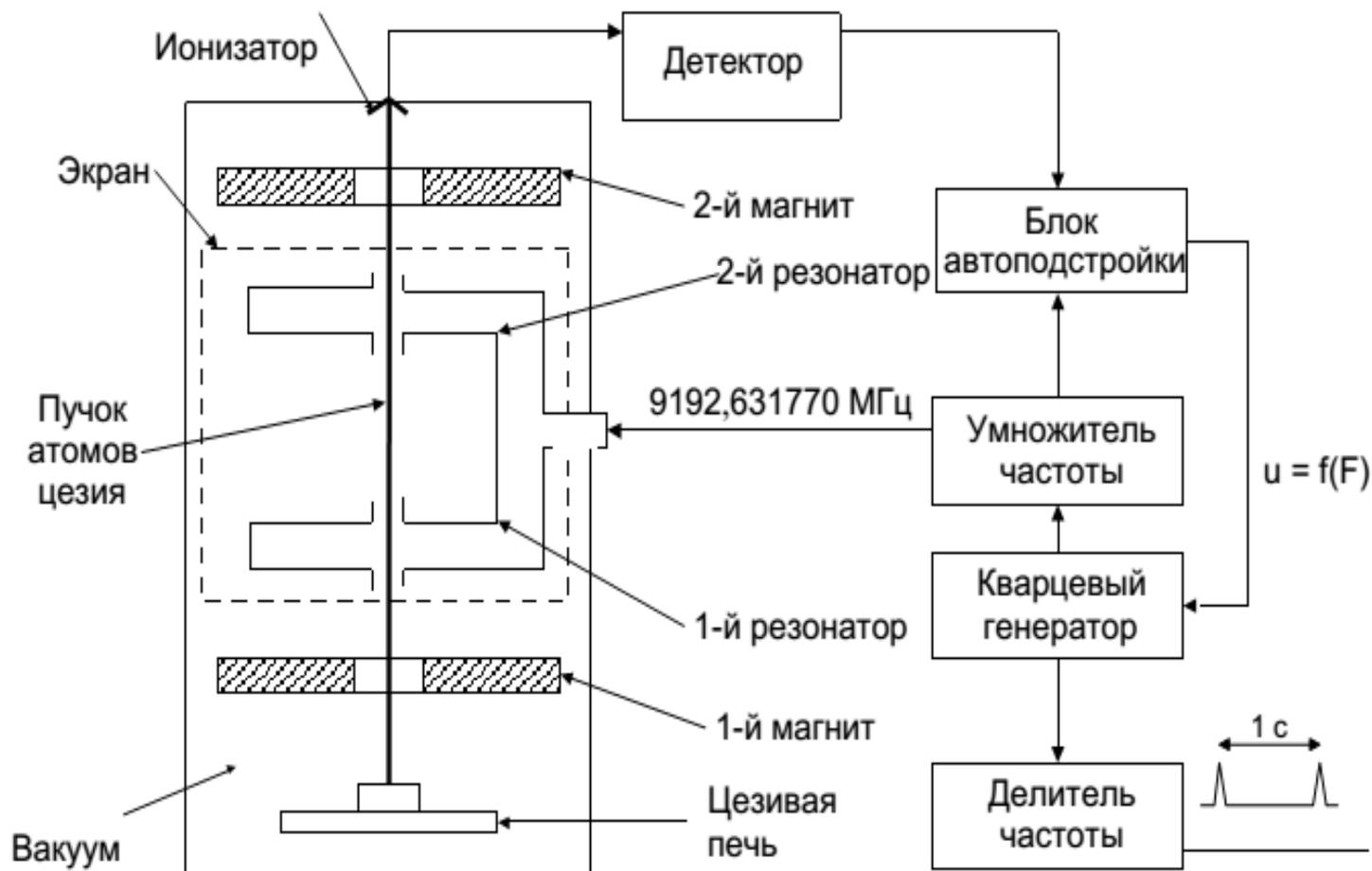


Рисунок 3. Государственный первичный эталон единицы времени и частоты

Водородный генератор - хранитель единицы времени

Водородный стандарт проще. Сепарация атомов водорода помещает в резонатор только те атомы, которые соответствуют нужному энергетическому переходу. Это приводит к самовозбуждению квантового генератора. Применяют для хранения единицы времени. Активный генератор с частотой 1.4204057518 ГГц

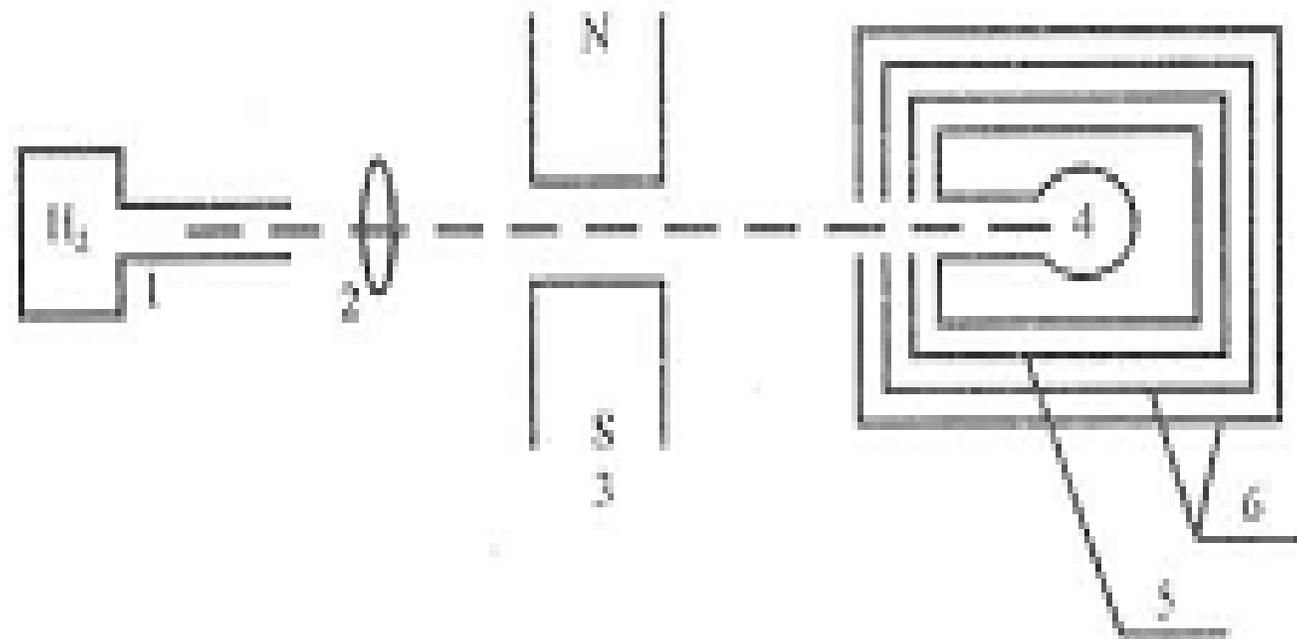


Рис. 2.4. Структурная схема водородного генератора:
1 – баллон с водородом; 2 – коллиматор; 3 – осевой магнит;
4 – накопительная ячейка; 5 – резонатор; 6 – многослойный экран



На новые спутники «Глонасс-К2» российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС установят стандарт частоты нового типа — **водородные часы**.
Выдает гармонические сигналы с частотами 5 МГц, 10 МГц, 100 МГц, импульсные:
частота 1 Гц, 1/60 Гц, (шкала времени), частота 1 МГц, длительность импульса 1 Гц, 1/60 Гц, — (100±0,01), (10±0,01), (1±0,01) мкс. Обеспечивает нестабильность не хуже 3×10^{-13}

Эталон метра

В СИ **скорость света** в вакууме принята равной 299 792 458 м/с.

Определение метра привязано к секунде с помощью универсальной мировой константы.

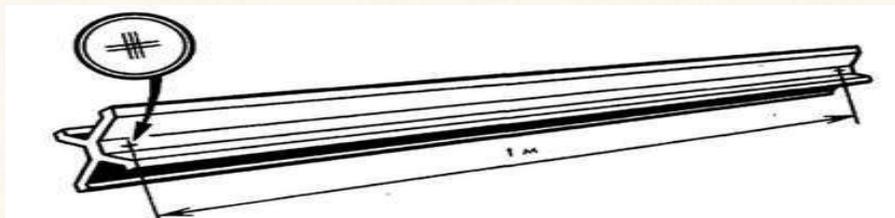
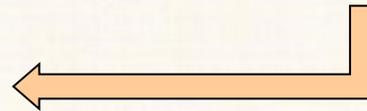
Метр равен расстоянию, которое проходит свет в вакууме за промежуток времени, равный $1/299792458$ секунды

Для воспроизведения единицы длины используют высокостабильный источник излучения (лазер с длиной волны 0.633 мкм). Измеряют длину волны и умножают ее на универсальную константу .

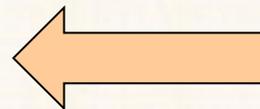


История эталона метра.

Один из публичных старых эталонов метра, установленных на улицах Парижа в 1795 -1796 гг.

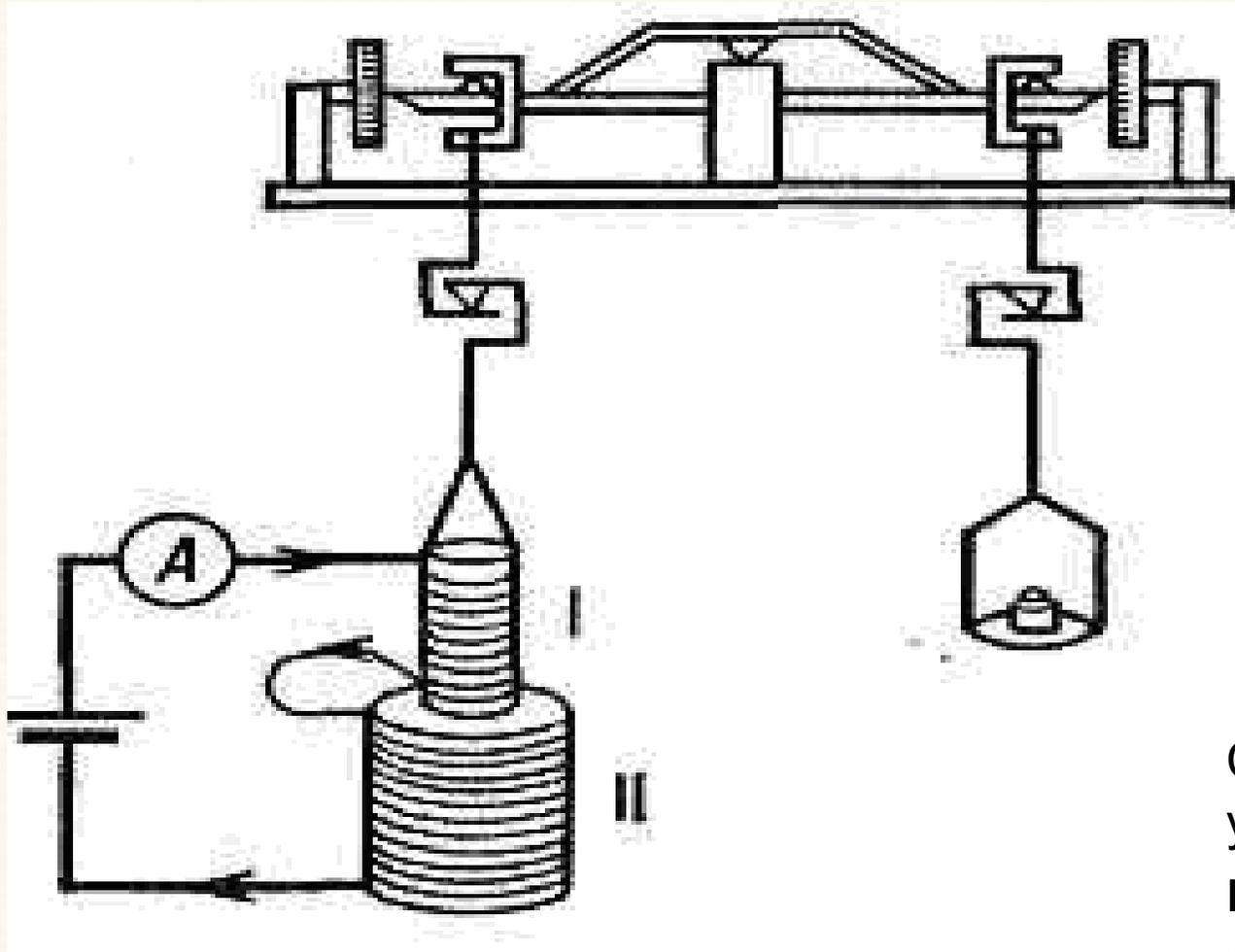


Первый эталон метра (1899г.) - $1/10\,000\,000$ доля расстояния от экватора Земли до северного полюса на меридиане Парижа. Платиново-иридиевый стержень X-образного сечения 20x20 мм²



Эталон силы тока (А)

Ампер равен силе тока в параллельных проводниках бесконечной длины, расположенных на расстоянии 1 м, которые притягиваются с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

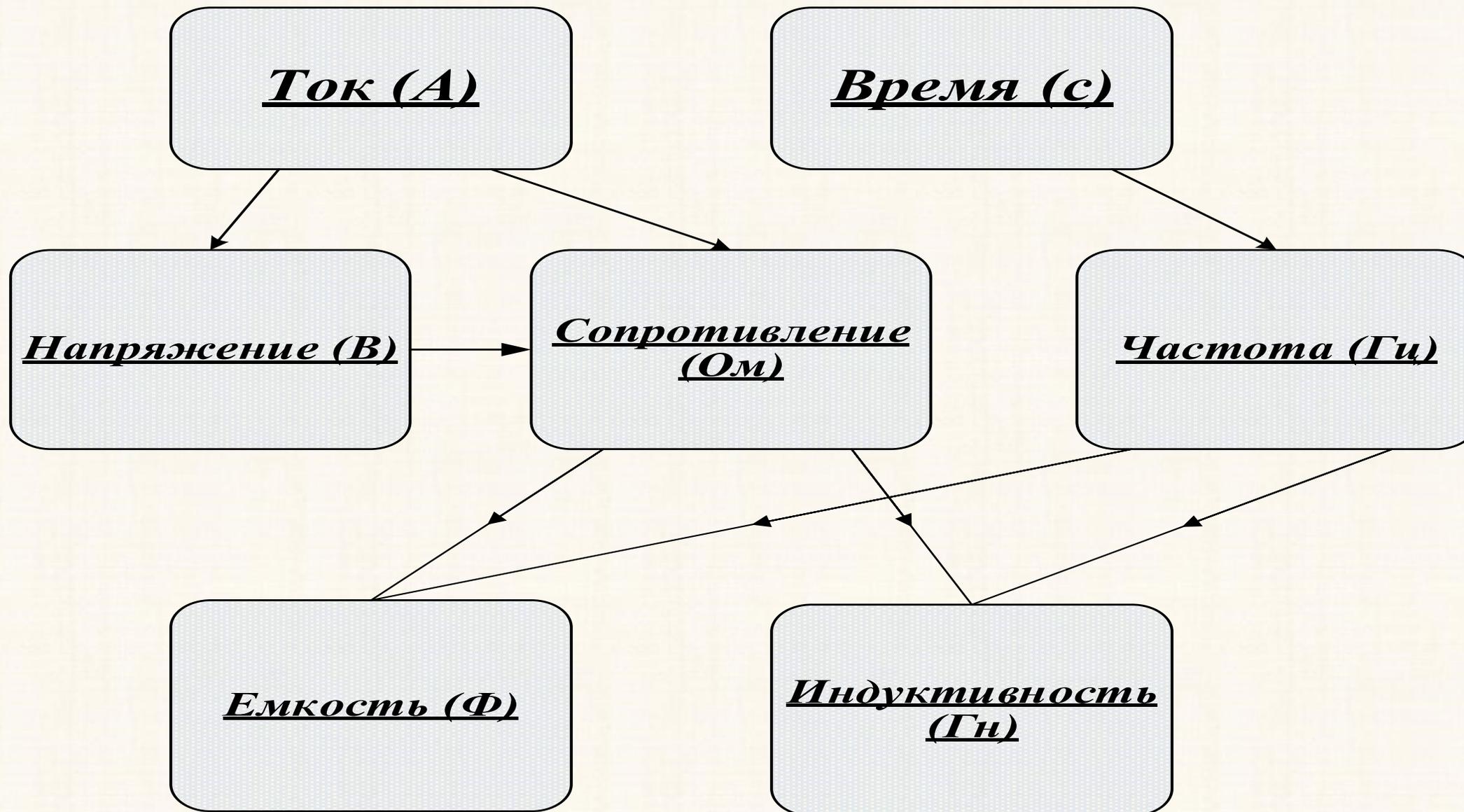


Для воспроизведения единицы тока использовались **токовые весы**. Они связывают вес эталонных гирек mg с силой взаимодействия подвижной и неподвижной катушек, по которым протекает ток I . k -коэффициент, зависящий от геометрии катушек

$$I = \sqrt{\frac{mg}{k}}$$

С 1992 г. в качестве национального эталона утвержден **ампер**, размер которого воспроизводится с помощью «квантовых» эталонов вольты и ома.

Стандарты электрических величин



Использование квантовых эффектов для стандартизации электрических величин

Треугольник

квантовых

эталонов –

замена **ТОКОВЫХ**

весов для

стандартизации

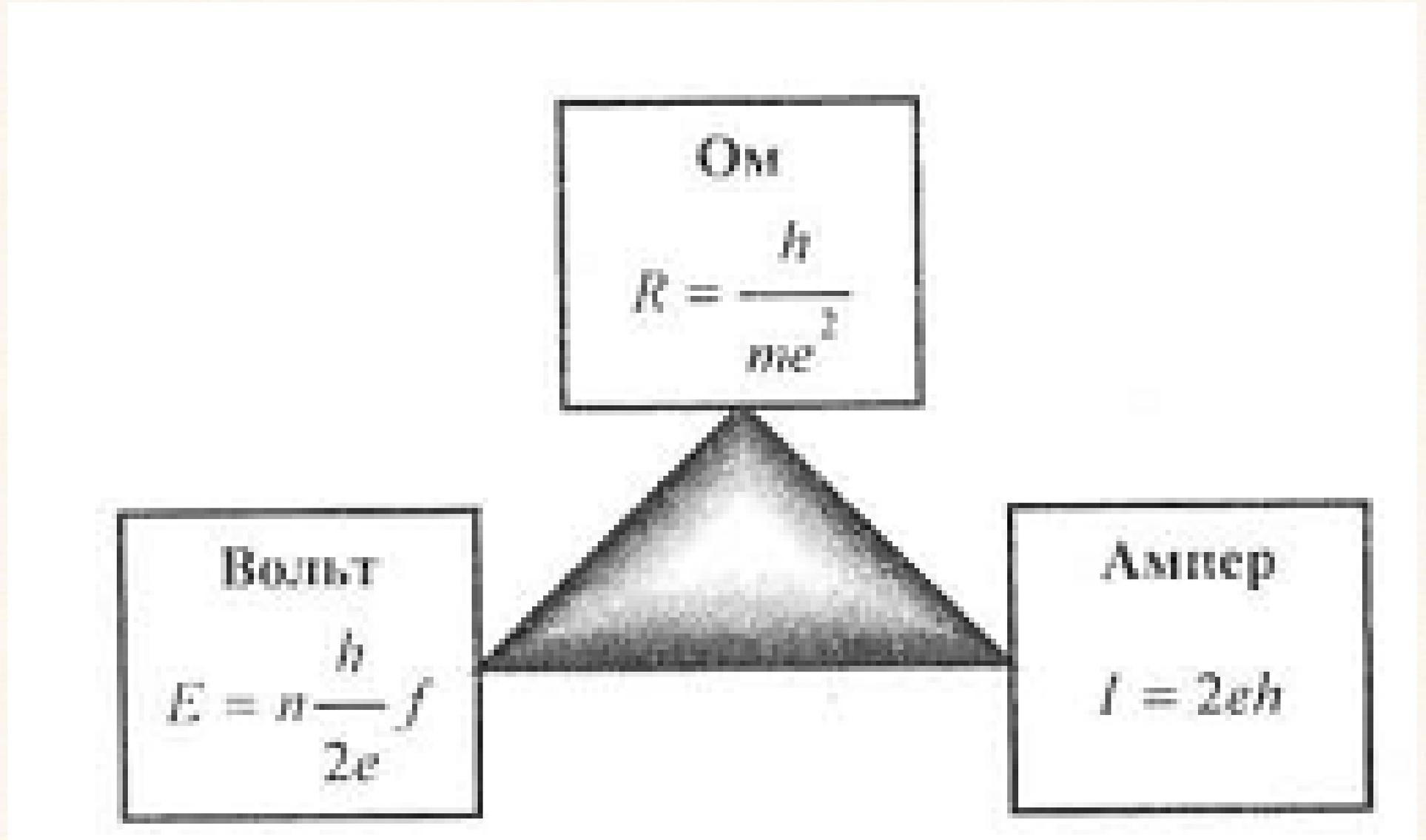
электрических

величин. **Ток**

вычисляется

через вольт и

ом!

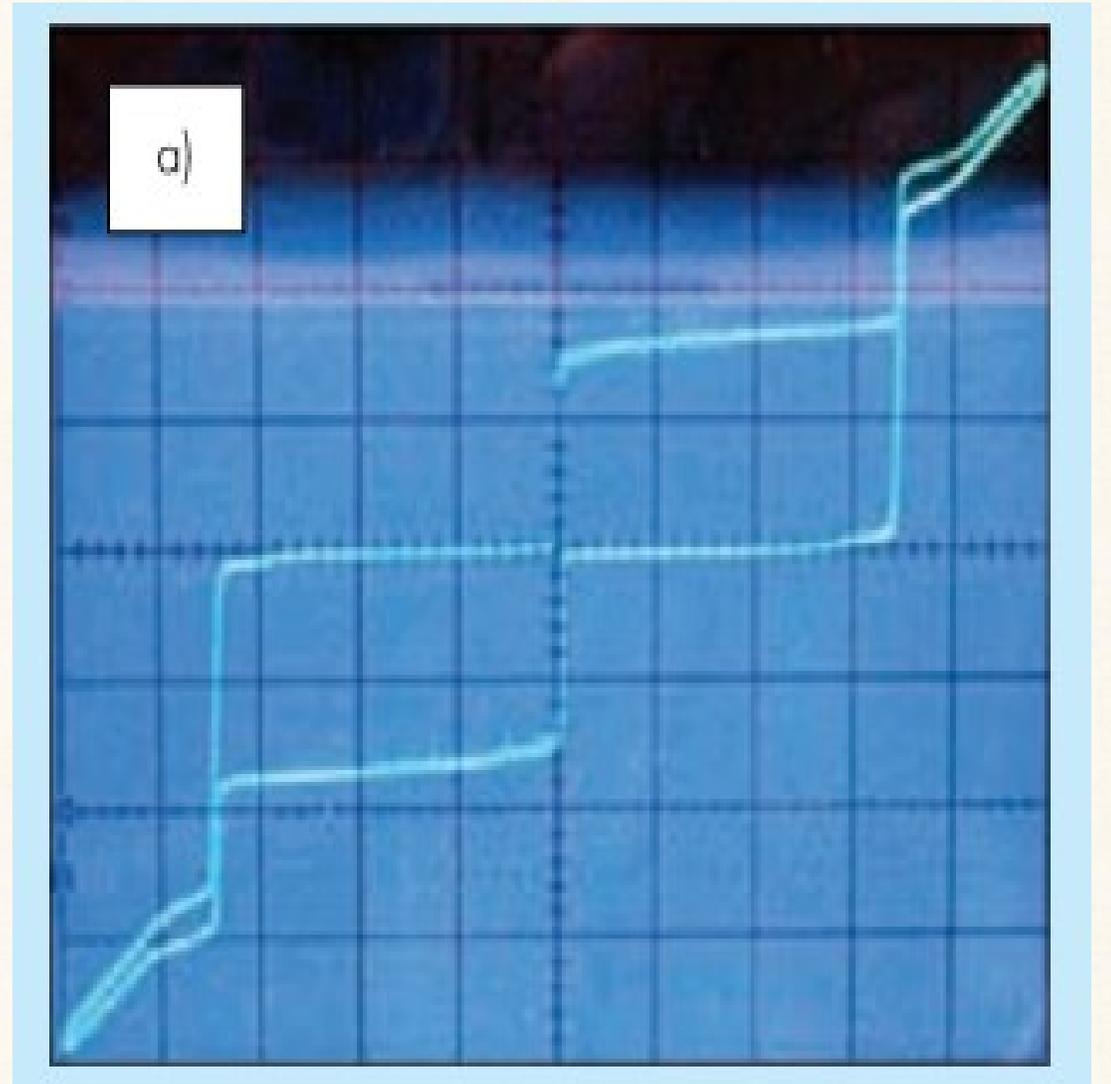
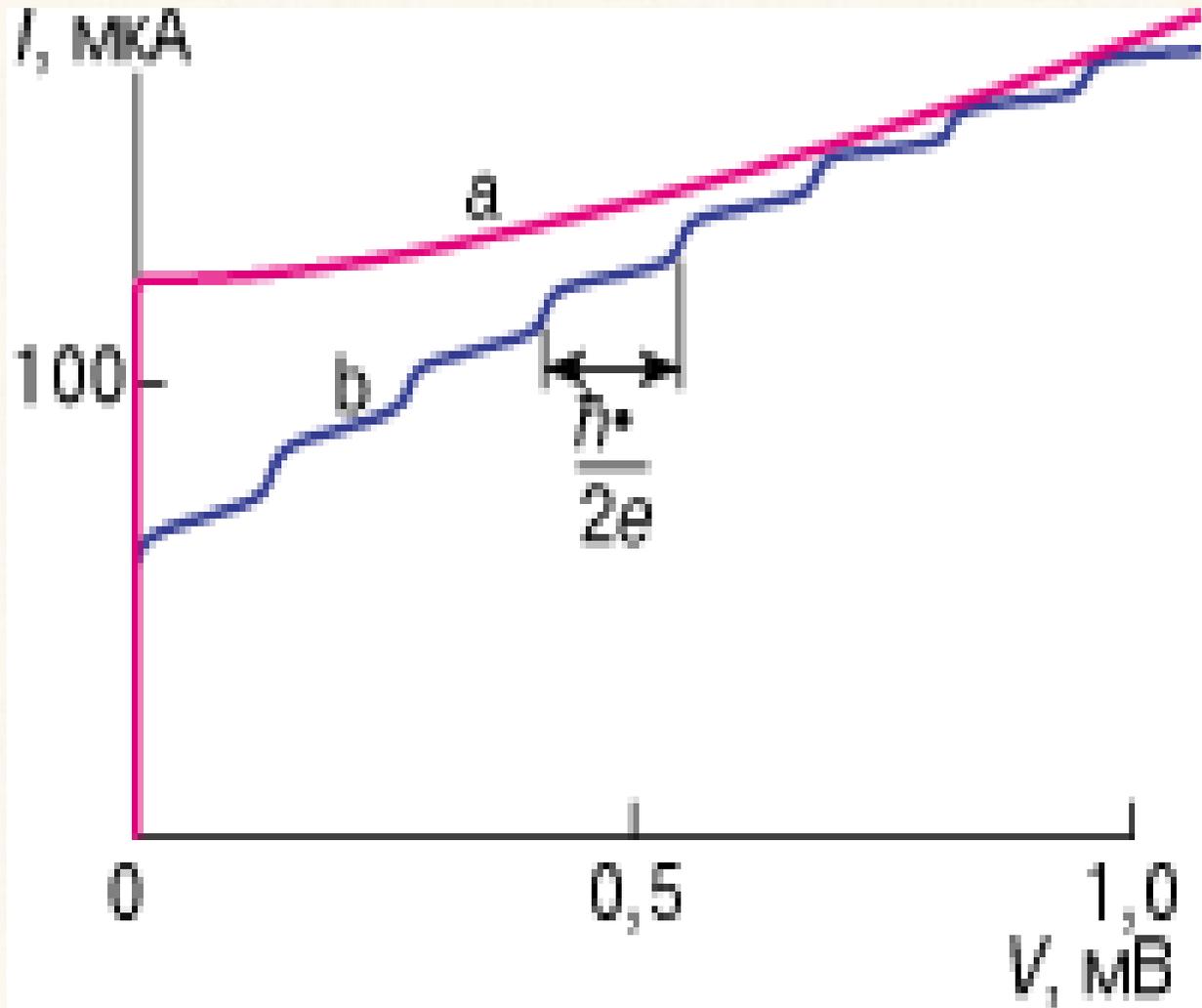


Квантовый эталон НАПРЯЖЕНИЯ на основе эффекта Джозефсона

Эффект Джозефсона возникает между двумя контактирующими сверхпроводниками (туннельный контакт). **Нестационарный эффект Джозефсона** возникает в случае, когда к джозефсоновскому контакту прикладывается постоянное напряжение U . При этом через контакт будет протекать переменный ток СВЧ. Джозефсоновский контакт, на котором поддерживается постоянная разность потенциалов U , излучает электромагнитный сигнал с частотой $\omega = (2e/h)U$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Величина $\omega/U = 2e/h = 483,59767$ МГц/мкВ - постоянная Джозефсона.

Нестационарный эффект Джозефсона **обратим**: если джозефсоновский контакт облучать СВЧ полем с частотой f (порядка 70 ГГц), то на контакте напряжение будет ступенчатым образом изменяться в зависимости от частоты внешнего электромагнитного поля с зависимостью $U = n(h/2e)f$

где f – частота электромагнитного поля. Интервал между ступеньками достигает 4 – 5 мВ.



Вольт-амперная характеристика (ВАХ) джозефсоновского перехода без облучения (а), при облучении СВЧ сигналом (б) и осциллограмма ВАХ

В России Государственный первичный эталон ЭДС и постоянного напряжения воспроизводит вольт с помощью эффекта Джозефсона. Размер единицы вольта передается *вторичному* эталону, в качестве которого применяется группа термостатированных насыщенных элементов.

Государственный *первичный* эталон на основе эффекта Джозефсона имеет погрешность воспроизведения, оцениваемую среднеквадратическим отклонением результата измерений $5 \cdot 10^{-9}$; неисключенная систематическая погрешность составляет $5 \cdot 10^{-9}$.

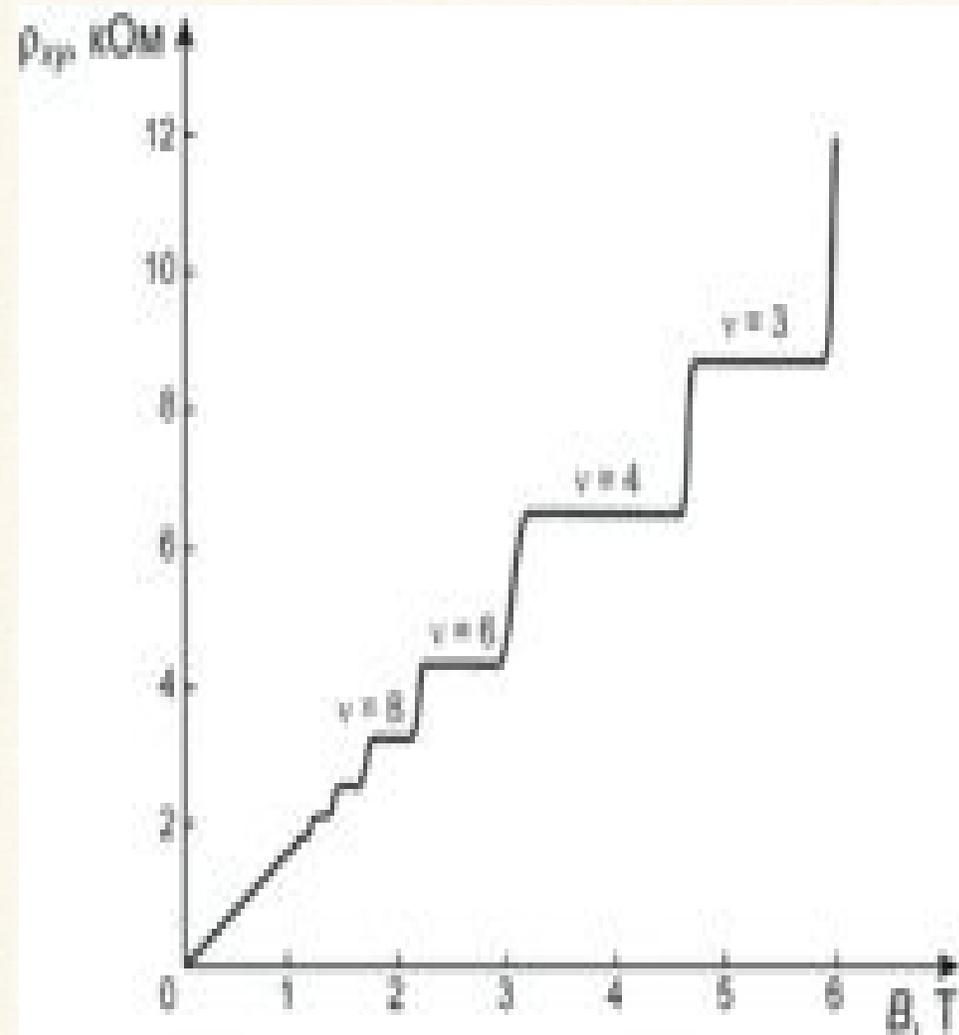
Вторичный эталон в виде группы насыщенных термостатированных НЭ имеет среднеквадратическое отклонение результата измерений $1,3 \cdot 10^{-8}$.

Эталон СОПРОТИВЛЕНИЯ на основе эффекта Холла

Квантовый эффект Холла использует сверхпроводимость структуру металл-окисел-полупроводник (МОП-структура). Если ее охладить до температуры 4,2 К и поместить в сильное магнитное поле с индукцией $B = (6 \dots 12)$ Тл, то электрическое сопротивление МОП-структуры, называемой ХОЛЛОВСКИМ КОНТАКТОМ, будет изменяться при вариации магнитного поля с дискретом

$$r_x = n \cdot (h/e^2),$$

где h – постоянная Планка, Дж · с; e – заряд электрона, Кл. Величина дискрета холловского сопротивления (константа **Клитцинга**) $r_x = 25812,807$ Ом с погрешностью не хуже 10^{-8} .



Эталон сопротивления на основе эффекта Холла

Установка, воспроизводящая размер

Ома, включена в состав

Государственного эталона

электрического сопротивления.

Составной частью эталона является

группа из 10 манганиновых катушек

сопротивления (*вторичные эталоны*) с

номинальным значением 1 Ом,

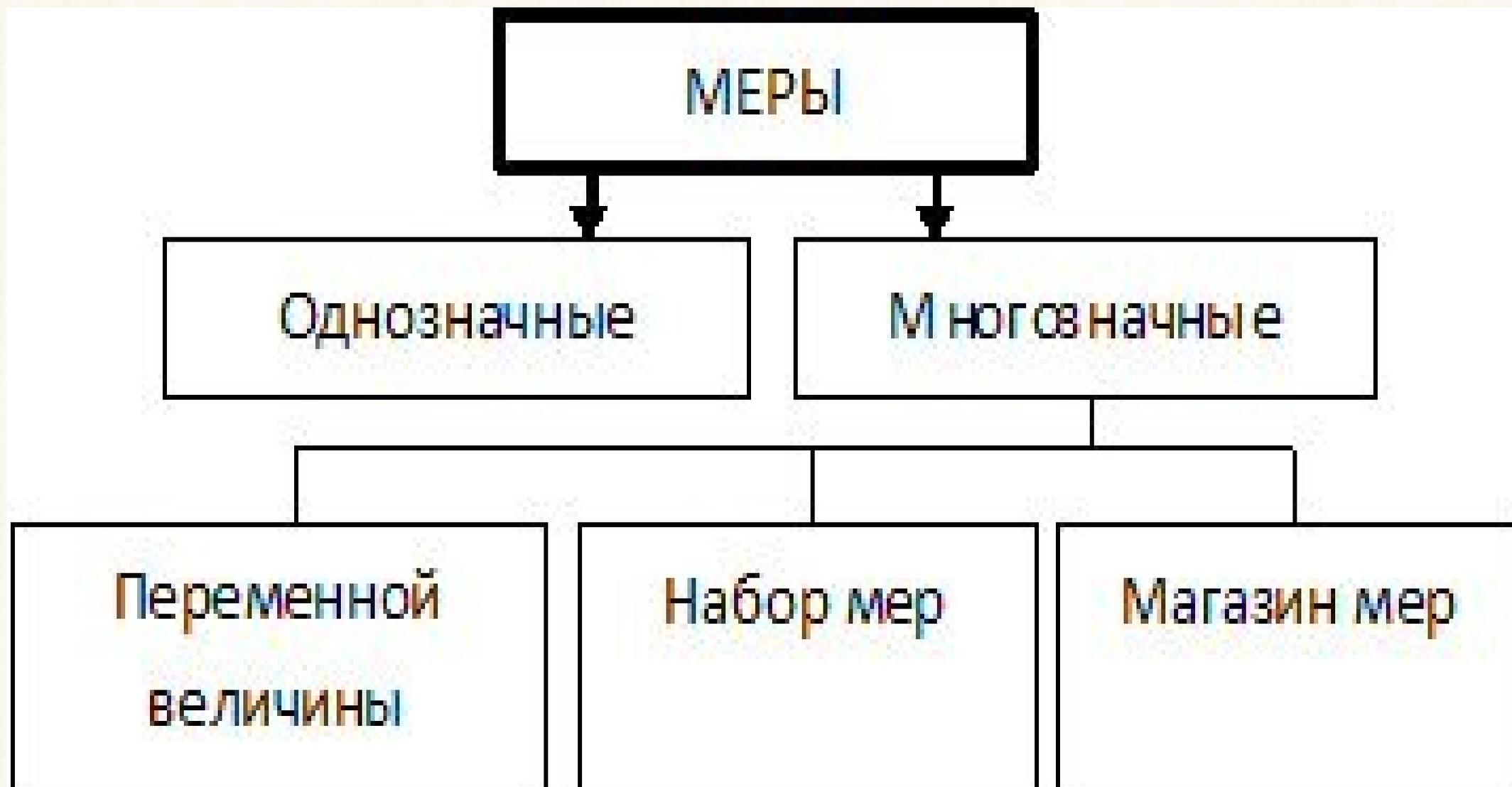
обеспечивающая воспроизведение Ома

со среднеквадратическим отклонением

результата измерений $3 \cdot 10^{-8}$.

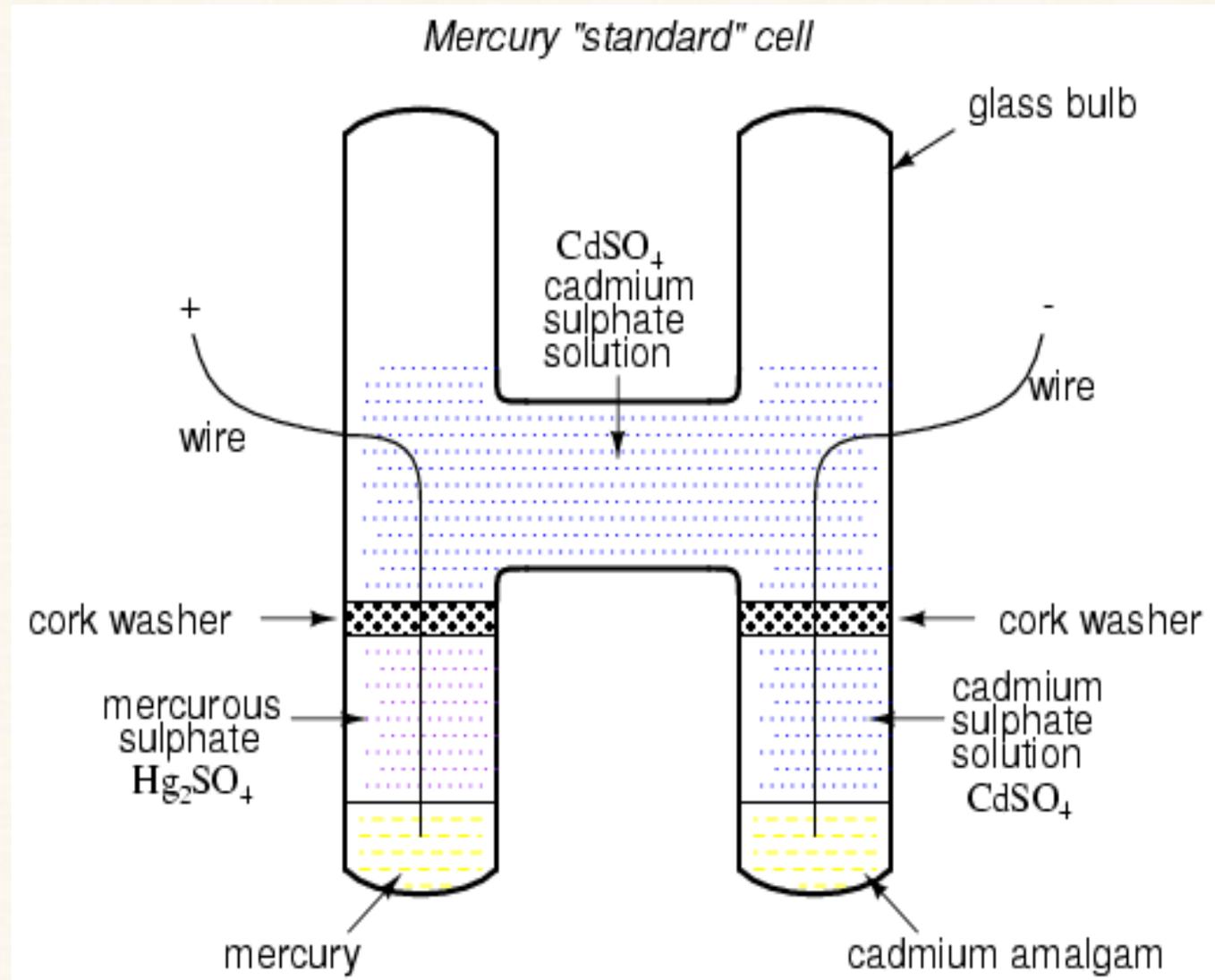


Меры электрических величин (рабочие эталоны)



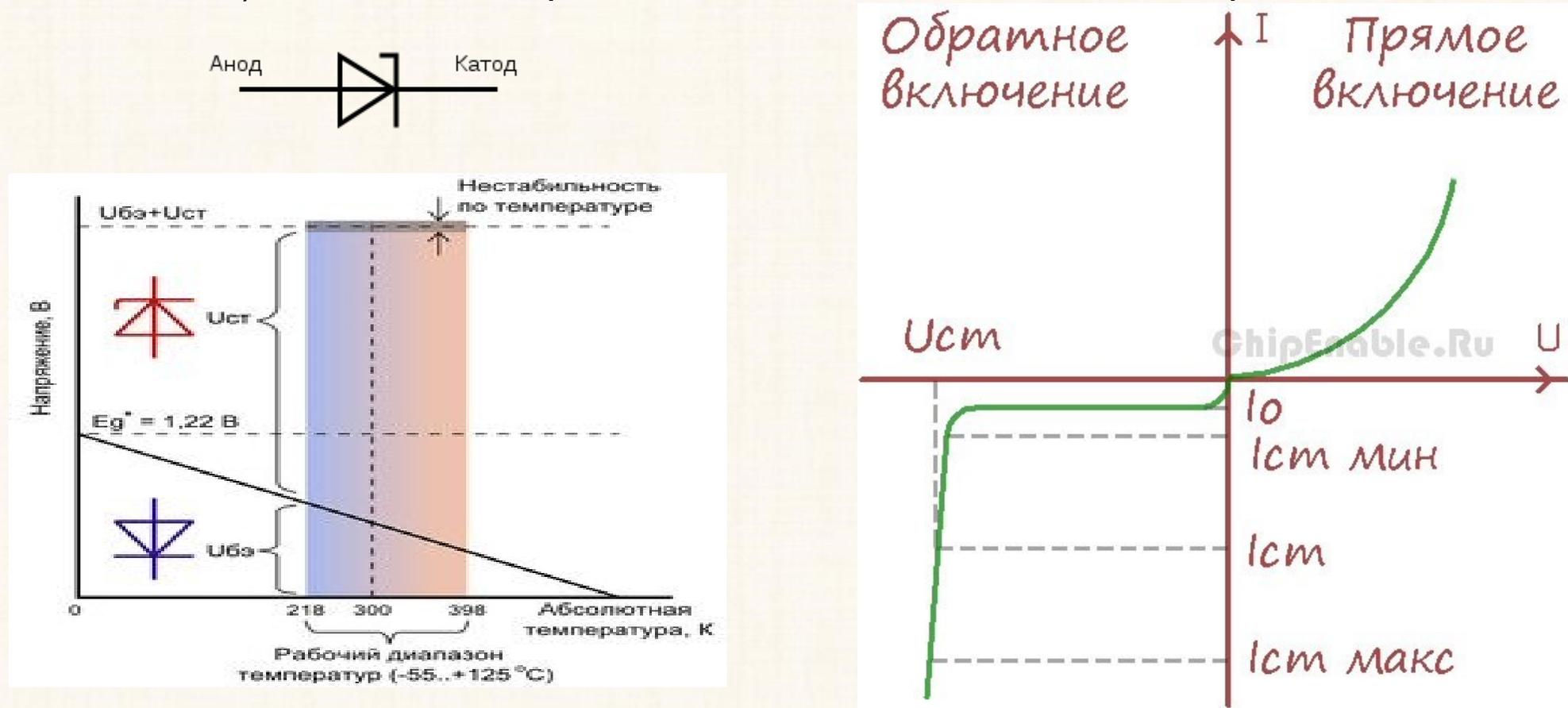
Меры напряжения-1

Мера напряжения – нормальный элемент (Weston cell) – гальванический элемент с раствором сульфата кадмия, ртуть и амальгама кадмия – электроды. **Насыщенный НЭ** – ЭДС=1.01858В, ТК ЭДС – до 50 мкВ/град, стабильность – до 1 мкВ/год. **Ненасыщенный НЭ** - 1.0180...1.0200 В , обладает высокой температурной стабильностью – до 5 мкВ/град!!! Внутреннее сопротивление – до 1 кОм (ток нагрузки не более 1 нА).



Меры напряжения-2

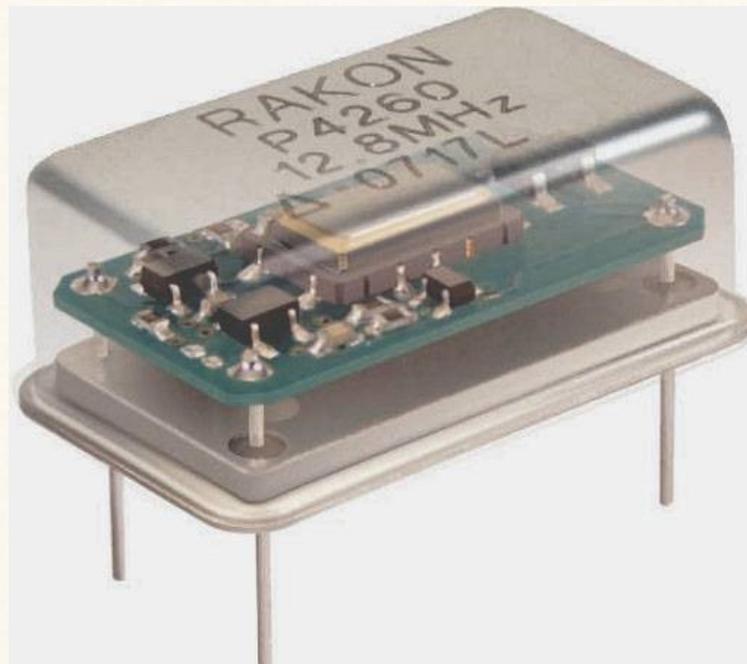
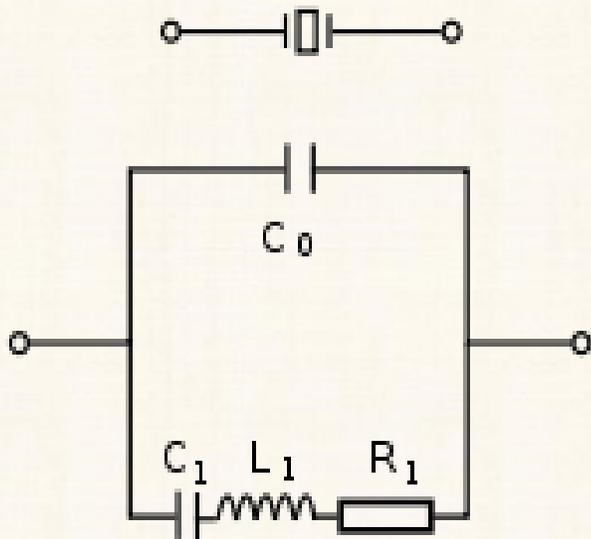
В стандартных приборах мера напряжения – полупроводниковый стабилитрон (Зенеровский диод). Это диод в *обратном включении*. Точность меры до 10^{-6}



При последовательном соединении стабилитрона и диода их температурные коэффициенты взаимно компенсируются (ТКН до $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

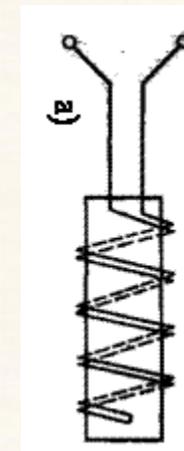
Мера частоты – кварцевый генератор

Частотоподающий контур - **пьезоэлектрический резонатор** в виде пластины кварца с металлизированными поверхностями. Благодаря обратному пьезоэффекту кварцевая пластина колеблется при приложении к ней переменного напряжения. Если его частота приближается к частоте механического резонанса пластины, амплитуда колебаний резко усиливается. Резонатор имеет очень высокую - до сотен тысяч - добротность.



Нестабильность
кварцевых
генераторов порядка
 $10^{-4} \dots 10^{-5}$, При
термостатировании
кварца – до $10^{-6} \dots 10^{-8}$.

Мера сопротивления – образцовый резистор

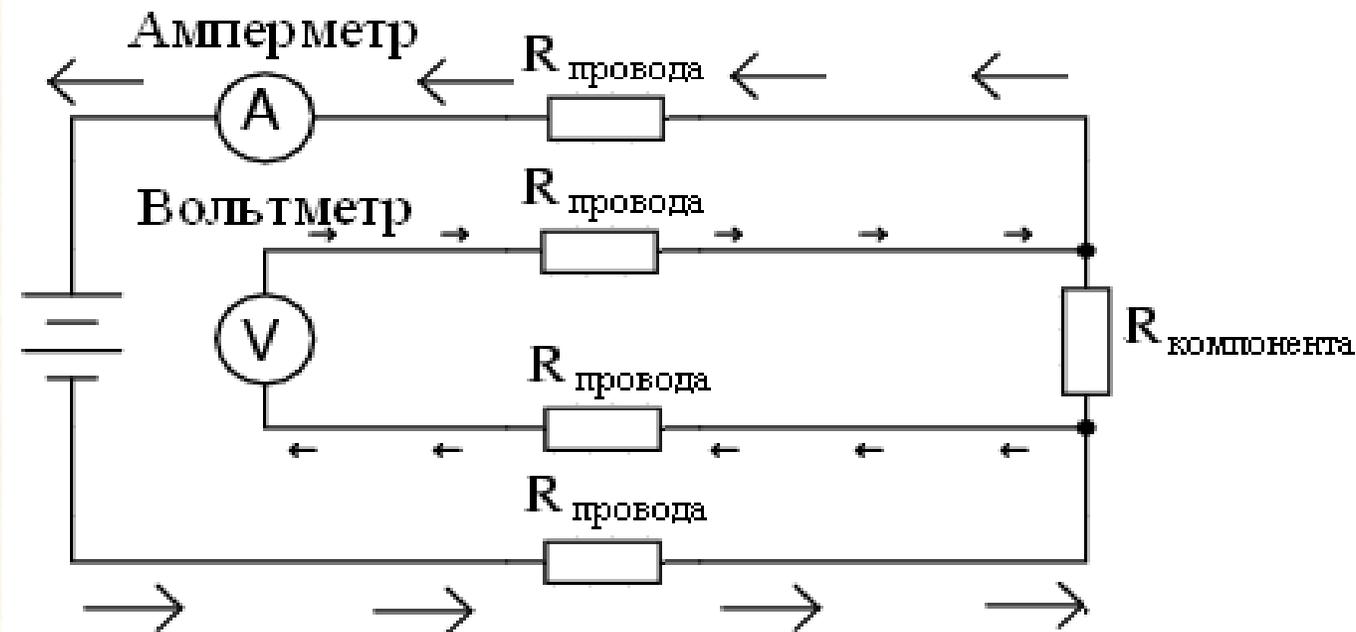


Катушки с безиндуктивной намоткой из манганина
 $TKC=2 \times 10^{-6} 1/^\circ C$.
 Нестабильность 10^{-7} за год.
 Температурную зависимость учитывают расчетным путем

Подключение образцового резистора к вольтметру (метод Кельвина)



$$R_{\text{компонента}} = \frac{\text{Показания вольтметра}}{\text{Показания амперметра}}$$



Мера индуктивности - образцовая катушка

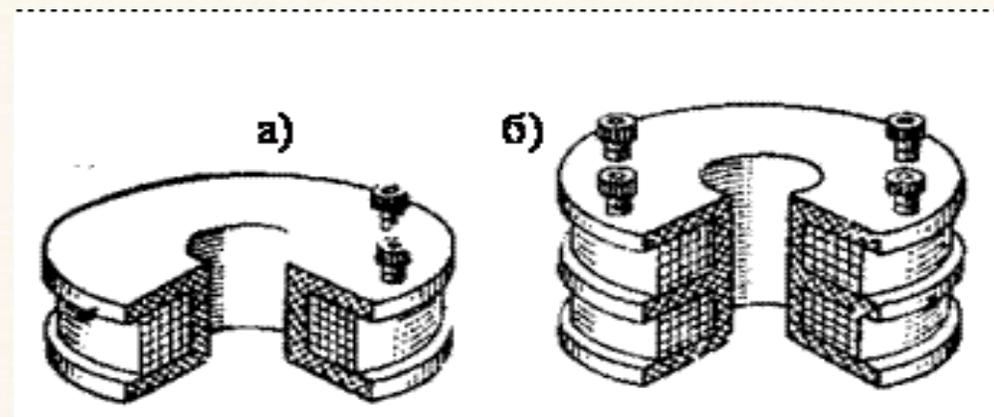
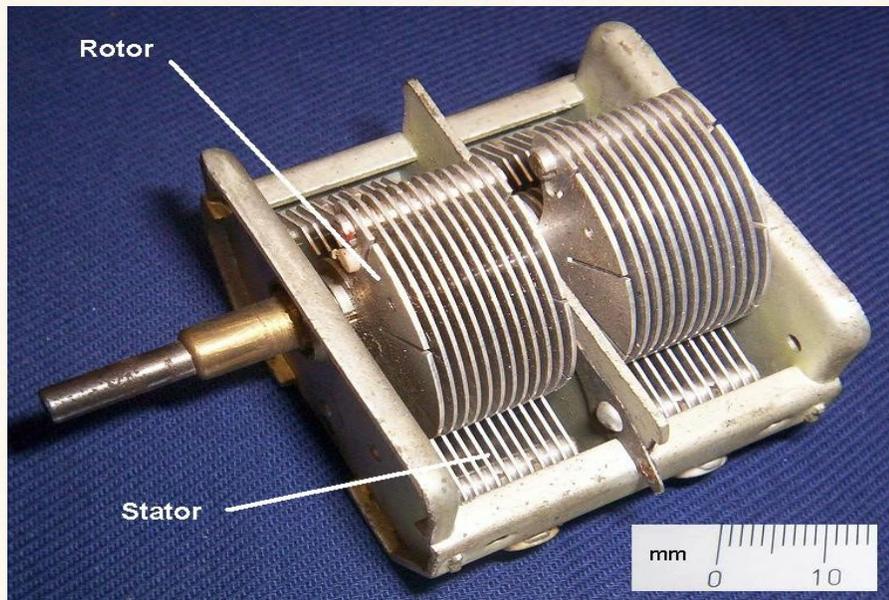


Рис. 5.6. Образцовые катушки:
а) индуктивности, б) взаимной
ИНДУКТИВНОСТИ

Мера емкости - образцовый конденсатор



Измерительный преобразователь

(ГОСТ 16263 - 70) - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Применяются в составе приборов, систем и как самостоятельные средства измерения. Основной параметр ИП – уравнение преобразования!!!

Классификация ИП.

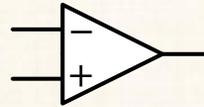
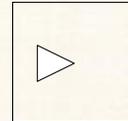
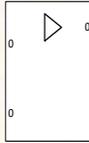
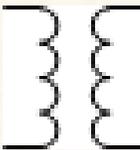
По месту в средстве измерения:

- Первичный ИП (часто называют датчик);
- Промежуточный ИП (в составе измерительного прибора).

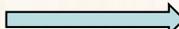
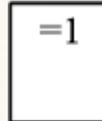
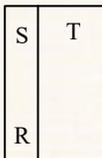
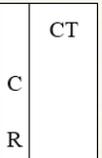
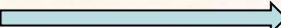
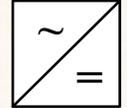
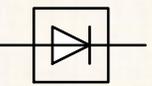
По виду входных и выходных сигналов

- Аналоговые-аналоговые;
- Аналого-цифровые (АЦП);
- Цифро-аналоговые (ЦАП);

Преобразователи уровня измерительных сигналов:

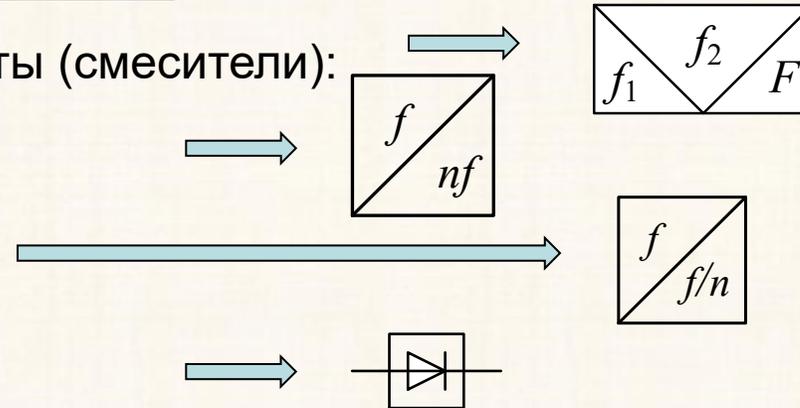
- Делители, шунты, аттенюаторы  
- Усилители    
- Измерительные трансформаторы  

Преобразователи формы измерительных сигналов

- Импульсные устройства     
- Функциональные преобразователи  
- Выпрямители и детекторы   

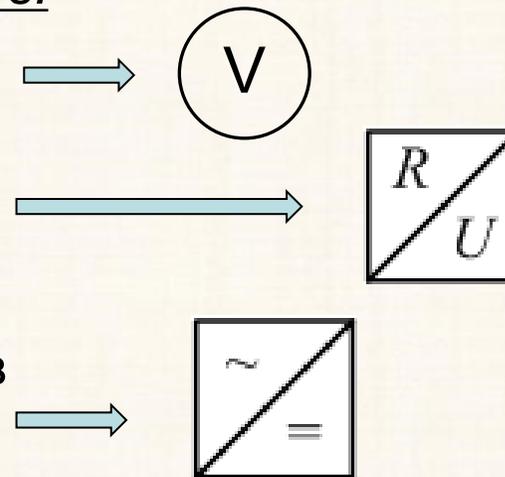
Преобразователи частоты сигналов:

- Преобразователи частоты (смесители):
- Умножители частоты
- Делители частоты
- Детекторы



Преобразователи вида сигналов:

- Электромеханические ИП;
- Датчики неэлектрических величин;
- Преобразователи сигнала в напряжение (детекторы)



Преобразователи аналог-цифра:

- АЦП 
- ЦАП 



Цифровые преобразователи - вычислители:

- Преобразователи кодов:
- Преобразователи вида цифрового сигнала

Параметры измерительных преобразователей

1. Коэффициент преобразования и погрешность его установки
2. Частотная зависимость (для гармонических измерительных сигналов)
3. Стабильность коэффициента преобразования во времени
4. Линейность к-та преобразования (независимость от входного уровня)
5. Быстродействие и инерционность ИП – для негармонических сигналов
6. Разрядность и разрешающая способность - для АЦП и ЦАП
7. Погрешность округления для вычислительных преобразователей

Компараторы и логические устройства

Компаратор – устройство сравнения двух измерительных сигналов

Сравнение по уровню -**компараторы напряжения**. **Частотные компараторы**

(дискриминаторы) – сравнение по частоте. Сравнение временных интервалов – **временной селектор**. Сравнение фазовых углов – **фазовый детектор**.

Выходной сигнал компаратора напряжения бинарный:

- вариант 1- напряжение двух уровней (0..1) (в момент равенства – скачок $0 \Rightarrow 1$ или $1 \Rightarrow 0$)
- вариант 2 - импульс в момент равенства сигналов.

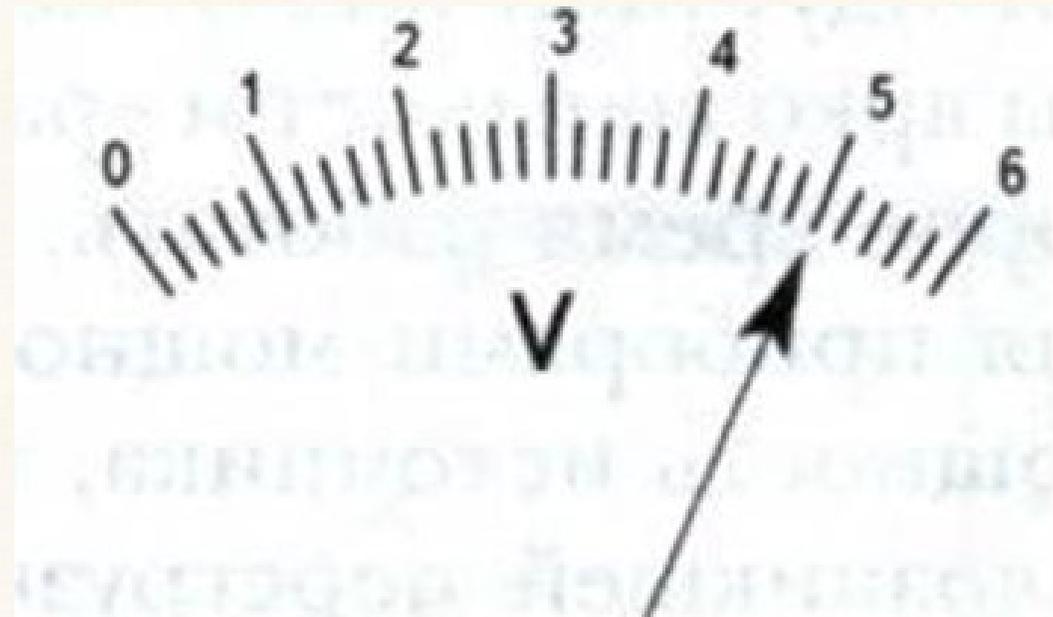
Логические элементы измерительных устройств:

- Инвертор - элемент НЕ
- Логическое сложение – элемент ИЛИ (1)
- Логическое умножение – элемент И (&)

Отсчетные устройства

Аналоговые ОУ:

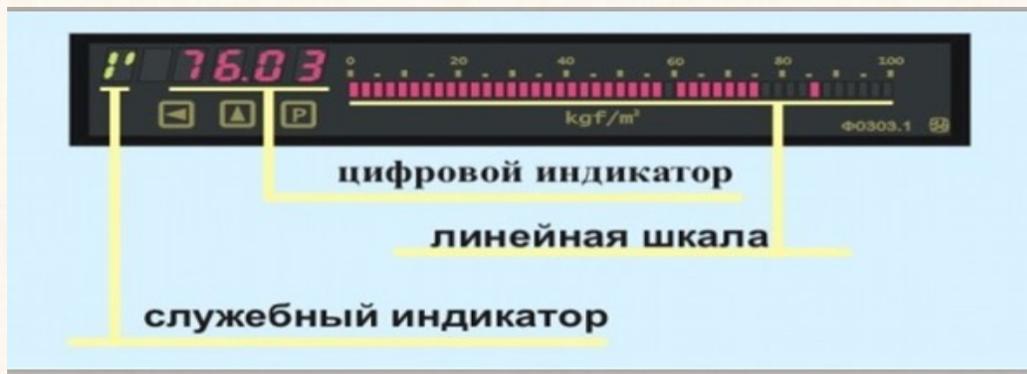
- Шкалы с неподвижным указателем
- Стрелки с неподвижной шкалой
- Световые указатели
- Самопишущие приборы



Отсчетные устройства-2

Дискретные и цифровые

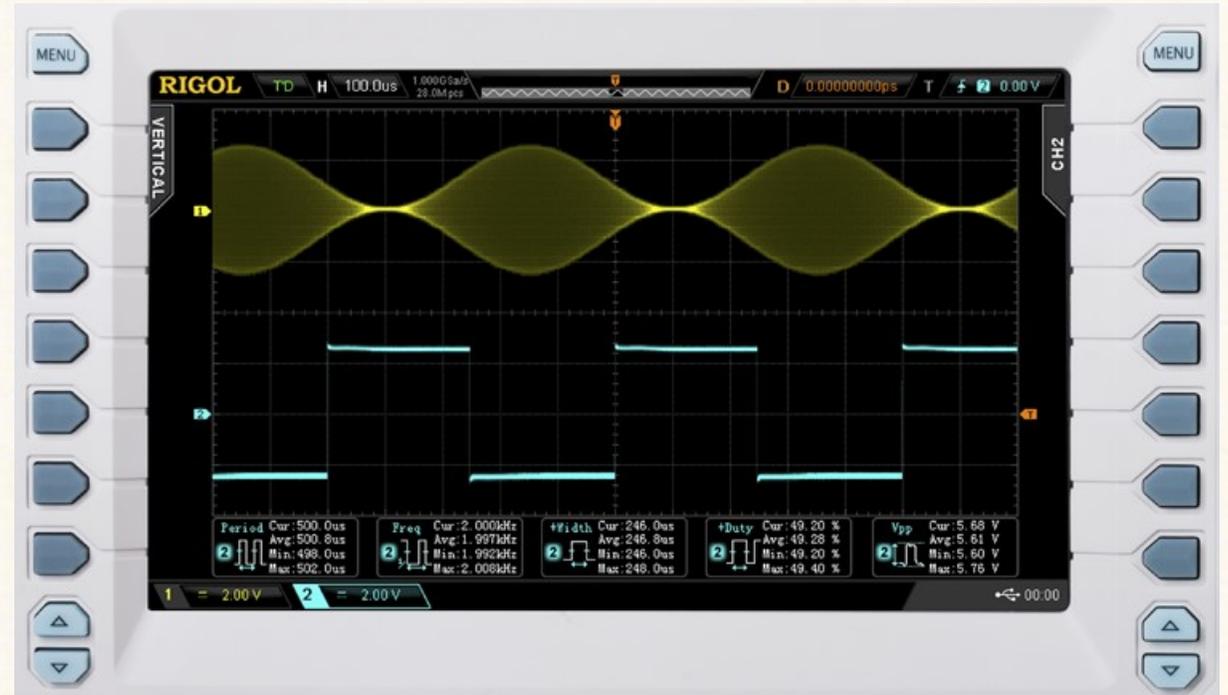
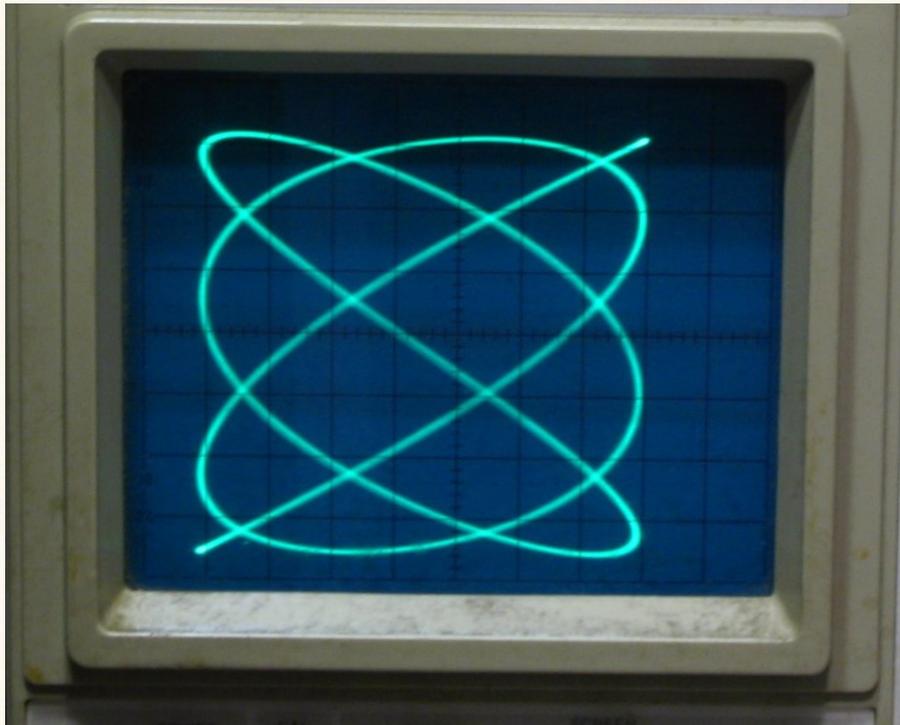
- Цифровые табло
- Принтеры
- Дискретные шкалы



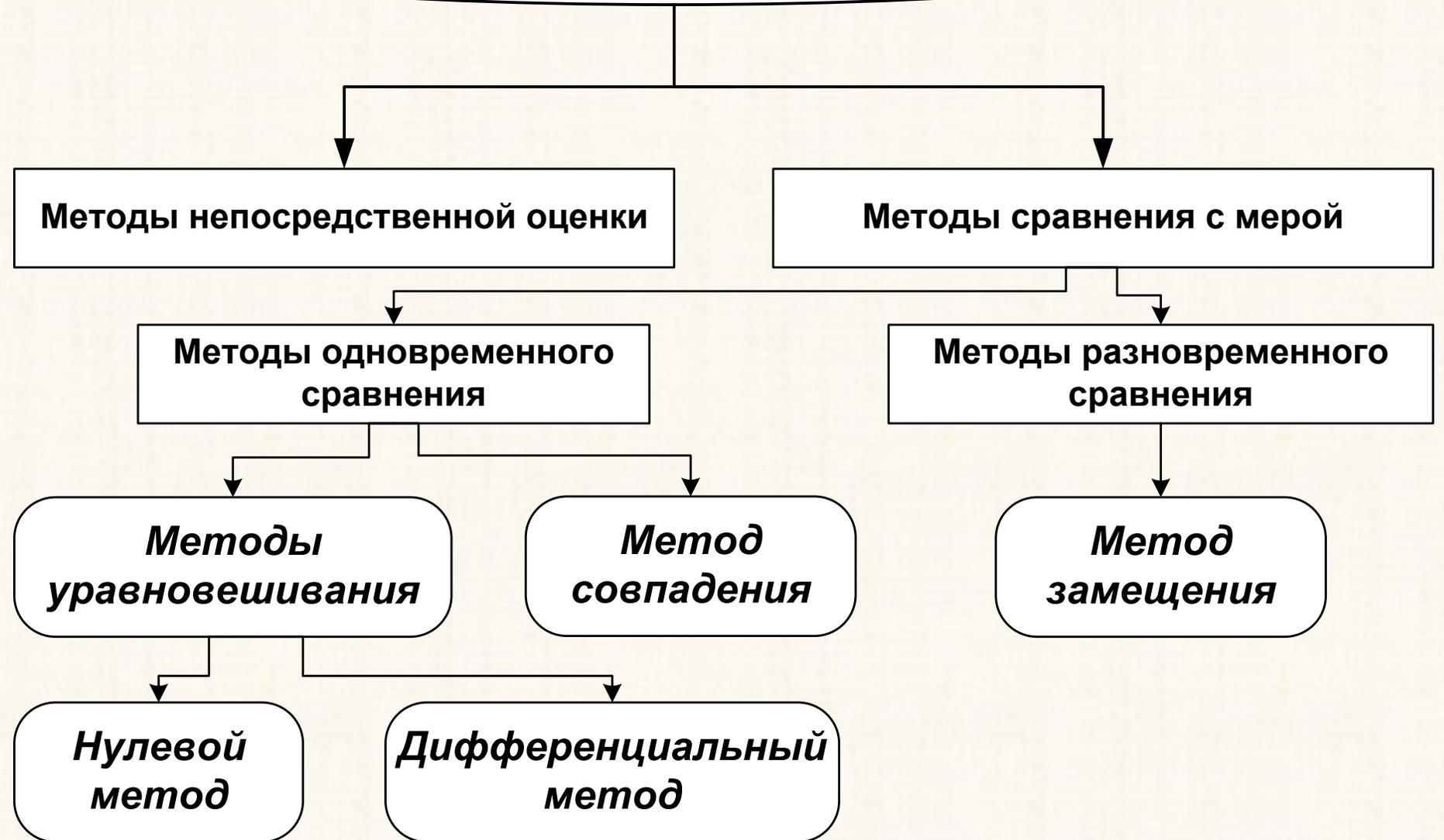
Отсчетные устройства-3

Экраны (ЭЛТ, дисплеи):

- Вывод зависимостей (временных, частотных, ВАХ)
- Цифро-буквенная информация
- Функциональное меню



ОБОБЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ



Общие методы измерения и обобщённые структурные схемы средств измерения

Методы непосредственной оценки -> схема прямого преобразования

Входной сигнал преобразуется и выводится на отсчетное устройство. Численное значение – по шкале предварительно отградуированного прибора. Сравнение с мерой разновременное и осуществляется с помощью промежуточного средства – шкалы отсчетного устройства. Нестабильность градуировки снижает точность.

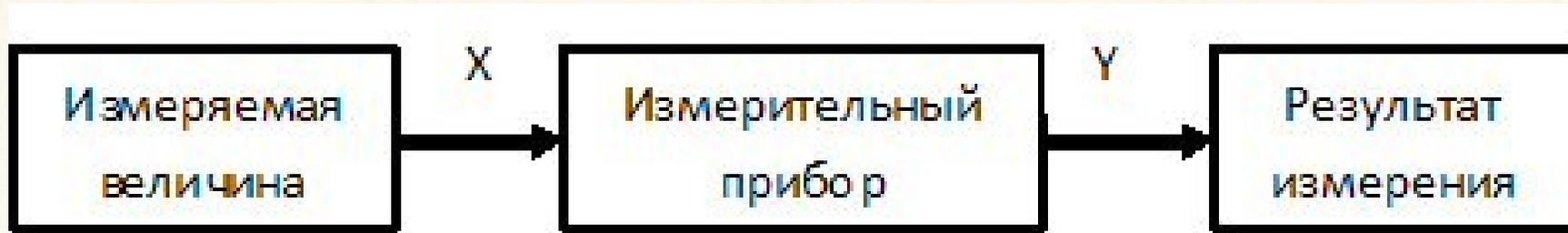


Рис. 2.3. Метод непосредственной оценки

Структурная схема – цепочка измерительных преобразователей

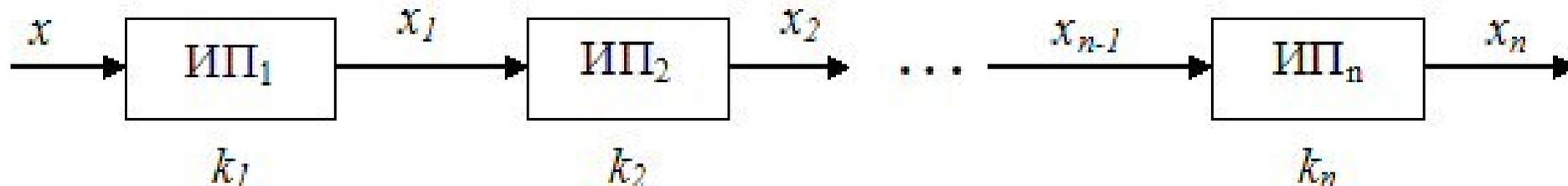
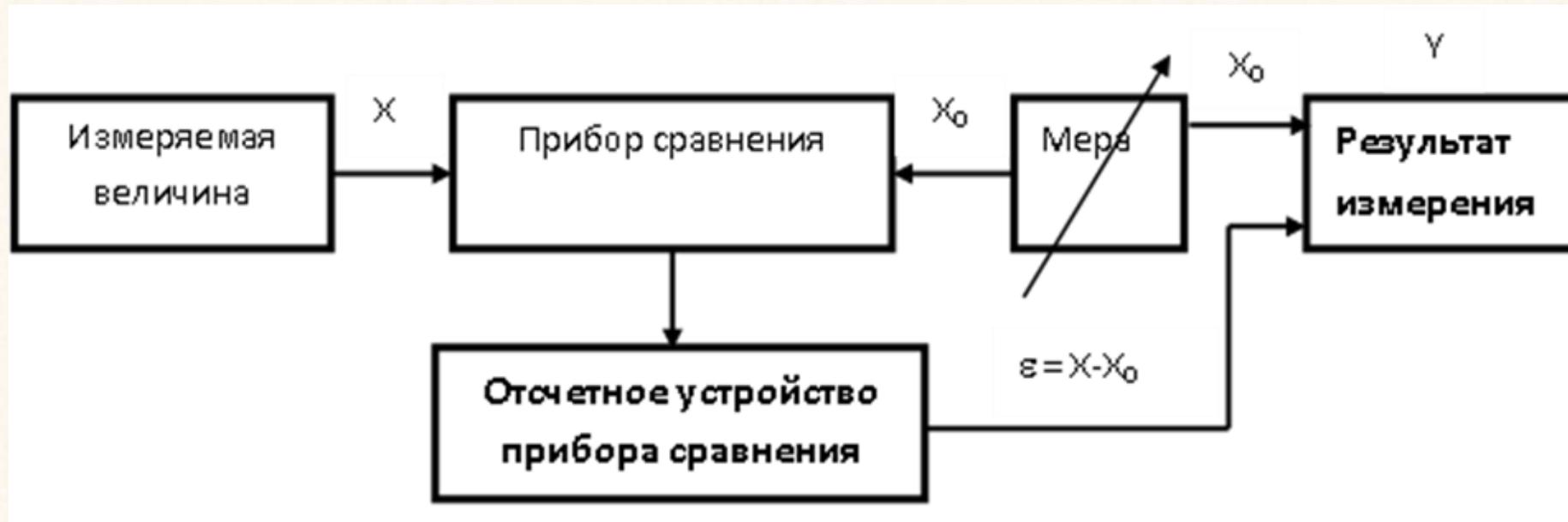


Рис. 3.5. Структурная схема прибора прямого преобразования

Сравнение с мерой -> схема включает меру единицы измерения (эталон). Неизвестную величину сравнивают с мерой. Сравнение может быть одновременным, когда мера и измеряемая величина воздействуют на измерительный прибор одновременно, и разновременным, когда воздействие измеряемой величины и меры на измерительный прибор разнесено во времени.

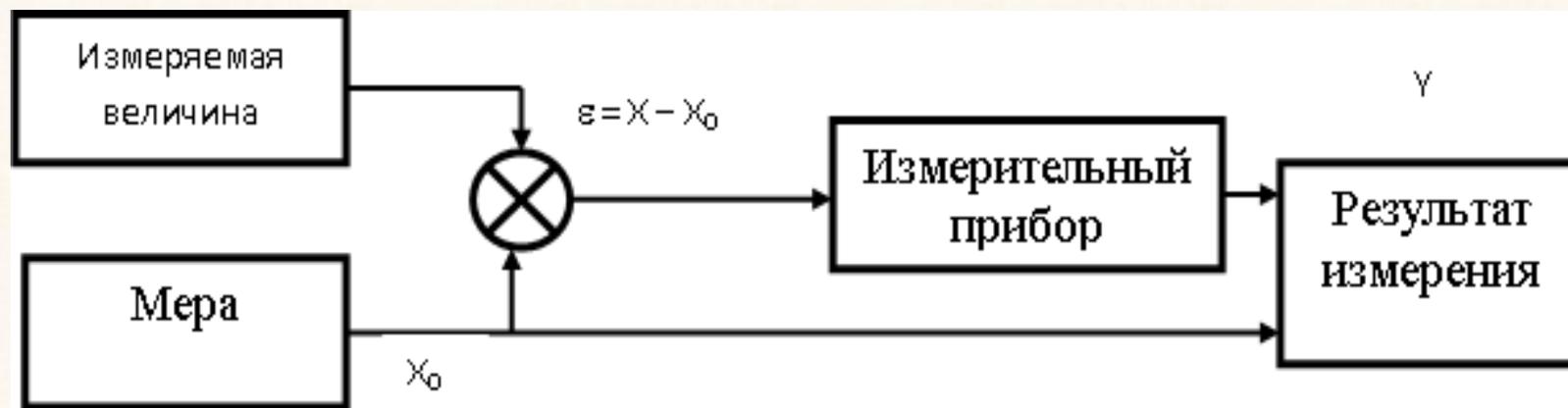
Методы уравнивания (противопоставления) – измеряемая величина и величина меры одновременно воздействуют на компаратор, с помощью которого устанавливают соотношение между этими величинами.



Нулевой метод – метод уравнивания, в котором эффект воздействия величин на компаратор доводят до нуля. Пример – весы с разновесами

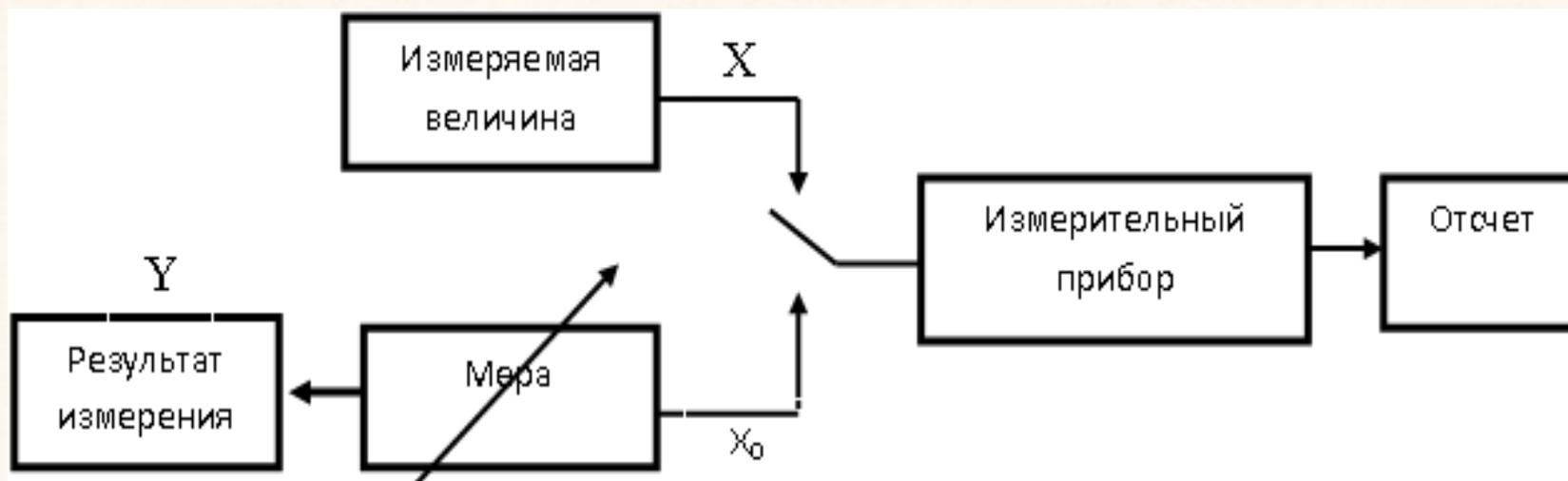


Дифференциальный метод - метод уравнивания, в котором разность определяемой величины и меры не доводится до нуля, а устанавливается заранее заданному значению и фиксируется измерительным прибором.



Метод совпадений (или метод «нониуса») - разновидность метода сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или частот периодических сигналов. Пример – стробоскоп, штангельциркуль

Метод замещения - разновременный метод, в котором измеряемая и образцовые величины по очереди подают на измеритель. Меняя меру, добиваются одинаковых показаний. Погрешности измерительного прибора мало влияет на результат измерений.





Факультет радиотехники и
телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ
радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
“ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

***«Основы метрологии и радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)***

***Метрология. Погрешности
измерений***

Санкт-Петербург
2024 г.

Классификация погрешностей измерений

Погрешность – отклонение результата измерения от **истинного** (или **действительного**) значения измеряемой величины.

Классификация:

По форме выражения:

- **Абсолютная**
- **Относительная**
- **Приведенная**

$$\Delta = x - x_{ист}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{ист}}$$

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta}{x_{макс}}$$

По причине возникновения:

- **Методическая:**
 - Несовершенство метода И., упрощение модели объекта
 - Взаимное влияние средства И. и объекта И.
 - Приближенные вычисления в косвенных И.
 - Погрешность дискретности (округление результата)
- **Инструментальная** (аппаратная) – задается *метрологическими параметрами средства измерения:*
 - Несовершенство средства И.
 - Внутренние шумы в средстве И.
 - Влияние внешней среды на результата И.
- **Субъективная:**
 - Индивидуальные свойства оператора, влияющие на результат И., параллакс и др.

По закономерности проявления:

- **Систематические**

- Постоянная часть общей П. при повторных измерениях
- Закономерно меняющаяся часть общей П.

Смещение нуля, температурный уход параметров, старение средств измерения, погрешность градуировки. Систематические П. надо уметь обнаруживать и **ИСКЛЮЧАТЬ!!!!**

- **Случайные** - изменяющиеся случайно при повторных И. Учитываются методами математической статистики путем **ОЦЕНКИ** их величины.

- **Грубые П.** (промахи) - существенно превышающие оценку П. Обычно возникают из-за резкого изменения параметров И., ошибки оператора и пр..

Надо выявлять и **ИСКЛЮЧАТЬ!!!**

Метрологические характеристики средств измерения

Для обеспечения единства измерений требуется **нормировать** метрологические параметры СИ.

Метрологические характеристики СИ:

- Функция преобразования, цена деления, размерность индикатора, градуировочная характеристика
- Порог чувствительности, рабочий диапазон частот и пр.
- Входной импеданс (входное сопротивление, емкость и пр.)
- Динамические характеристики (переходная и импульсная хар-ки, время установление и пр.)
- Оценка инструментальной погрешности измерений → **предел допустимой погрешности СИ**);

Условия определения метрологических характеристик :

- *НОРМАЛЬНЫЕ условия* – для них указывают предел основной П.

Стандартные нормальные условия : температура 20 ± 0.1 градусов, напряжение питания 220 ± 5 В, частота питания 50 Гц и пр.

- *РАСШИРЕННЫЕ условия* – нормируется *дополнительная П.* – например в условиях тропиков, космоса и пр.

Нормирование точности средства измерения

ГОСТ 8.011-85 «Показатели точности и формы представления результатов измерений»

ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

ГОСТ 8.401-80 «Классы точности средств измерений»

Оценка точности средств измерений – **установка предела допускаемой погрешности в нормальных и расширенных условиях** (упрощенно – ОСНОВНАЯ и ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ П. средства измерения)

Класс точности СИ:

Это оценка предела допускаемой погрешности сверху (при вероятности достоверности оценки, практически равной единице)

Три вида выражения класса точности:

1. Предел допускаемой основной *приведенной* P , выраженной в %. Применяется для СИ с аддитивной компонентой P . (постоянна абсолютная погрешность). Обозначается десятичным числом (например, 1.0, 2.5 и т.д.) из ряда $(1, 1.5, 2, 2.5, 4, 5, 6) \times 10^n$
2. Предел *относительной* допускаемой погрешности в %. Применяется при мультипликативном виде P (относительная погрешность постоянна). Обозначается в кружочке или в скобках, встречается реже
3. Класс точности *цифровых* приборов: Обозначается как c/d (например, 0.01/0.02)

$$\delta = c + d \left(\frac{x_{\max}}{x} - 1 \right), \%$$

Достоинства задания предела погрешности классом точности:

- Простота использования
- Пригоден для всех средств измерения данного типа
- Определяется при изготовлении или поверке прибора
- Зная класс точности, можно легко оценить абсолютную погрешность I . :

$$\Delta = \frac{(\text{Класс точности}) \cdot x_{\max}}{100\%}$$

Недостатки описания классом точности:

- Не учитываются реальные свойства конкретного СИ
- Сильно завышенная оценка
- Не учитываются функциональные зависимости погрешности от уровня сигнала, частоты и пр.
- Не разделяются систематическая и случайная погрешности

Другие способы оценки точности СИ:

- Прямое указание пределов погрешности в виде **функциональной зависимости** от влияющих факторов ξ . Например линейная

зависимость:
$$\delta = a + \sum_i a_i \xi_i$$

Пример:

$$\delta f_x = \delta f_{кв} + \frac{1}{f_x \cdot T_{сч}}$$

- Задание предела погрешности в виде таблиц и графиков *зависимостей от параметров*.
- Статистический метод – предел погрешности определяют из известных **статистических свойств погрешности** – закона распределения, дисперсии, мат. ожидания.

Оценка погрешности результатов измерения

Результат измерения принято выражать с указанием погрешности, которую надо ОЦЕНИТЬ.

- **«Точное»** оценивание- учитывают индивидуальные метрологические свойства СИ, методические погрешности , контролируются условия измерения.
- **Приближенное** оценивание – учитывают только нормативные основные характеристики СИ, оценивают отклонение условий измерения.
- **Предварительное** оценивание – выполняется по методикам , указанным в нормативно-технической документации, где приводится заранее определенная оценка погрешности. Чаще всего используют в инженерной практике (*технические измерения*). – за оценку берут предел допускаемой погрешности СИ.

Точечная и интервальная оценка погрешности результатов измерения

Общая погрешность делится на *систематическую* часть (которая выражается постоянным числом либо известной зависимостью) и *случайную* часть.

Оценка случайной части может быть *интервальной* или *точечной*..

Интервальная оценка – указывается интервал, куда с заданной вероятностью попадает погрешность результат измерения (доверительные границы погрешности или доверительный интервал). Для интервальной оценки надо знать закон распределения случайной погрешности.

Точечная оценка – указываются отдельные параметры погрешности (например математическое ожидание и СКО, максимальная погрешность). Точечная оценка – это интервальная с доверительной вероятностью $\Rightarrow 1$

Способы записи результатов измерения с учетом оценки погрешности (правила округления результата)

Погрешность округляют до **одной значащей (ненулевой) цифры** слева, если эта цифра **больше 2**, или до **двух** первых цифр, если **меньше.2** Например: 220.0 ± 1.5 , 220.0 ± 0.5

Записывают результат измерения с абсолютной (иногда и с относительной) погрешностями:

$$x = x_{\text{изм}} \pm \Delta, \delta = \dots$$

В результате измерения указывается **то количество значащих цифр**, которое соответствует *округленной погрешности* (последними справа оставляют цифры тех разрядов, которые сохранились в погрешности после ее округления).

Пример: $U = (220.0 \pm 0.1) \text{ В}$, $U = (220 \pm 1) \text{ В}$, $U = (22 \pm 1) \cdot 10 \text{ В}$

Правила округления результата

Лишние цифры в целых частях заменяют нулями, в дробных –отбрасывают.

Если **старшая цифра отбрасываемой части** < 5 \rightarrow оставшиеся цифры **не меняют**

(235435 округляем до 4 цифр \Rightarrow 235400; 235.435 \Rightarrow 235.4).

Если **старшая цифра отбрасываемой части** > 5 или **равна 5 и остальные цифры**

не все нули – последняя оставляемая цифра **увеличивается на единицу** (235598 \Rightarrow 235600;

2352.56 \Rightarrow 2353)

Если **старшая цифра отбрасываемой части равна 5** и остальные цифры- нули, то

последнюю оставляемую цифру **не меняют**, если она четная, и **увеличивают на 1** – если

нечетная. (1622.5 \Rightarrow 1622; 1623.5 \Rightarrow 1624)

Примеры записи результатов измерения с указанием ОЦЕНКИ погрешности:

Предварительная запись	Стандартная форма записи
$U = (5281,12 \pm 1524) \text{ мВ}$	$U = (5,3 \pm 1,5) \cdot 10^3 \text{ мВ}$
$I = (0,418 \pm 0,042) \text{ А}$	$I = (0,42 \pm 0,04) \text{ А}$
$R = (0,03643 \pm 0,00021) \text{ Ом}$	$R = (36,43 \pm 0,21) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$
$f = (125,3 \pm 41) \text{ Гц}$	$f = (0,13 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ Гц}$
$t = (8,72 \cdot 10^2 \pm 30) \cdot 10^{-1} \text{ мс}$	$t = (87 \pm 3) \text{ мс}$

Систематические погрешности

Систематическая П. – постоянная часть (или закономерно меняющаяся) часть общей П при **повторяющихся** опытах. Одна и та же **физ. величина** при тех же **условиях**. Пример:

- погрешность градуировки ЭМП;
- Температурный дрейф показаний;
- Помеха регулярного вида (периодическая систематическая П.);
- Старение средства И., разрядка батарей и пр.

Обозначение => Θ . Необходимо выявлять и исключать!!!! Остаток - неисключенная систематическая П. (НСП). Для нескольких СП общая СП есть сумма частных П.с учетом знака!!!!

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \Theta_i$$

Графики временных зависимостей систематических погрешностей при повторных измерениях

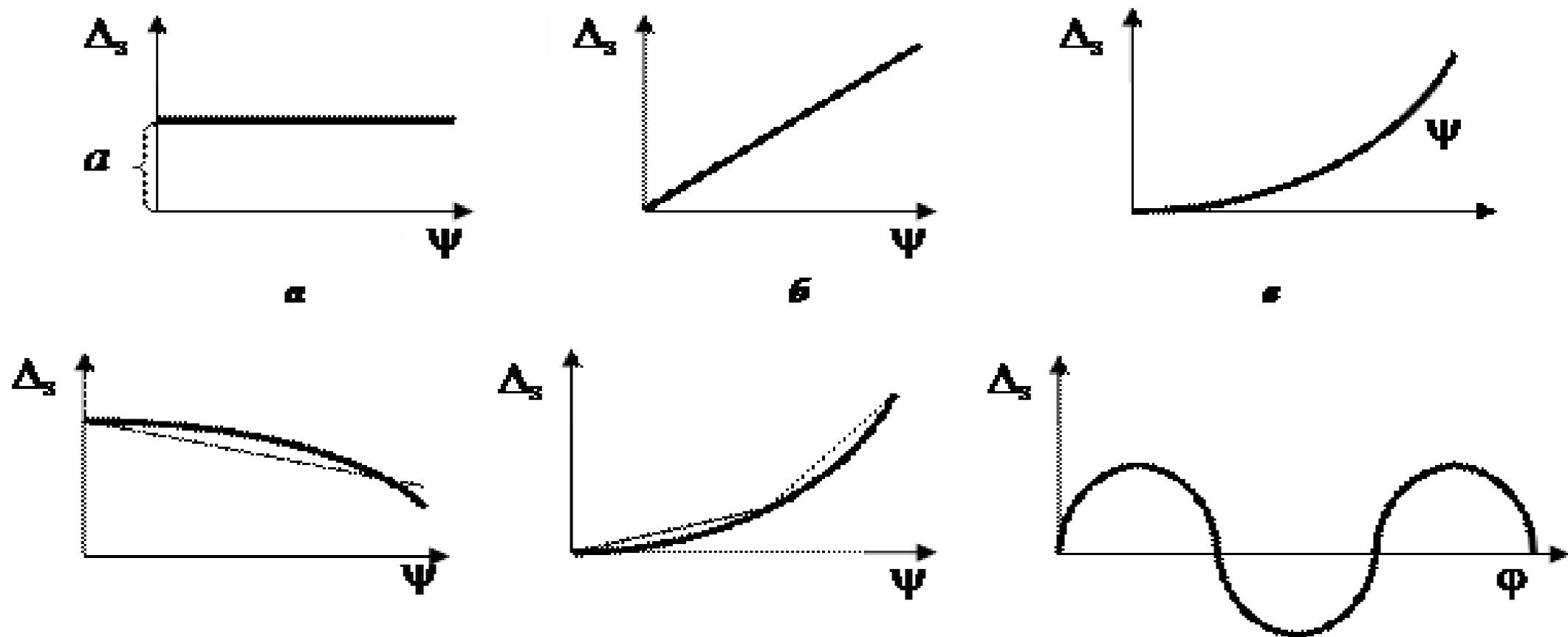


Рисунок 5.4 – Виды простейших систематических погрешностей:
а – постоянные, **б, в** – прогрессирующие (линейная и нелинейная), **г, д** – прогрессирующие нелинейные (предложены варианты аппроксимации прямыми линиями), **е** – периодические (гармонические).

Три группы систематических П.

- Известна причина появления СП и ее величина. Пример: температурная зависимость образцового резистора.
- Причина известна, неизвестна величина СП. Например, дрейф нуля вольтметра.
- Причина и величина СП неизвестны. Например, НСП после исключения всех известных СП.

Методы исключения систематических П. –

1. До измерения (*априорное*).
2. Во время измерения.
3. После измерения (*апостериорное* -обработка опытных данных).

1. Априорные способы (до измерения)

- **Стабилизация** функции преобразования (стабилизация градуировочной характеристики)
- **Минимизация влияния** влажности (вентилятор, радиатор), температуры (термостатирование, минимальный ТКЕ, ТКР), уменьшение внешних помех (экранировка, гальваническая развязка), снижение неустойчивости питания (стабилизаторы напряжения питания).
- **Параметрическая стабилизация** измерительных преобразователей (например, датчики температуры и пр.), использование глубокой ООС
- **Калибровка** – предварительная регулировка параметров средства И. для устранения СП. Пример: установка нуля.

2. Во время опыта

- Метод **замещения** – использование образцовых мер для замещения измеряемой величины (СП входит в оба опыта и устраняется)
- **Самокалибровка** – автоматическая компенсация СП путем практически одновременного измерения исследуемой и образцовой величин (**метод образцовых сигналов**)
- Компенсация СП **по знаку** – метод , в котором СП входит в результат с разным знаком (люфты, паразитные термоЭДС).
- Метод **вспомогательных (совместных)** измерений исследуемой величины и влияющих факторов.
- **Рандомизация** – перевод СП в случайную. Подходит для закономерно меняющихся СП.

3. Апостериорная (послеопытная)

- Введение **поправок** и поправочных множителей. Определяются заранее при поверке СИ. Задаются в виде таблиц, графиков, формул, алгоритмов.
- **Расчетный** метод введения поправок на основе теоретической модели измерений.

После исключения остается *неисключенная систематическая П.* **(НСП)**.

Ее границы определяют расчетным путем на основе априорной информации – закон распределения считаем равномерным. Другой вариант – измерение резко отличным способом. Остаток НСП добавляют в общую погрешность вместе со случайной П.

Случайные погрешности

Случайная П. – неповторяющаяся часть общей П. при повторяющихся опытах. Измеряется одна и та же физ. величина при тех же условиях. Часто обозначают ε . Причины появления Сл.П:

- Внутренние шумы средства измерения
- Погрешности дискретизации и квантования
- Быстрые флуктуации условий измерения (колебания температуры, питающих напряжений).

Математическая модель Сл.П. – случайный «эргодический» процесс с нулевым мат. ожиданием. Опытные данные - реализация этого процесса (случайной величины).

Законы распределения случайной погрешности

Плотность вероятности и интегральный закон распределения задает вероятность появления погрешности от ее значения.

$$p(\Delta), \quad F(\Delta) = \int_{-\infty}^{\Delta} p(x)dx, \quad p(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta}$$

Важно!! Закон распределения позволяет оценить вероятность попадания погрешности в интервал

$$P(\Delta_n \leq \Delta \leq \Delta_e) = \int_{\Delta_n}^{\Delta_e} p(x)dx = F(\Delta_e) - F(\Delta_n)$$

Для симметричного интервала относительно нуля

$$P(|\Delta_e| \leq \Delta) = 2 \int_0^{\Delta_e} p(x)dx$$

Параметры закона распределения

(моменты закона распределения)

Математическое ожидание (среднее значение) . Для случайной П. должно быть равно нулю.

Дает оценку систематической погрешности.

$$M(\Delta) = \bar{\Delta} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) dx \Rightarrow \Theta$$

Дисперсия -центральный момент второго порядка. Характеризует разброс погрешности относительно среднего значения.

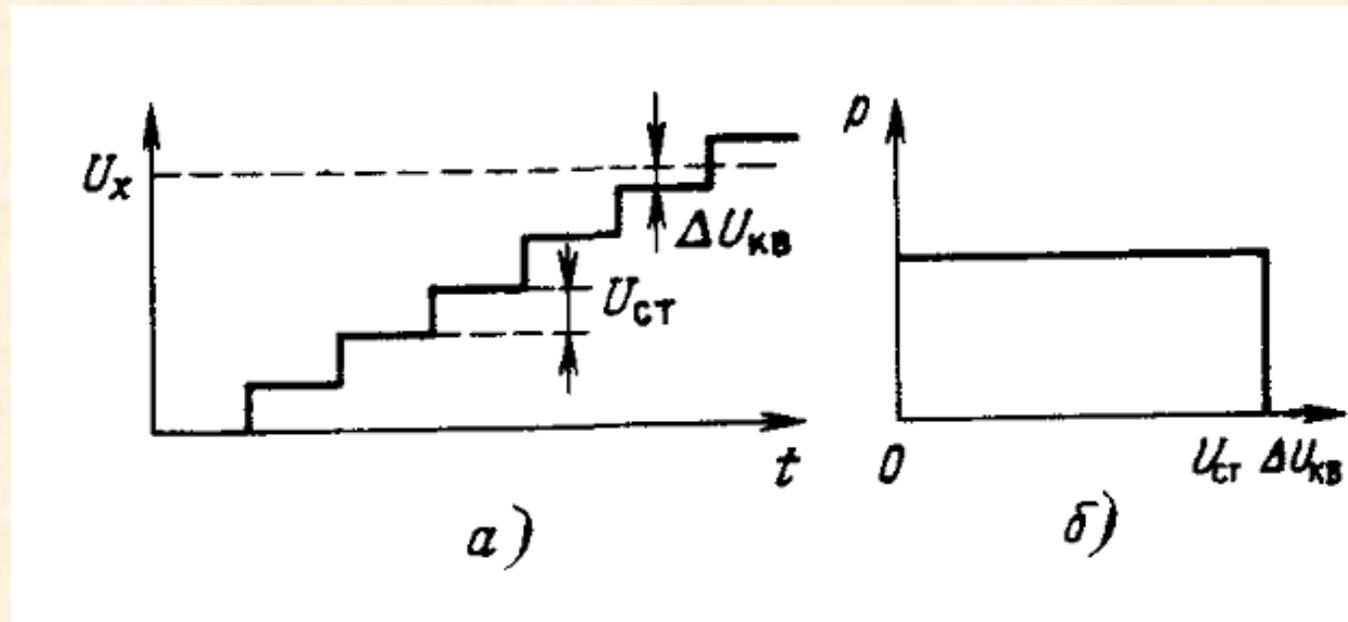
Среднеквадратическое отклонение (СКО, σ) - корень из дисперсии

$$D(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{\Delta})^2 \cdot p(x) dx = \sigma^2$$

Стандартные законы распределения

Равномерный закон. Характерен для АЦП, отсчета по шкале, погрешности округления для косвенных измерений. Пример: АЦП с ступенькой $U_{ст}$

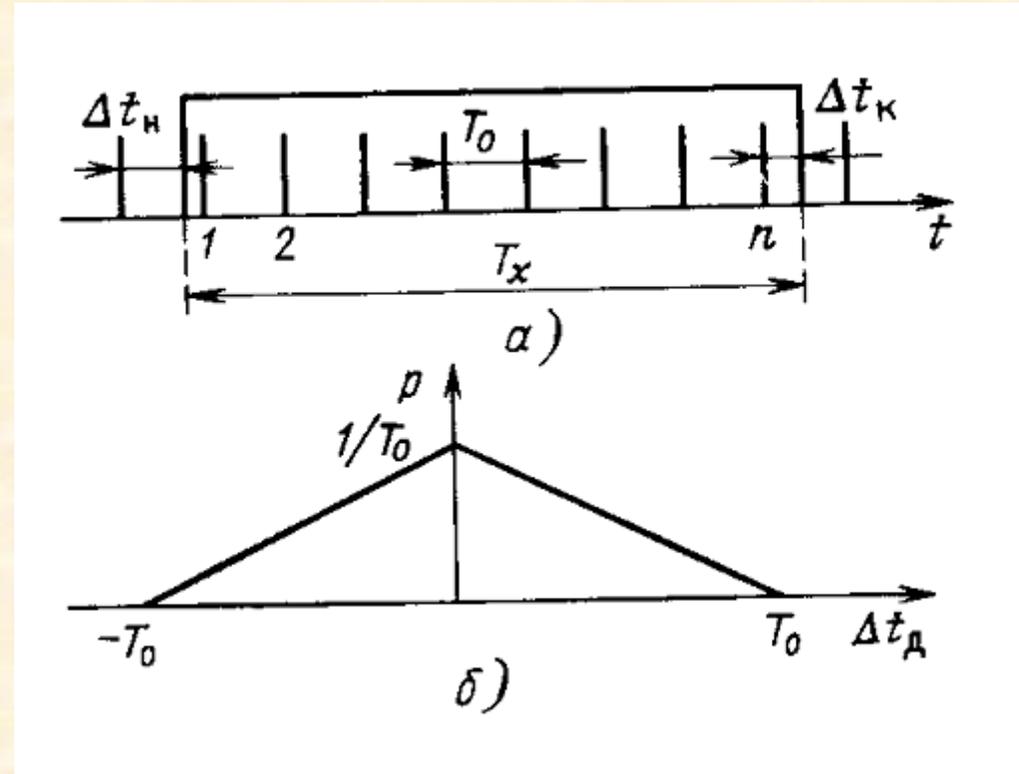
$$p(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{U_{ст}}, & 0 \leq \Delta \leq U_{ст} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad \bar{\Delta} = \frac{U_{ст}}{2}, \quad \sigma = \frac{U_{ст}}{\sqrt{12}}$$



Треугольный закон (закон Симпсона). Характерен, например, для измерения частоты методом дискретного счета

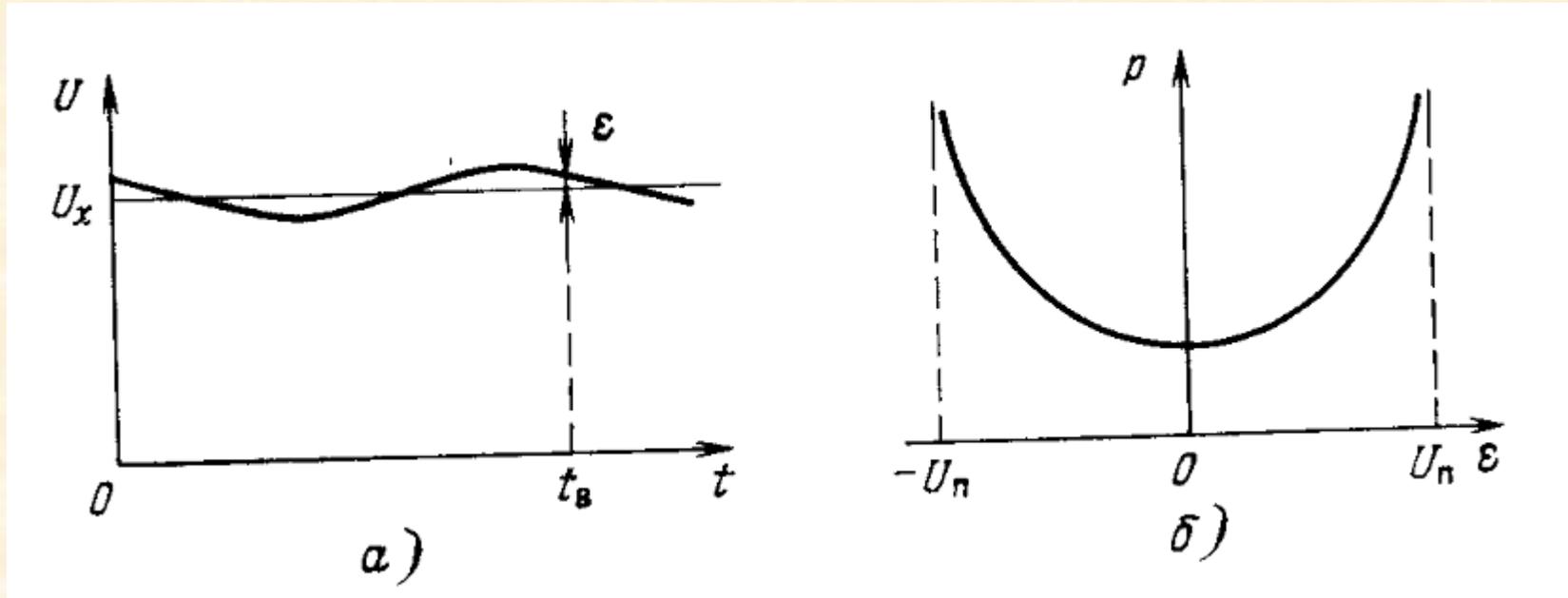
$$p(\Delta) = \begin{cases} \frac{T_0 + \Delta}{T_0^2}, & \Delta \leq 0 \\ \frac{T_0 - \Delta}{T_0^2}, & \Delta > 0 \end{cases}$$

$$\bar{\Delta} = 0, \quad \sigma = \frac{T_0}{\sqrt{6}}$$



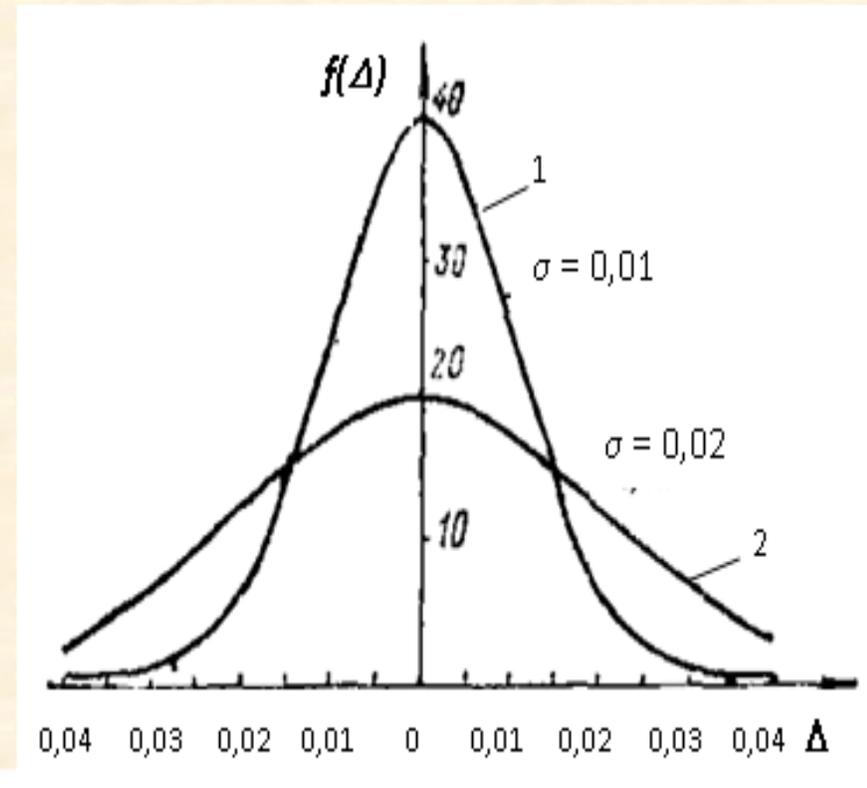
Закон арксинуса. Характерен для вольтметров постоянного напряжения, когда на вход поступает помеха переменного напряжения U_n со случайной фазой

$$p(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{(U_n^2 - \Delta^2)}} \quad \bar{\Delta} = 0, \quad \sigma = \frac{U_n}{\sqrt{2}}$$

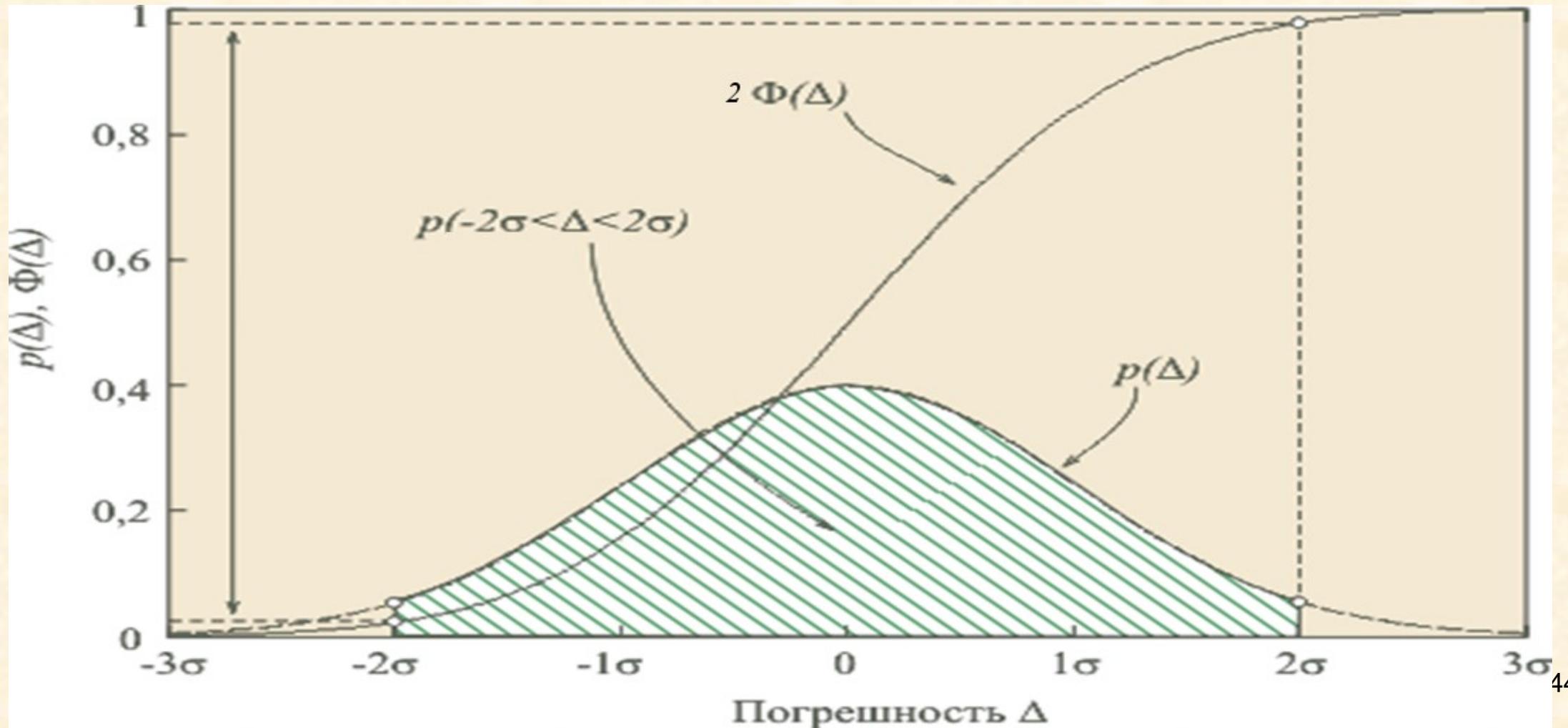


Нормальный закон распределения (Гаусса). Применяется в большинстве случаев, когда закон неизвестен. Центральная предельная теорема - закон распределения стремится к нормальному при возрастании числа влияющих факторов

$$p(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(\Delta - \bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}\right)$$



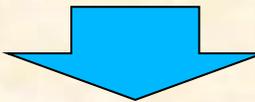
$$P(|\Delta| \leq \Delta_e) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\Delta_e}{\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt = 2\Phi\left(\frac{\Delta_e}{\sigma}\right)$$



Интеграл вероятности $\Phi(x)$ (интегральная нормальная функция, интеграл вероятности Гаусса, функция Лапласа, интеграл ошибок)

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

Целые и десятые доли x	Сотые доли x									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,3	0,8054	0,8098	0,8132	0,8165	0,8198	0,8230	0,8262	0,8293	0,8324	0,8355
1,4	0,8385	0,8415	0,8444	0,8473	0,8501	0,8529	0,8557	0,8584	0,8611	0,8638
1,5	0,8664	0,8690	0,8715	0,8740	0,8764	0,8789	0,8812	0,8836	0,8859	0,8882
1,6	0,8904	0,8926	0,8948	0,8969	0,8990	0,9011	0,9031	0,9051	0,9070	0,9090
1,7	0,9109	0,9127	0,9146	0,9164	0,9181	0,9199	0,9216	0,9233	0,9249	0,9265
1,8	0,9281	0,9297	0,9312	0,9327	0,9342	0,9357	0,9371	0,9385	0,9392	0,9412
1,9	0,9426	0,9439	0,9451	0,9464	0,9476	0,9488	0,9500	0,9512	0,9523	0,9533
2,0	0,9545	0,9556	0,9566	0,9576	0,9586	0,9596	0,9606	0,9916	0,9925	0,9634
2,1	0,9643	0,9651	0,9660	0,9668	0,9676	0,9684	0,9692	0,9700	0,9707	0,9715
2,2	0,9722	0,9729	0,9736	0,9743	0,9749	0,9756	0,9762	0,9768	0,9774	0,9780
2,3	0,9786	0,9791	0,9797	0,9802	0,9807	0,9812	0,9817	0,9822	0,9827	0,9832
2,4	0,9836	0,9841	0,9845	0,9849	0,9853	0,9857	0,9861	0,9865	0,9869	0,9872
2,5	0,9876	0,9879	0,9883	0,9886	0,9889	0,9892	0,9895	0,9898	0,9901	0,9904
2,6	0,9907	0,9910	0,9912	0,9915	0,9917	0,9920	0,9922	0,9924	0,9926	0,9928
2,7	0,9931	0,9933	0,9935	0,9937	0,9939	0,9940	0,9942	0,9944	0,9946	0,9947
2,8	0,9949	0,9951	0,9952	0,9953	0,9955	0,9956	0,9958	0,9959	0,9960	0,9961
2,9	0,9963	0,9964	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972

$$2\Phi\left(\frac{\Delta \epsilon}{\sigma}\right)$$


0.66	1	2	3
0.500	0.683	0.954	0.997

Точечные оценки параметров распределения Сл.П.

Оценка параметров – из опытных данных в отдельных дискретных точках (ТОЧЕЧНАЯ оценка). Оценка должна быть :

- Несмещенной - мат. ожидание есть оценка параметра
- Состоятельной - сходится по вероятности к параметру
- Эффективной – имеет наименьшую дисперсию

$$\tilde{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i, \quad \tilde{\Delta} \rightarrow \bar{\Delta} \text{ при } N \rightarrow \infty$$

Оценка
мат.ожидания
погрешности

Оценка **дисперсии и СКО** погрешности **однократного И.**

$$\tilde{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2, \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}$$

Оценка дисперсии и СКО погрешности многократного И. , для которого результат есть среднее от опытных данных

$$\tilde{D} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2, \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}$$

Точечная оценка показывает разброс результатов (предел допускаемой погрешности) , но не говорит об вероятности попадания в этот предел. Не учитывает вида распределения – предполагается близость к нормальному закону.

Результат измерения величины x записываем в виде оценки через среднее с указанием СКО

$$\tilde{x} = \bar{x} \pm \tilde{\sigma}$$

Интервальные оценки параметров законов распределения Сл.П.

Указывается интервал, куда с заданной вероятностью попадает погрешность. Определяется для известного закона распределения на основе оценок дисперсии и мат. ожидания по заданной **ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ** вероятности P_d .

$$P_d (|\Delta| \leq \Delta_{кв}) = 2 \int_0^{\Delta_{кв}} p(t) dt$$

Квантили распределения – значения погрешности $\Delta_{кв}$

(нормированные к СКО), соответствующие заданной вероятности P_d

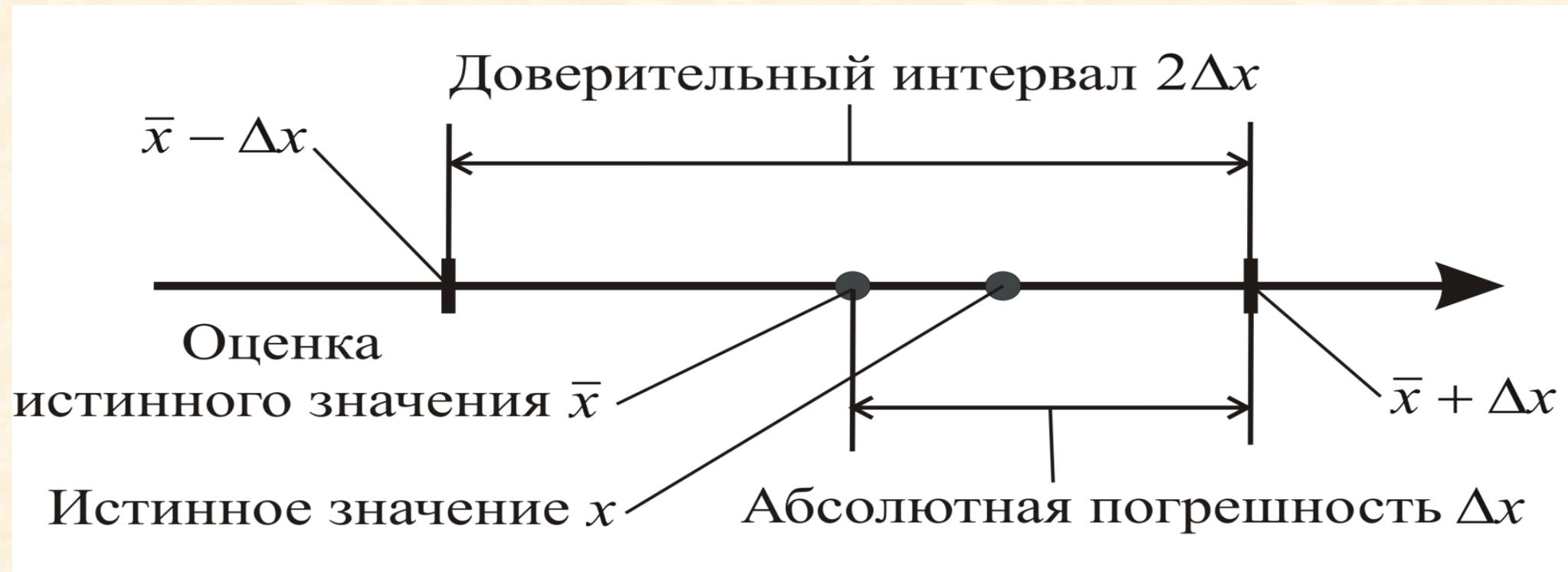
(площади под кривой распределения)

$$\tilde{\Delta}_{кв} = \frac{\Delta_{кв}}{\sigma}$$

Интервальные оценки параметров законов распределения

Запись интервальной оценки для однократного и многократного измерения:

$$-\tilde{\Delta}_{кв} \tilde{\sigma} \leq \Delta \leq \tilde{\Delta}_{кв} \tilde{\sigma}, \quad \frac{-\tilde{\Delta}_{кв} \tilde{\sigma}}{\sqrt{N}} \leq \Delta \leq \frac{\tilde{\Delta}_{кв} \tilde{\sigma}}{\sqrt{N}}$$



Интервальные оценки параметров законов распределения Сл.П.

Квантили для нормального распределения берутся из таблицы интеграла вероятности 2Φ для выбранной вероятности.

Чаще всего используют доверительную вероятность 0.95 – интервал 2 сигма, реже – 0.997 (правило трех сигм).

Плотность нормального распределения

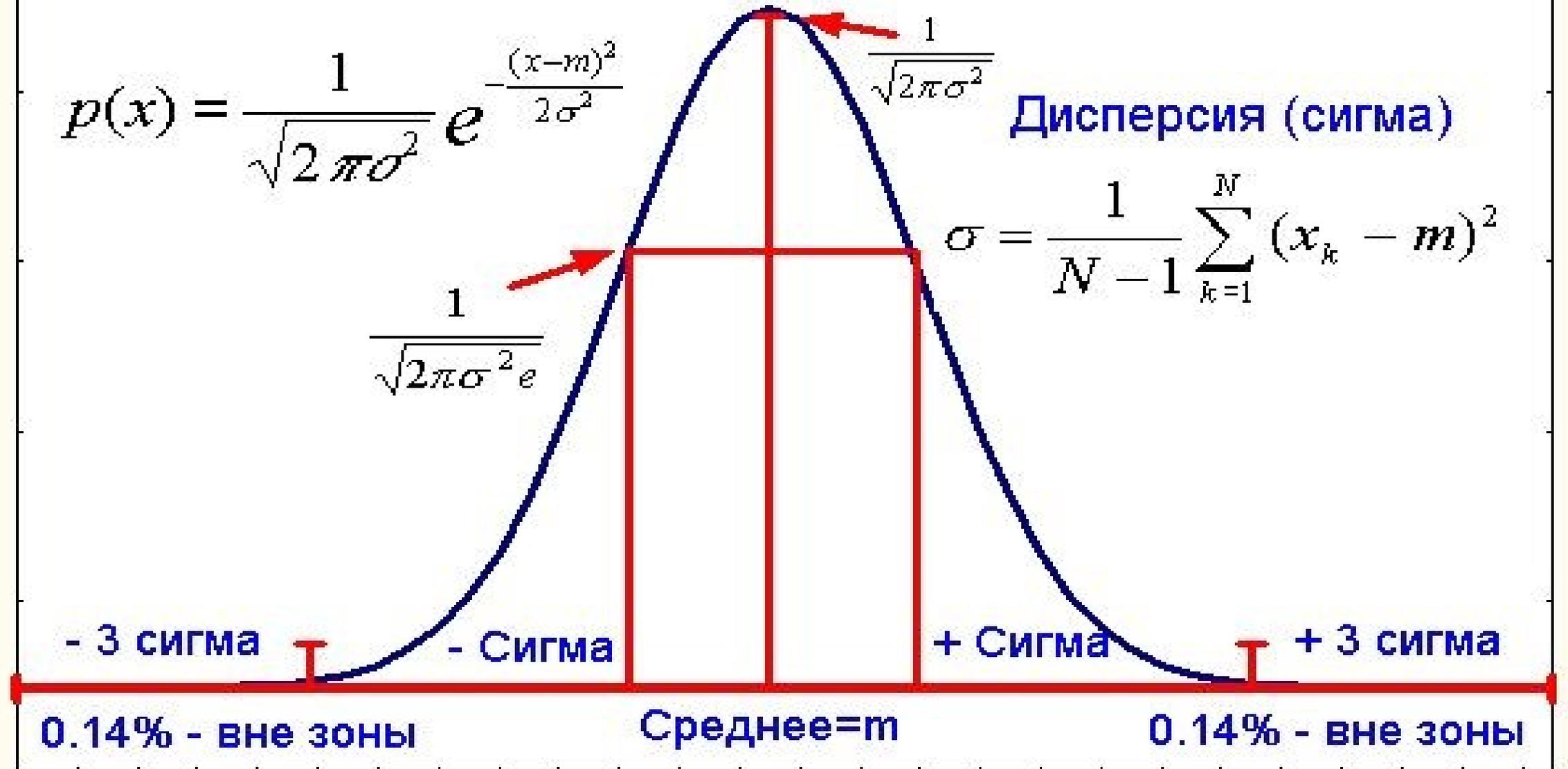
$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$$

Дисперсия (сигма)

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - m)^2$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2} e}$$



Для *небольшого числа измерений* оценки среднего значения и СКО имеют случайный характер – **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЬЮДЕНТА**.

Квантили распределения – **коэффициенты Стьюдента** $t(P,N)$

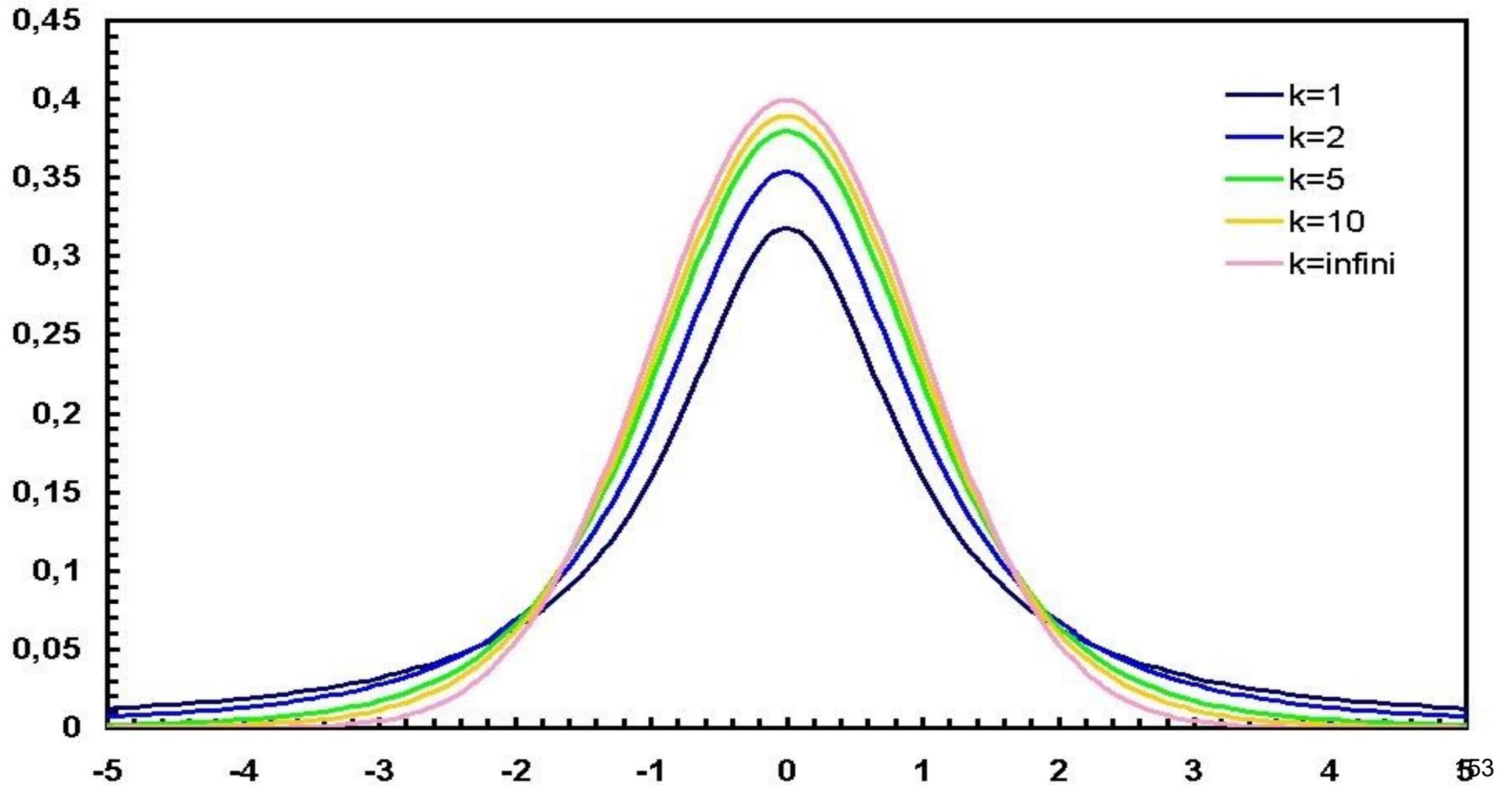
Для однократного измерения:

$$-t(P_{\partial}, N) \tilde{\sigma} \leq \Delta \leq t(P_{\partial}, N) \tilde{\sigma}$$

Для многократного измерения (N опытов):

$$\frac{-t(P_{\partial}, N) \tilde{\sigma}}{\sqrt{N}} \leq \Delta \leq \frac{t(P_{\partial}, N) \tilde{\sigma}}{\sqrt{N}}$$

Распределение Стьюдента



Коэффициенты Стьюдента $t(P,N)$

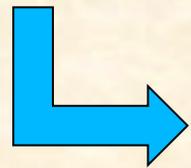
N	P=0.5	P=0.95	P=0.99	P=0.999
5	0.74	2.78	4.6	6.87
10	0.70	2.26	3.25	4.59
15	0.69	2.14	2.98	4.07
20	0.69	2.09	2.86	3.85
120	0.67	1.96	2.58	3.37

Исключение грубых погрешностей (промахов) при проведении многократных измерений

При многократных измерениях оценка среднего и дисперсии может быть искажена грубыми погрешностями из-за:

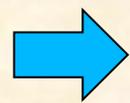
- Резкого изменения условий И.
- Помех
- Ошибки оператора.

Надо проводить **цензурирование** опытных данных. Граница цензурирования Δ_c выбирается для нормального закона по правилу «**трех сигм**»



$$-3\tilde{\sigma} \leq \Delta_c \leq 3\tilde{\sigma}$$

Для равномерного закона используют другую цензуру



$$-\sqrt{3}\tilde{\sigma} \leq \Delta_c \leq \sqrt{3}\tilde{\sigma}$$

После цензурирования надо ЗАНОВО сделать оценку СКО и повторить цензурирование!!!

Пример: таблица многократных опытов:

8.17	8.05	8.10	8.16	8.18
8.06	8.10	8.12	8.11	8.15
8.09	8.14	8.12	8.13	8.18
8.20	8.17	8.06	8.04	8.11
8.09	8.14	8.16	8.50	8.14

$$\bar{x} \approx 8.14, \quad \tilde{\sigma} = 0.09$$

$$\Delta_{\mu} = \pm 0.27, \quad x_{\min} = 7.87, \quad x_{\max} = 8.41$$

После отброса грубой погрешности
8.50 получаем результат

→ $\bar{x} \approx 8.13, \quad \tilde{\sigma} = 0.048$

Алгоритм обработки измерений-1

Проводим N опытов

Исключение Θ

Оценка результата

Проверка нормального вида закона
распределения

Оценка дисперсии и СКО

$\{U_i\}$

$$\bar{U} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

Исключение грубых погрешностей

Проверка правильности оценок математического ожидания и дисперсии

Повторная оценка без грубых погрешностей

Интервальная оценка погрешности для многократных измерений

Запись результата

$$\tilde{\sigma}_N = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

Погрешности косвенных измерений

Уравнение косвенного измерения $y=F(x)$.

Абсолютная погрешность опытных данных $x \rightarrow \pm\Delta x$

Погрешность результата косвенного измерения Δy .

$$y \pm \Delta y = F(x \pm \Delta x).$$

Разложив правую часть этого равенства в ряд Тейлора и пренебрегая членами разложения, содержащими Δx в степени выше первой, получим

$$y \pm \Delta y \approx F(x) \pm \frac{dF}{dx} \Delta x \qquad \delta = \pm \frac{dF}{dx} \frac{\Delta x}{x}$$

Для функции многих переменных $y = F(x_1, x_2 \cdots x_N)$
систематическую погрешность определяют алгебраической суммой

$$\Delta y = \pm \sum_i \left(\frac{dF}{dx_i} \right) \Delta x_i$$

Для случайных погрешностей косвенных измерений используют среднеквадратическую (геометрическую) сумму:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\left(\frac{dF}{dx_1} \right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{dF}{dx_2} \right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{dF}{dx_N} \right)^2 \Delta x_N^2}$$



$$\delta_y = \pm \sqrt{\sum_i \left(\frac{dF}{dx_i} \right)^2 \delta_i^2}$$

Пример сложения систематических погрешностей косвенных измерений

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$A = a + b$	$\Delta A = \Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
$A = a - b$	$\Delta A = \Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$
$A = ab$	$\Delta A = a\Delta b \pm b\Delta a$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$A = a^n$	$\Delta A = na^{n-1}\Delta a$	$\frac{\Delta A}{A} = n \frac{\Delta a}{a}$
$A = \sqrt[n]{a}$	$\Delta A = \frac{\Delta a}{nA^{n-1}}$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{n} \frac{\Delta a}{a}$
$A = \frac{a}{b}$	$\Delta A = \frac{b\Delta a + a\Delta b}{b^2}$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники и
телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических основ
радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

***Измерение напряжения и тока.
Электромеханические приборы.***

**Санкт-Петербург
2024 г.**

«ЗНАЧЕНИЕ» напряжения (и тока) – параметр, характеризующий уровень сигнала
Среднее значение сигнала (постоянная составляющая) на интервале усреднения T (или периоде) как среднее значение зависимости $u(t)$:

$$U_{cp} = \bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Амплитудное (пиковое, максимальное) значение сигнала – наибольшее мгновенное значение напряжения за время измерения $T_{изм}$ (на периоде):

$$U_m = \max u(t) \Big|_{t \in [0, T_{изм}]}$$

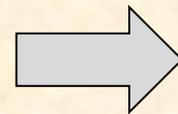
Размах сигнала (U_{p-p} «пик-ту-пик:»)

$$U_{p-p} = U_{max} - U_{min}$$

Пиковые отклонения сигнала «вверх» и «вниз»

$$U_{m+} = U_{max} - U_{cp} \qquad U_{m-} = \left| U_{cp} - U_{min} \right|$$

Средневыпрямленное значение – среднее значение модуля временной зависимости напряжения:


$$U_{\text{ср. в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Среднеквадратическое значение сигнала (*Root Mean Square* – *RMS*) определяется как корень из среднего значения квадрата временной зависимости

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Мощность сигнала определяют через произведение значений напряжения и тока в цепи (мгновенная мощность).

$$p(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{R_{\text{H}}}$$

Средняя мощность, измеренная за заданный интервал времени T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{U^2}{R_H}$$

Относительная мощность (используют опорный уровень $P_0 = 1$ мВт, реже 1 Вт).

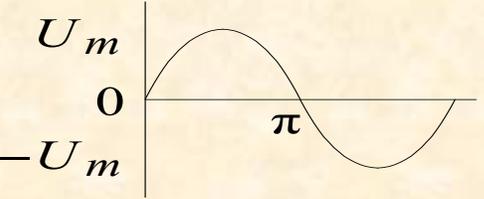
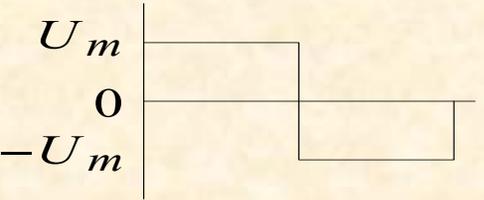
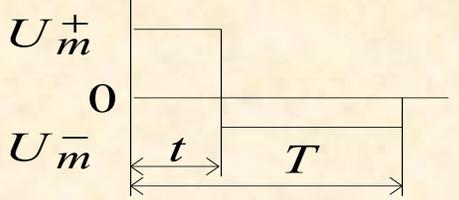
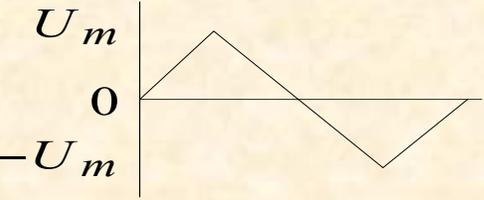
Логарифмическая единица обозначается дБмВт (или дБм)

$$P[\text{дБ}] = 10 \lg \left(\frac{P[\text{Вт}]}{P_0} \right)$$

Связь между значениями напряжения - **коэффициент амплитуды K_a** (пик-фактор) и **коэффициент формы K_f**

$$K_a = \frac{U_m}{U}$$

$$K_f = \frac{U}{U_{\text{ср. в}}}$$

Форма сигнала	Параметры сигнала			
	$U_{\text{ср. в}}$	U	K_{ϕ}	K_a
	$\frac{2}{\pi} U_m$	$0.707 U_m$	1.11	1.414
	U_m	U_m	1	1
 <p> $U_{p-p} = U_m^+ + U_m^-$ $q = T / t$ </p>	$2 \frac{q-1}{q^2} U_{p-p}$	$\sqrt{\frac{1}{q} \left(1 - \frac{1}{q}\right)} U_{p-p}$	1	$\sqrt{q-1}$
	$0.5 U_m$	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_m$	1.155	1.733

Средства измерения, определяющие «значения» сигнала, называют **вольтметры** (для токов – **амперметры**)

Классификация вольтметров - **по измеряемому «значению» сигнала:**

- 1) **вольтметры среднего значения** (вольтметры «постоянного тока»). Это приборы постоянные напряжения или постоянную составляющую сигналов;
- 2) **вольтметры средневывпрямленного значения** (average response meter). Они используются для гармонических напряжений и градуируются в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала (на шкале отсчет умножен на коэффициент формы гармонического сигнала $K_f = 1.11$). Их называют вольтметрами «переменного тока»

3) **вольтметры среднеквадратического значения** сигналов произвольной формы. Такие вольтметры иногда маркируют знаком «**True RMS**» (*true root mean square*).

4) **вольтметры амплитудного значения** (импульсные вольтметры). Для импульсных вольтметров шкала соответствует амплитудному значению сигнала. Для ВЧ вольтметров «переменного тока» (то есть для гармонических сигналов ВЧ и СВЧ диапазона) шкала среднеквадратических значений - отсчеты шкалы поделены на коэффициент амплитуды синусоиды $K_a=1.41$).

По **функциональному назначению** (ГОСТ 15094–86) вольтметры делят на подгруппы:

В1 – образцовые приборы для поверки других вольтметров.

В2 – вольтметры постоянного напряжения («вольтметры постоянного тока»).

В3 – вольтметры переменного напряжения. Для измерения среднеквадратического значения сигналов произвольной формы.

В4 – импульсные вольтметры. Измеряют пиковое значение импульсных сигналов .

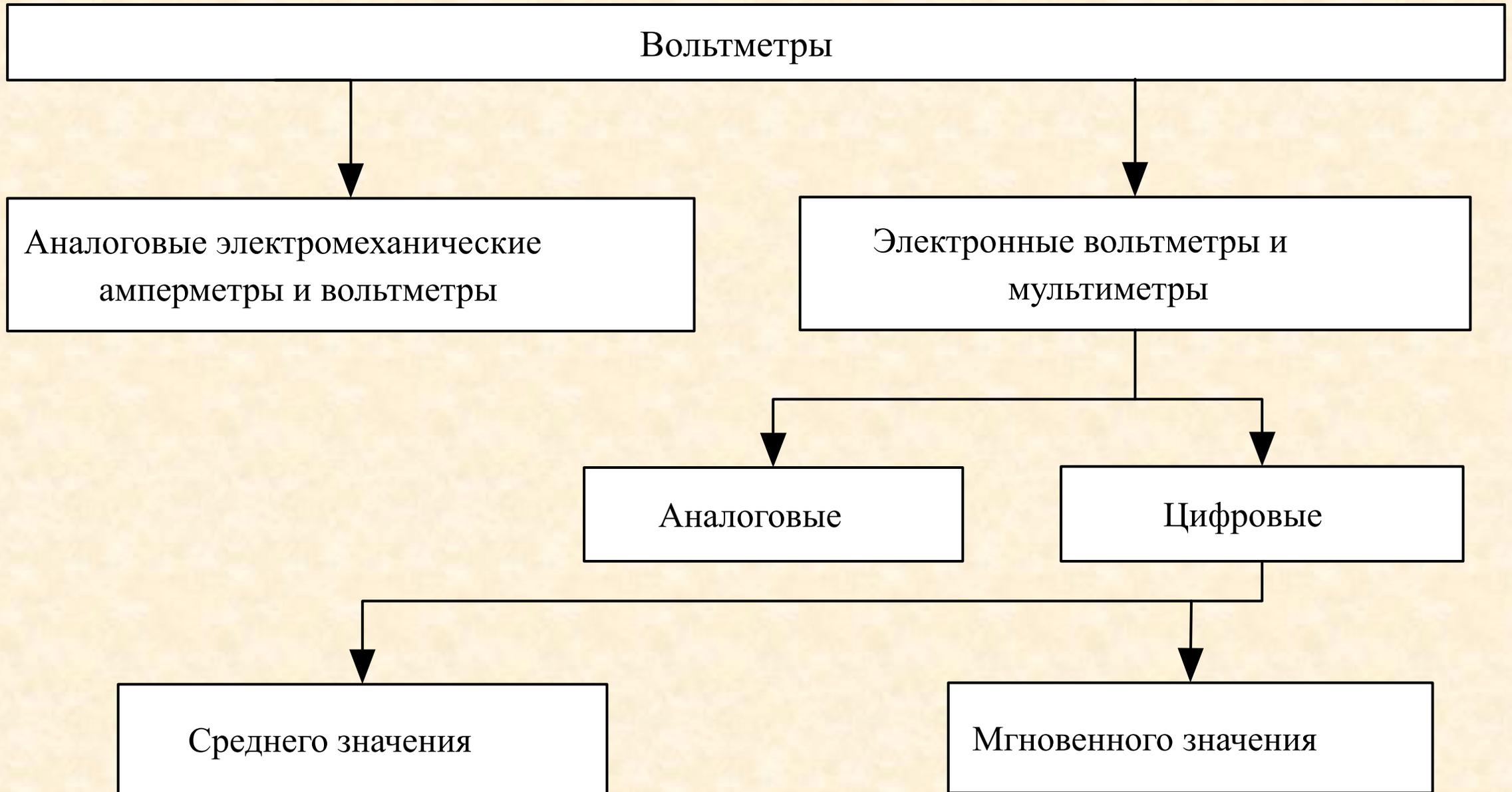
В5 – фазочувствительные вольтметры для измерения комплексных амплитуд гармонических сигналов. Комбинация вольтметра и фазометра.

В6 – селективные вольтметры. Содержат входной перестраиваемый фильтр для выделения измеряемого гармонического сигнала на фоне шумов и помех.

В7 (ВК7) – комбинированные приборы (**аналоговые мультиметры**). Применяются для измерения постоянных и переменных напряжений, токов и сопротивлений резисторов.

В8 – измерители отношения амплитуд двух гармонических напряжений.

Классификация вольтметров по принципу действия



Основные параметры вольтметров

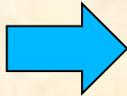
1. Вид измеряемого значения напряжения.
2. Пределы измерения напряжения с разбивкой на поддиапазоны. Для аналоговых вольтметров принято разбивать весь рабочий диапазон на поддиапазоны, идущие через 10 дБ (отличающиеся в 3.16 раз). Для цифровых вольтметров поддиапазоны отличаются в 10 раз.
3. Входной импеданс (входное сопротивление и входная емкость).
4. Рабочая полоса частот (для вольтметров переменного тока). Это диапазон частот, в пределах которого сохраняется заявленный предел допускаемой погрешности измерения (класс точности).
5. Помехоустойчивость. Характеризует способность вольтметра не реагировать на внешние мешающие сигналы и шумы (степень подавления помехи).
6. Метрологические параметры (пределы допускаемой погрешности, класс точности)

Метрологические параметры вольтметров

Обычно это предел допускаемой погрешности измерения напряжения. Согласно ГОСТ 8.401–80 «Классы точности средств измерений. Общие требования» предел допускаемой погрешности задается либо классом точности прибора, либо указывается в явном виде (в числовом либо формульном формате).

Класс точности аналогового вольтметра – это предел основной допускаемой приведенной погрешности, выраженной в процентах. Указывается в виде числа из ряда (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 4.0, 5.0, 6.0) $\times 10^n$, где n – целое число.

Для *цифровых* приборов используют стандартный вид предела допускаемой относительной погрешности, %:


$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{U_{\max}}{U_x} - 1 \right) \right] 100$$

Часто используют другую формулу для класса точности

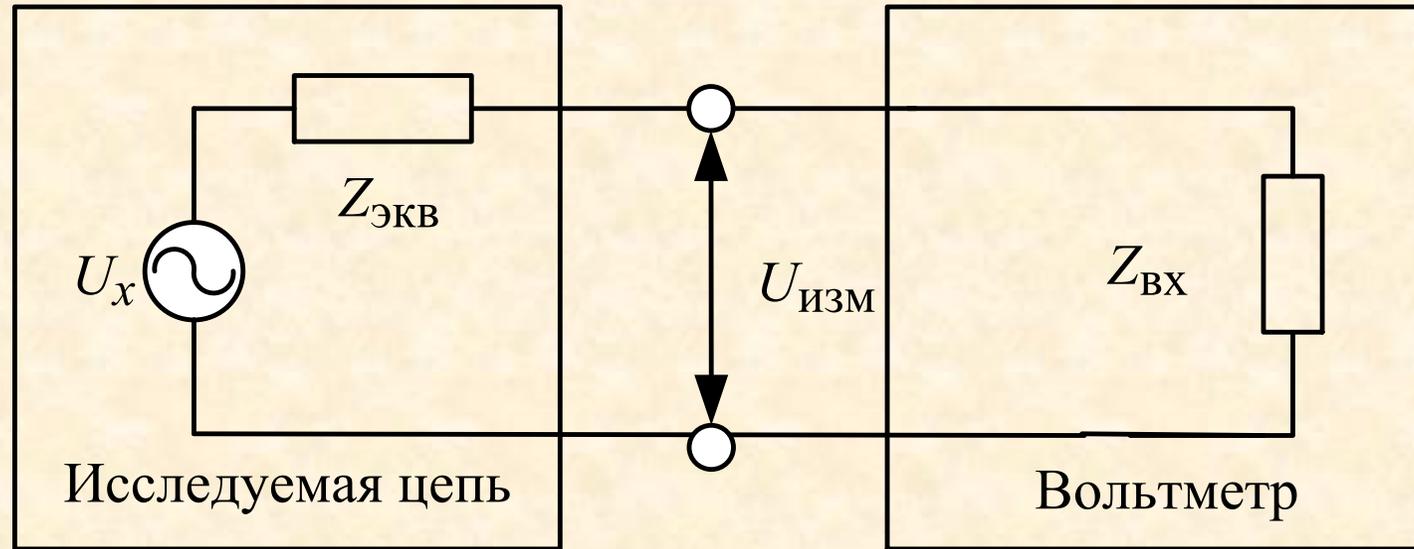
$$\delta = \pm \left[c' + d \frac{U_{\max}}{U_x} \right] 100$$

Обозначается класс точности цифрового вольтметра как «*c/d*» (например, 0.02/0.01).

Важным метрологическим параметром *аналогового* вольтметра является **цена деления** шкалы. Она определяет минимальный шаг дискретизации, которую выполняет оператор при отсчете результата измерения (**разрешающую способность**). Цену деления закладывают при выборе длины шкалы и количества ее делений.

Разрешающая способность *цифрового* вольтметра зависит от **разрядности** АЦП и выбирается при проектировании вольтметра.

Схема подключения вольтметра к исследуемому устройству с выходным сопротивлением $Z_{\text{ЭКВ}}$



$$U_{\text{ИЗМ}} = \left(\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{ЭКВ}}} \right) U_x = \left(\frac{1}{1 + Z_{\text{ЭКВ}} / Z_{\text{ВХ}}} \right) U_x.$$

Определение эквивалентного активного сопротивления источника напряжения.

Подключаем параллельно входу вольтметра два эталонных резистора R_1 и R_2 .

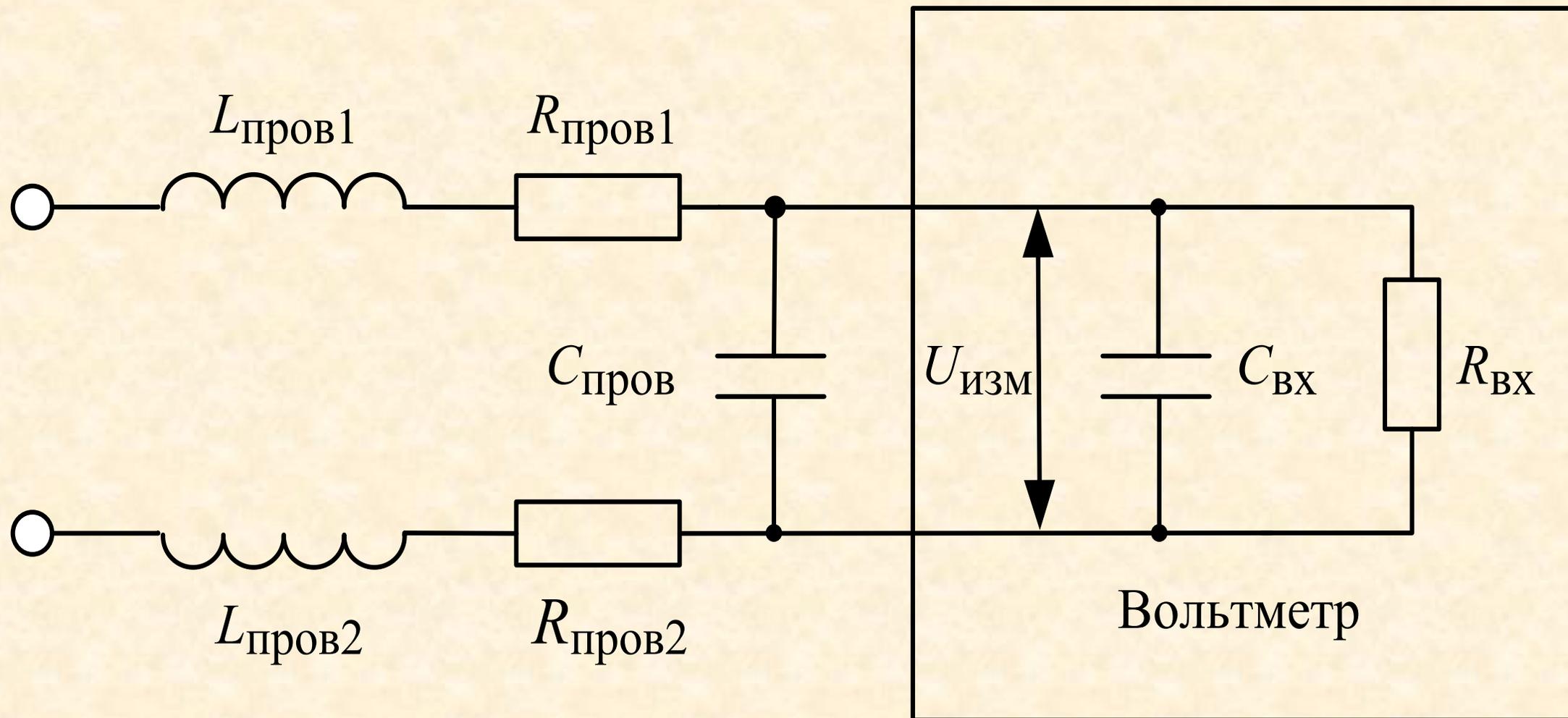
Измеряем два значения напряжения U_1 и U_2

$$U_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ЭКВ}}} \right) U_x, \quad U_2 = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_{\text{ЭКВ}}} \right) U_x$$

Расчет дает внутреннее эквивалентное сопротивление цепи и **систематическую погрешность**, обусловленную конечным входным сопротивлением вольтметра.

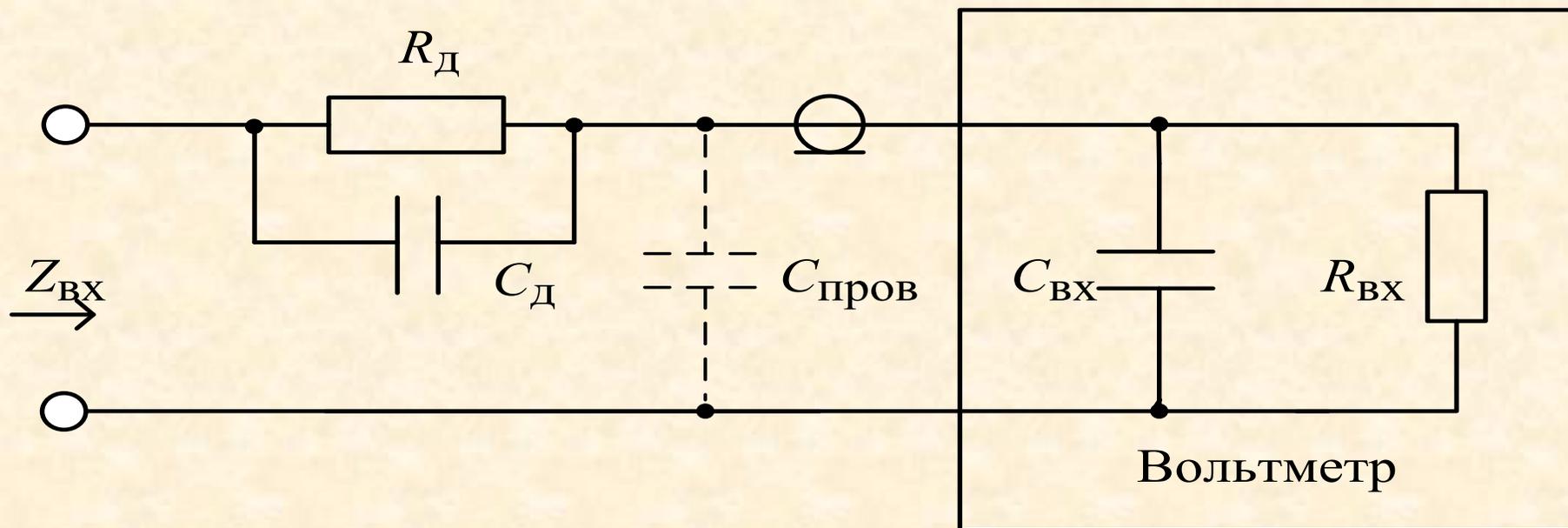
$$R_{\text{ЭКВ}} = \left(\frac{U_2 - U_1}{R_2 U_1 - R_1 U_2} \right) R_1 R_2 \qquad \Delta U = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ВХ}}} U_{\text{ИЗМ}}$$

Эквивалентная схема входной части ВЧ-вольтметра с учетом сопротивления и индуктивности проводов и их паразитной емкости



Снизить влияние паразитных параметров проводов – перенос входной части вольтметра в выносную головку (**пробник**, *probe*), которая подключается в точки измерения. Обычно – делитель напряжения. В импульсных вольтметрах в пробнике размещают схему амплитудного детектора, в вольтметрах переменного тока – входной усилитель

Выносной делитель напряжения



Электромеханические приборы (ЭМП) - амперметры и вольтметры

Аналоговыми называют приборы, показания которых являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. Стрелочные приборы, самописцы.

Общие узлы: Входные измерительные преобразователи, электромеханический измерительный механизм, отсчетное устройство.

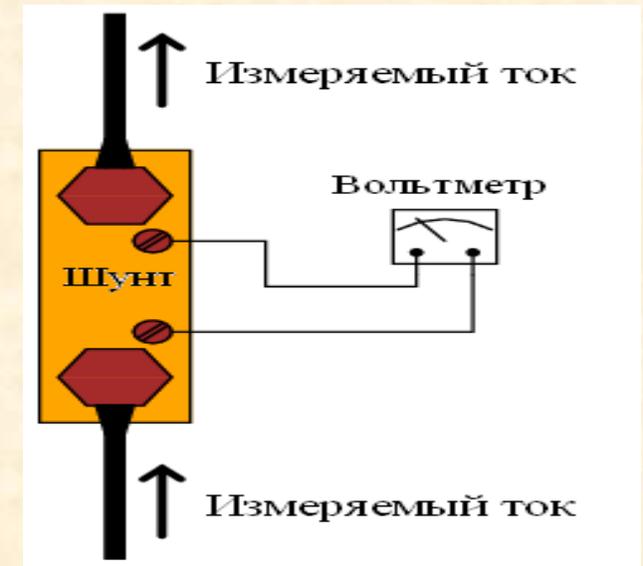
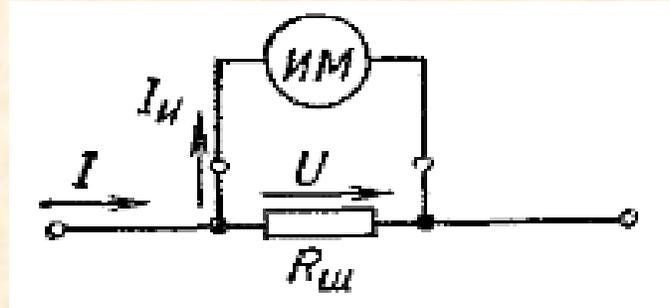
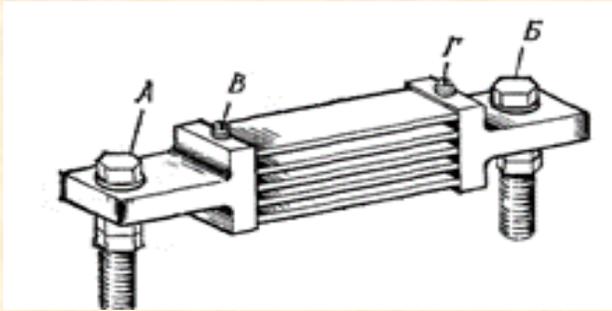
Входные преобразователи – шунты и дополнительные резисторы, выпрямители.

Шунт (bypass) – резистор параллельно прибору. Позволяет разделить измеряемый ток и уменьшить ту часть, которая проходит через ЭМП, Соотношение между сопротивлением прибора и сопротивлением шунта определяет увеличение диапазона измерения тока.

Дополнительный резистор включают последовательно и превращают амперметр в вольтметр с относительно большим входным сопротивлением

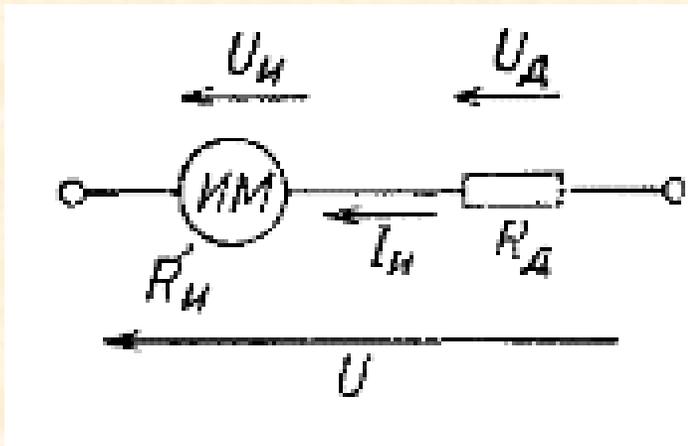
Выпрямители используют для преобразования переменного тока в постоянный.

Шунты амперметров, дополнительные резисторы вольтметров



$$I_{И} = I \cdot R_{ш} / (R_{ш} + R_{И})$$

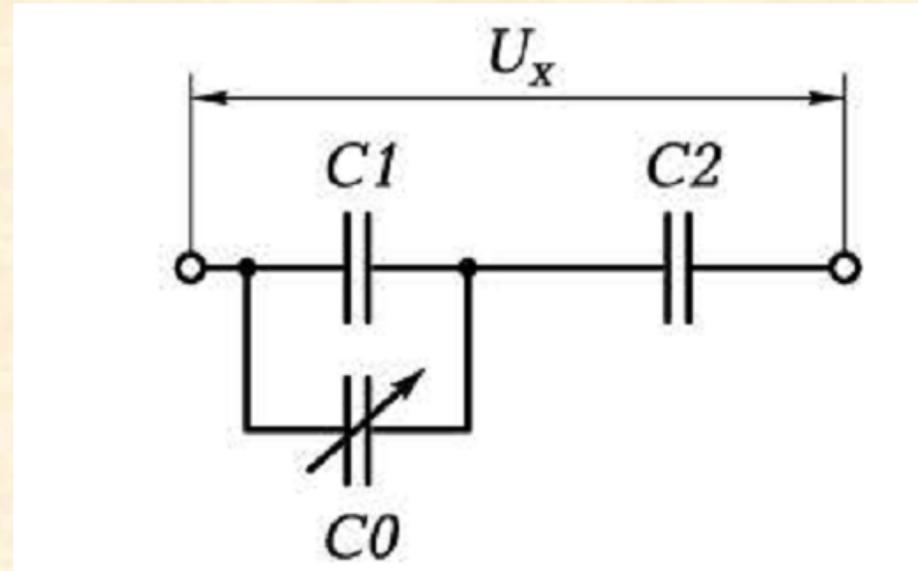
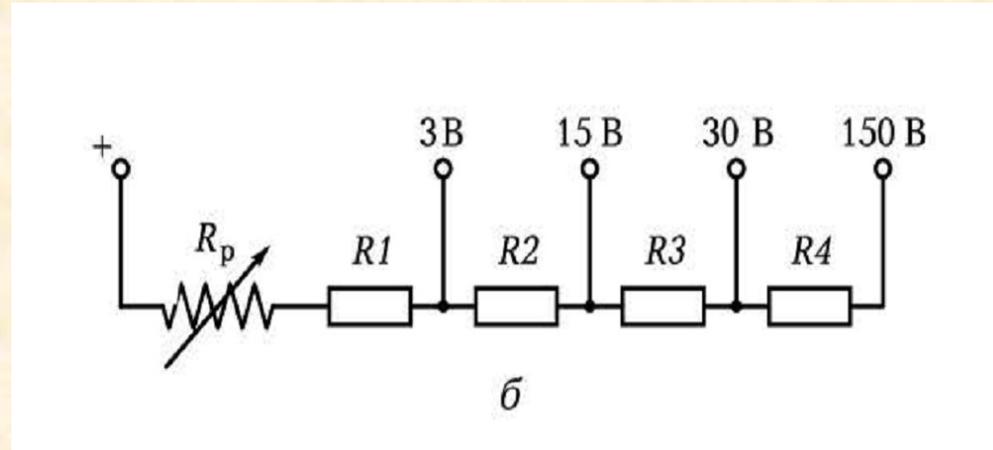
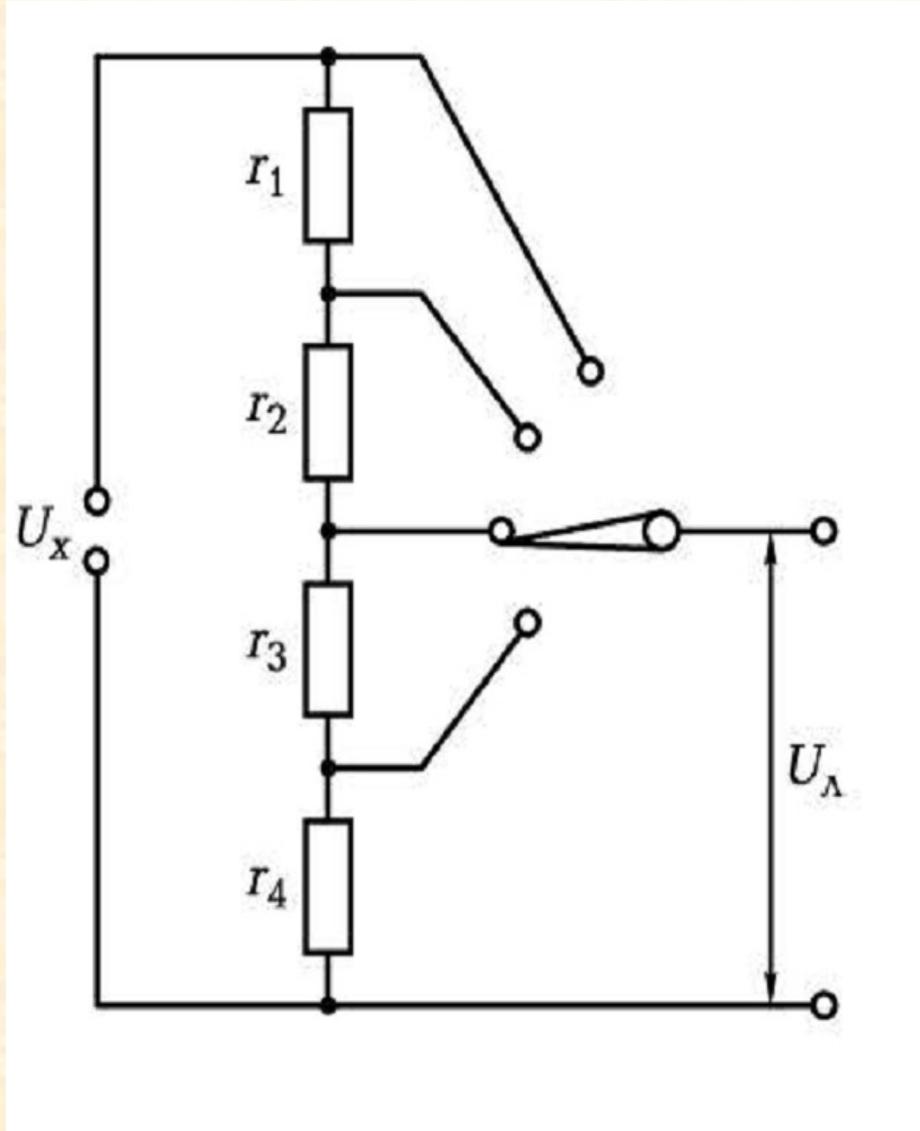
$$n = \frac{I}{I_{И}} \quad R_{ш} = \frac{R_{И}}{n - 1}$$



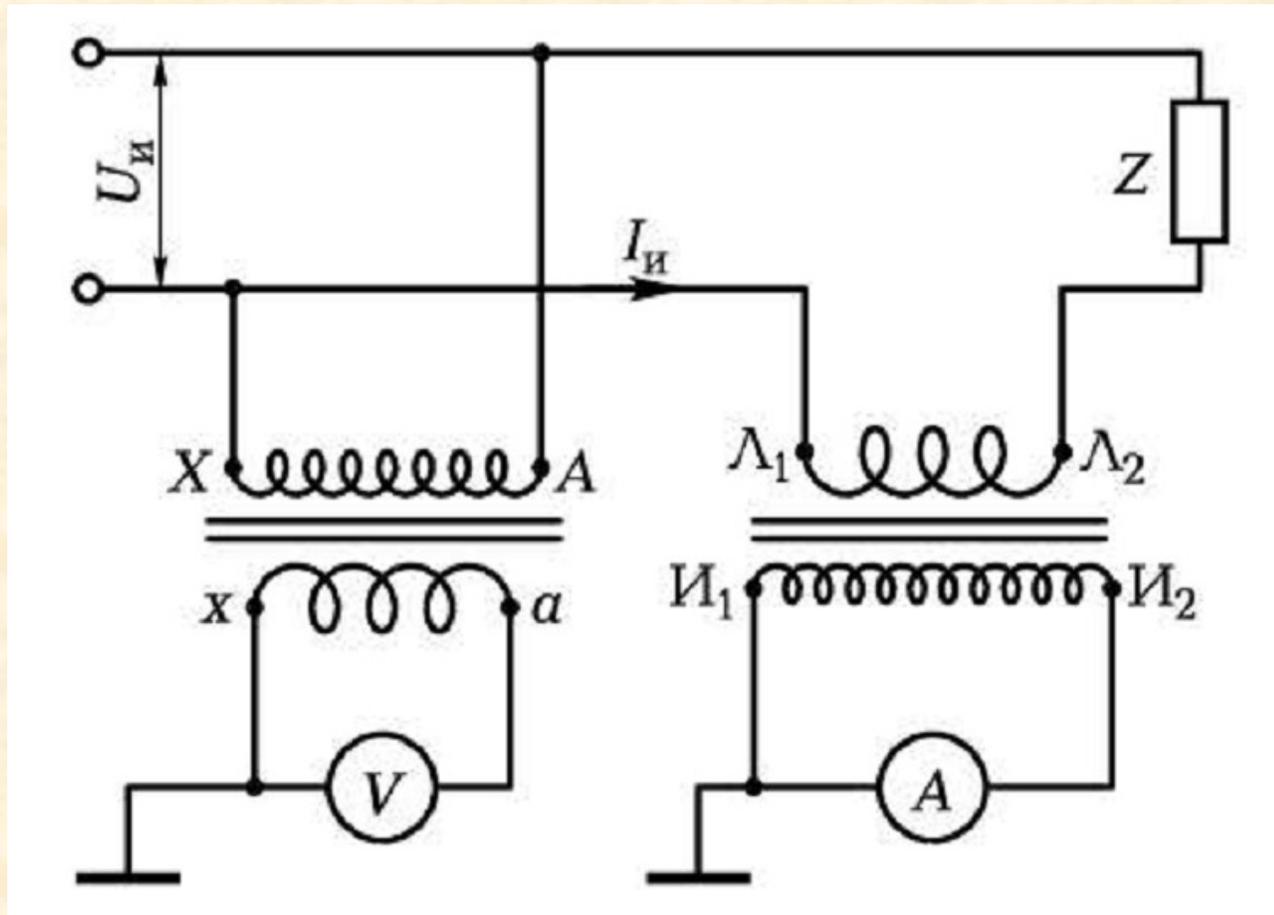
$$U = I \cdot (R_{д} + R_{И}) = nU_{И}$$

$$R_{д} = R_{И} \cdot (n - 1)$$

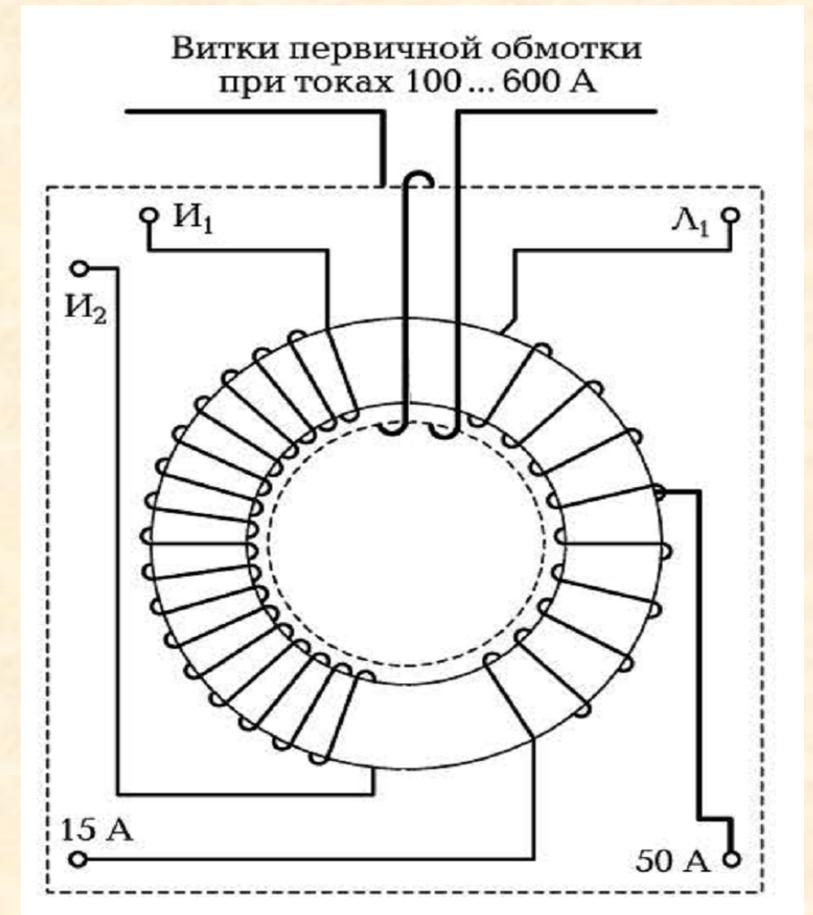
Дополнительный делитель напряжения



Измерительные трансформаторы напряжения и тока



Трансформаторы напряжения и тока



Конструкция тороидального трансформатора тока

Общие сведения и классификация ЭМП

Измерительный механизм преобразует энергию измеряемого сигнала в угловое перемещение подвижной части, жестко связанной с указателем отсчетного устройства. Для перемещения подвижной части необходимо, чтобы на нее действовал *вращающий* момент. Чтобы каждому значению вращающего момента соответствовало свое отклонение подвижной части, необходим *противодействующий* момент, направленный навстречу вращающему, и возрастающий по мере увеличения угла поворота. Обычно такой противодействующий момент создается одной или двумя спиральными *пружинами* или *растяжками*, которые при повороте подвижной части закручиваются. *Успокоители* – для демпфирования колебаний подв. части

Отсчетные устройства - стрелка над неподвижной шкалой. Пишущее перо в самописце. Беспараллаксная шкала – с зеркальцем.

Создание противодействующего момента

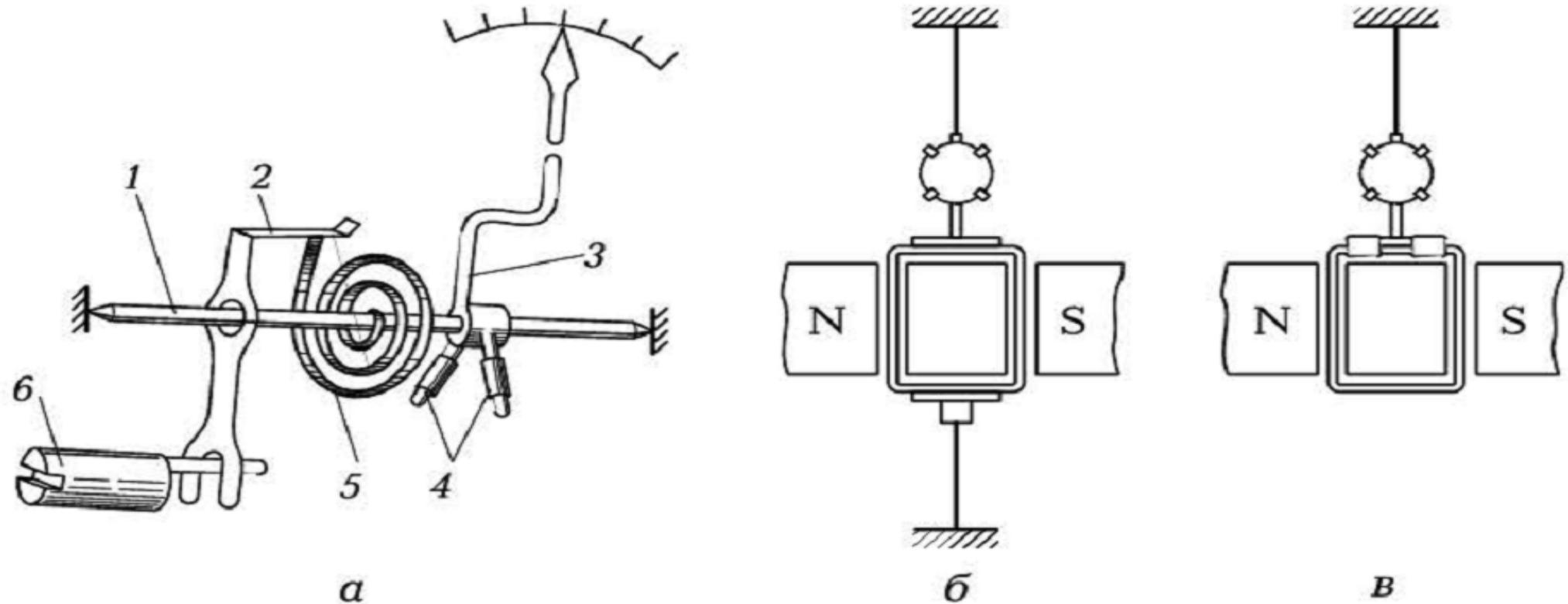


Рис. 3.1. Способы задания противодействующего момента:

а — с помощью спиральных пружин: *1* — ось измерительной системы; *2* — рычаг для установки стрелки в нулевое положение; *3* — стрелка; *4* — балансирующие противовесы; *5* — спиральная пружина, создающая противодействующий момент; *б* — эксцентрик для поворота рычага *2*; *б* — посредством растяжек; *в* — с помощью подвесов

Успокоители подвижной части ЭМП

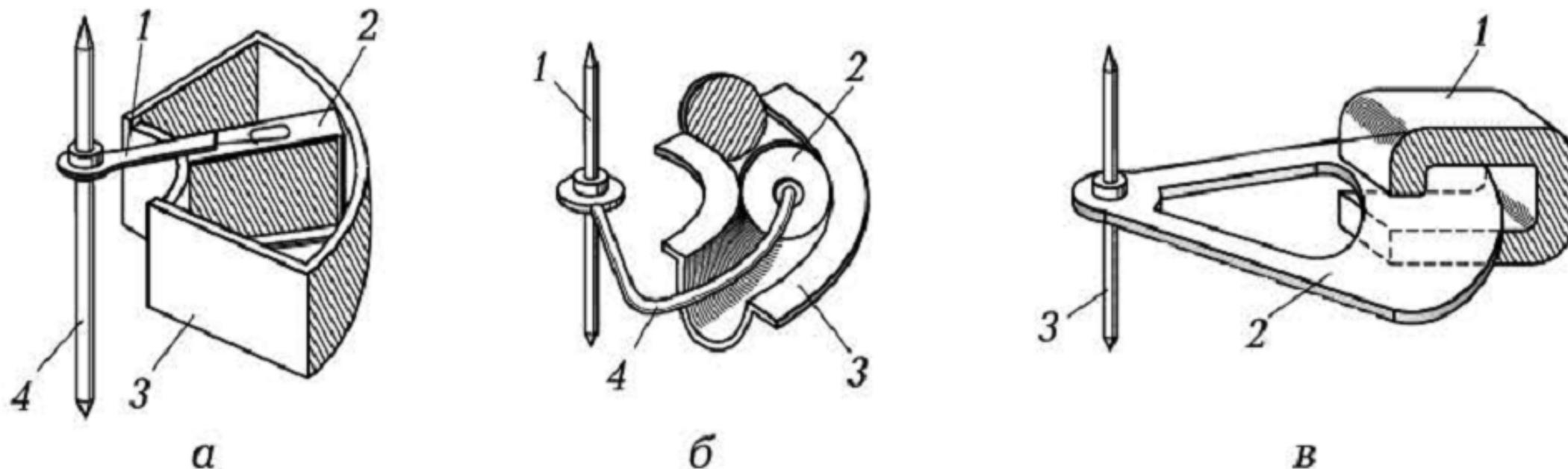


Рис. 3.3. Типы успокоителей:

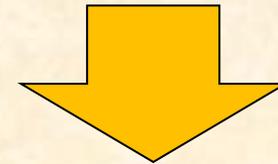
а — воздушный крыльчатый: 1 — ножка; 2 — алюминиевая пластина; 3 — камера; 4 — ось подвижной части; *б* — воздушный поршневой: 1 — ось подвижной части; 2 — алюминиевая пластина; 3 — камера; 4 — ножка; *в* — магнитоиндукционный: 1 — постоянный магнит; 2 — алюминиевая пластина; 3 — ось подвижной части

Измерительные механизмы ЭМП

Общее уравнение измерительного механизма ЭМП (уравнение Лагранжа)

$$dA = m_{вр} \cdot d\alpha = dW \Rightarrow m_{вр} = \frac{dW}{d\alpha} = m_{пр} = \mu\alpha$$

- A – работа по перемещению подвижной части
- W – запасенная в механизме энергия
- $M_{вр}$ - вращающий момент, создаваемый током
- $M_{пр}$ - противодействующий момент пружинки, пропорциональный углу поворота α
- μ – удельный противодействующий момент пружинки (упругость)



$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{dW}{d\alpha}$$

Обозначения видов электромеханических приборов

Согласно ГОСТ **электроизмерительные** приборы обозначаются так:

М - магнитоэлектрический , Э - электромагнитный , Д- электро- и ф ерродинамический ,

И - индукционный , С - электростатический , Ц – выпрямительный комбинированный , Т

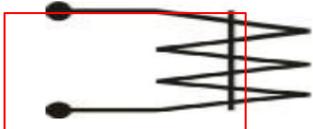
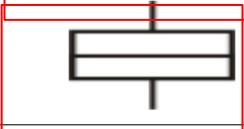
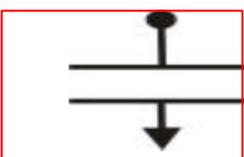
- магнитоэлектрический с термопреобразователем , Ф - электронный цифровой , Н -

самопишущий , Р - измерители параметров элементов (измерительные мосты,

омметры, микрофарадметры, магазины резисторов, меры сопротивления).

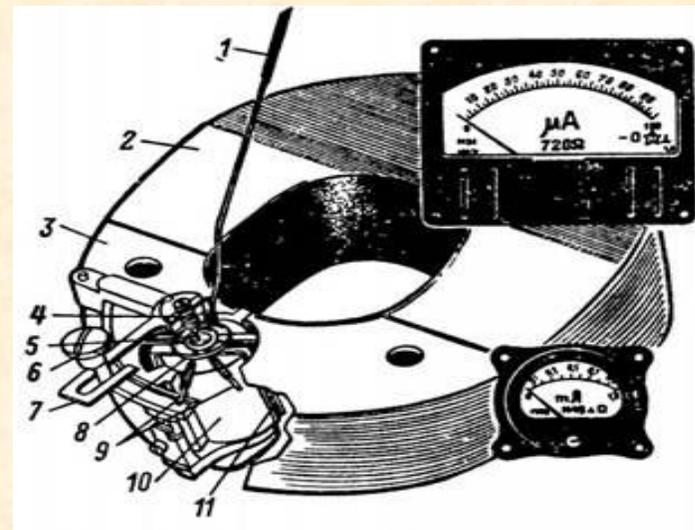
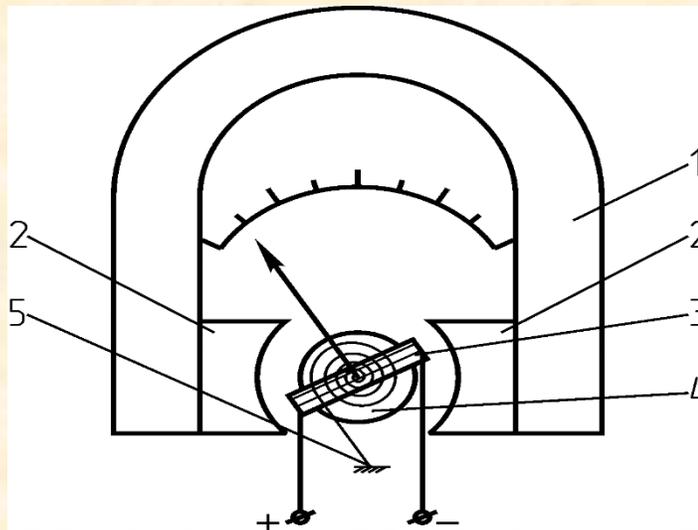
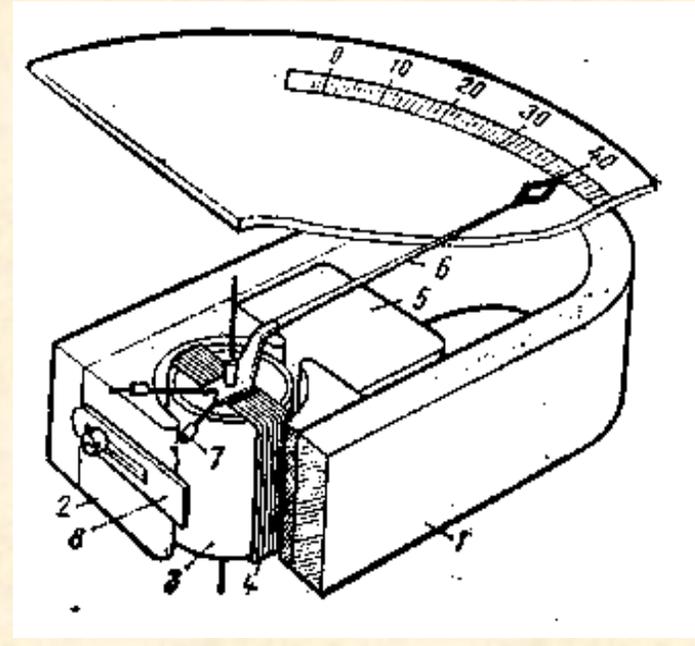
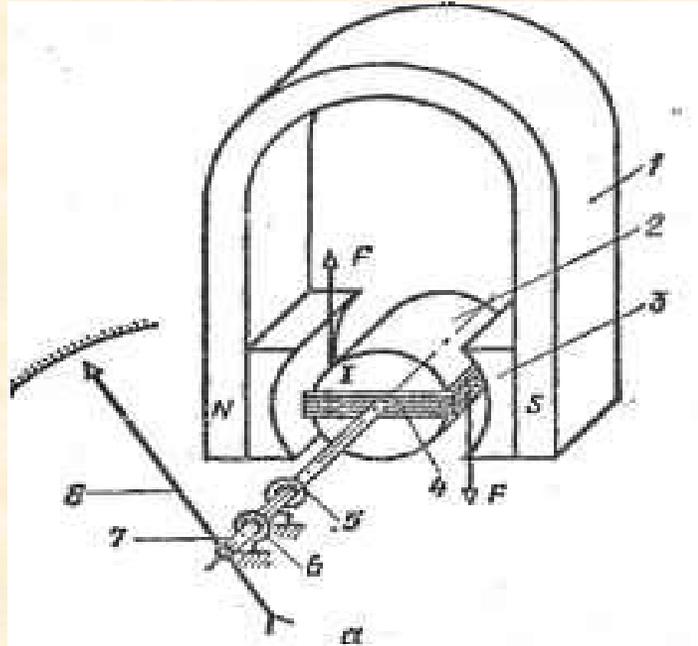
В маркировку прибора входит одна из этих букв и четырехзначное число, первые две цифры которого указывают шифр завода-изготовителя, а две другие- номер конструктивной разработки

Условные обозначения на шкале прибора типов измерительных механизмов электро-механических приборов

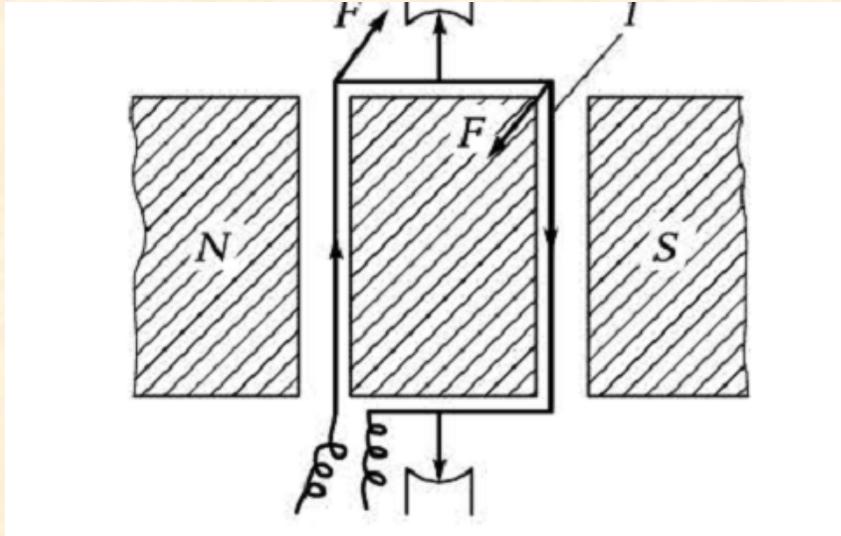
Наименование		Физическое явление
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Взаимодействие магнитных полей постоянного магнита и проводника с током
С подвижным магнитом		
С термопреобразователем		
С выпрямителем		
Электромагнитный		Втягивание стального сердечника магнитным полем катушки с током
Электродинамический		Взаимодействие двух проводников с током
Ферродинамический		Взаимодействие магнитных полей катушки с сердечником и проводника с током
Индукционный		Поворот алюминиевого диска, находящегося в поле электромагнита
Электростатический		Взаимодействие двух металлических пластин при подаче напряжения и появлении электрического поля



Магнитоэлектрический измерительный механизм

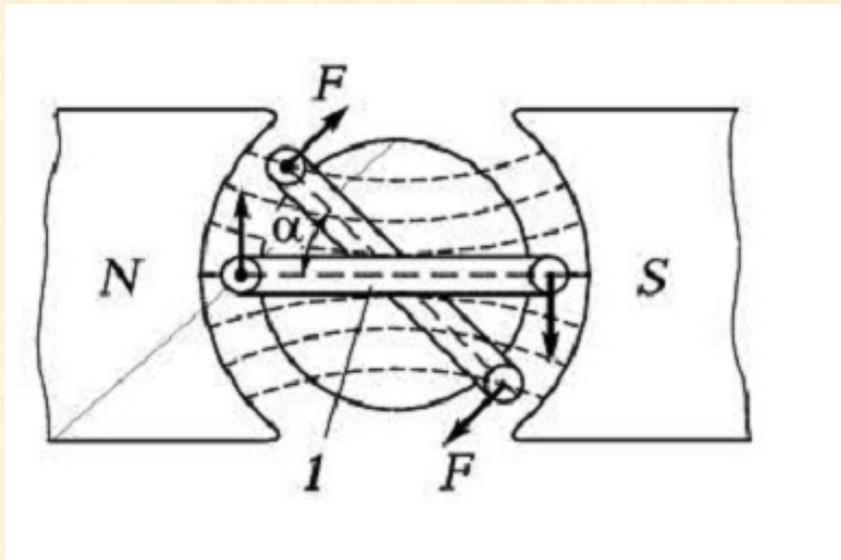


Общее уравнение магнитоэлектрического ЭМП получают из закона Ампера



$$d\vec{F} = \left(\left[\vec{I}_p, \vec{B} \right], d\vec{L} \right) \Rightarrow F = I \cdot B \cdot L$$

- I_p – ток в рамке
- B - индукция магнита
- L - длина рамки по вертикали
- S_p – площадь рамки
- R – радиус вращения рамки
- n - количество витков рамки



$$\alpha = \frac{S_p B \cdot n}{\mu} I_p$$

Свойства магнитоэлектрического ЭМП

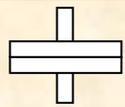
- Измеряет мгновенное значение или среднее значение тока
- Чувствительность постоянна по углу – линейная шкала
- Чувствительность может быть большой (доли мкА) – для этого можно увеличить площадь, индукцию, число витков
- Точность (стабильность градуировки!!!) из-за высокой стабильности параметров магнита и пружинок
- Малые потери в измерительном механизме и большой вращающий момент – применяют в самописцах
- Высокая помехоустойчивость к внешним магнитным полям

Недостатки:

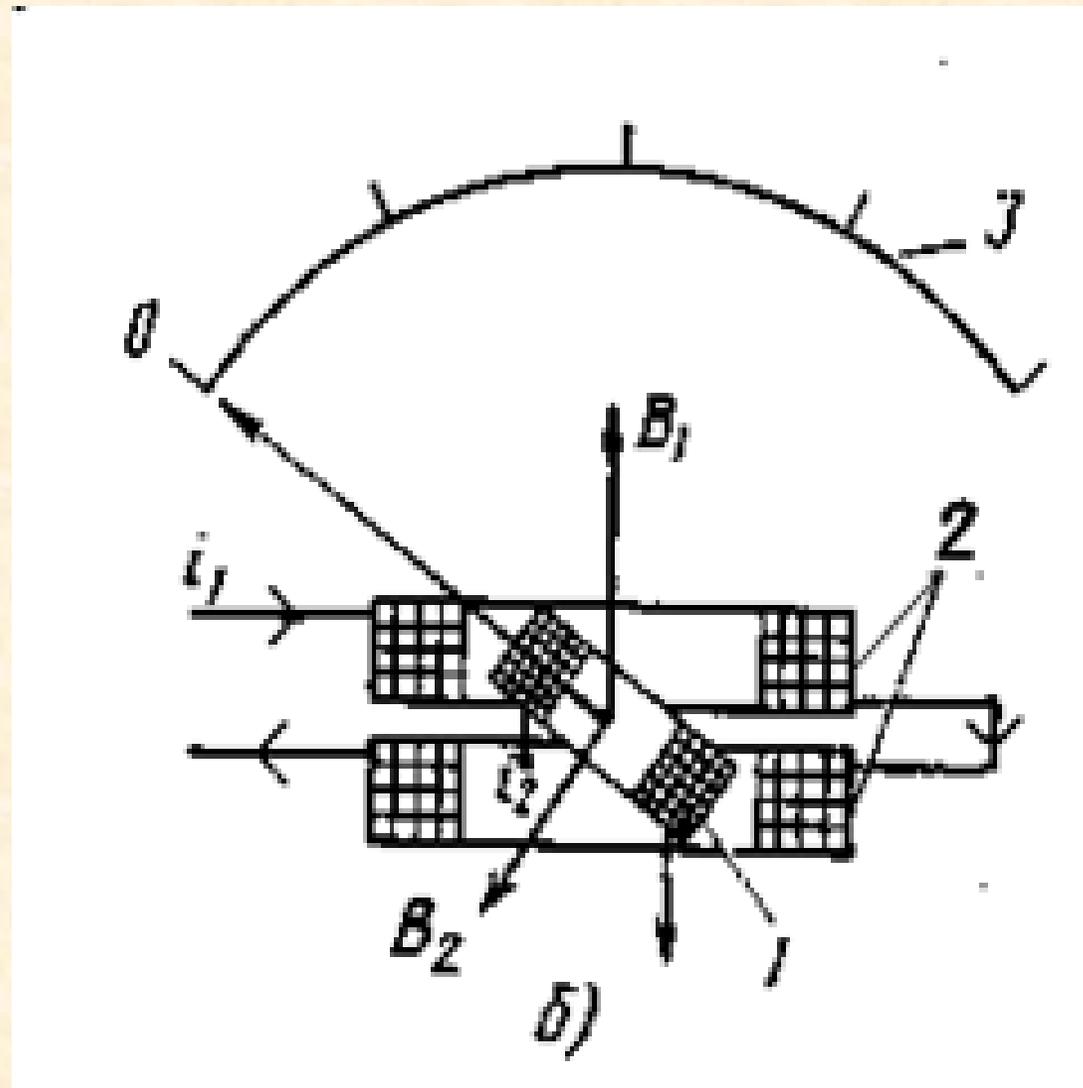
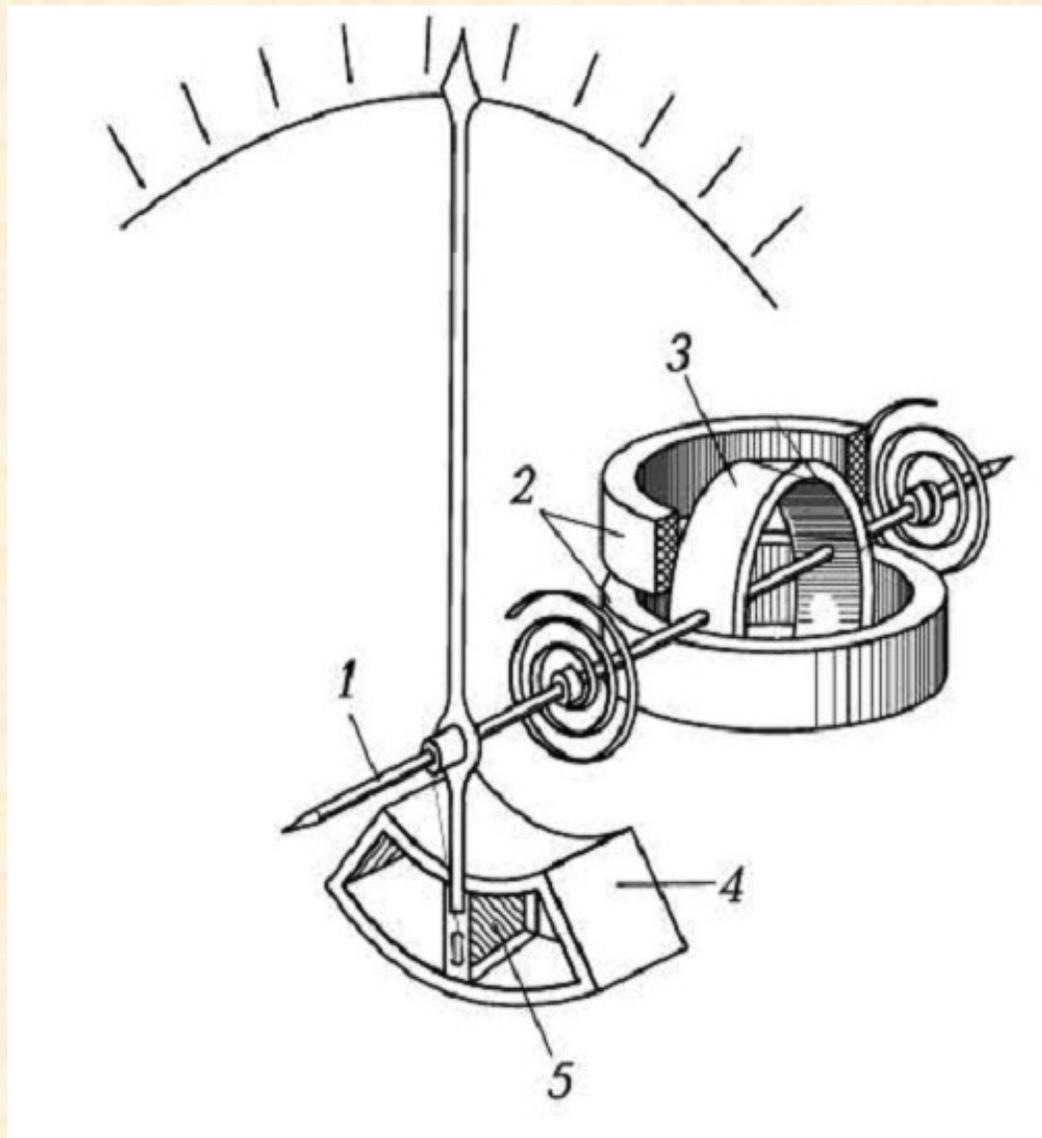
- Не измеряет переменный ток
- Зависимость градуировки от температуры, старение магнита
- Сложная конструкция
- Низкая перегрузочная способность

Область применения:

Измерение постоянных токов (0.1 мкА... 100 мА) и напряжений (0.5 мВ... 10В), переменных – с выпрямителем. Многопредельные аналоговые мультиметры, гальванометры (малые токи). Самописцы!!!! Классы точности – от 0.1



Электродинамический измерительный механизм



Уравнение электродинамического измерительного механизма

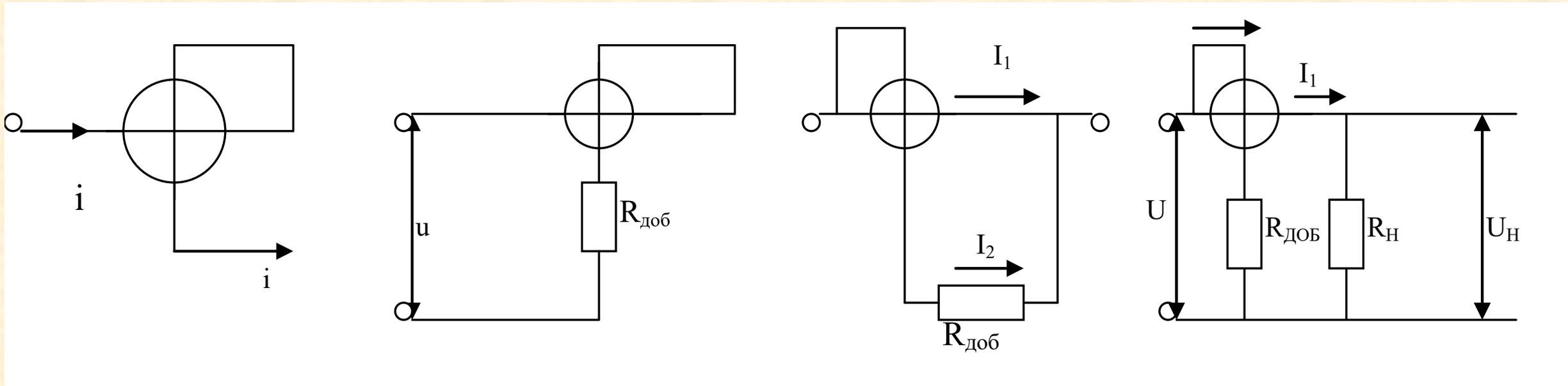
$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{dW}{d\alpha} = \frac{1}{\mu} \frac{d \left(L_1 \frac{i_1^2}{2} + L_2 \frac{i_2^2}{2} + M_{12} \cdot i_1 \cdot i_2 \right)}{d\alpha}$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d(M_{12})}{d\alpha} \cdot (i_1 \cdot i_2)$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d(M_{12})}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T (I_{m1} \cdot I_{m2}) \cos^2(\omega t) dt$$

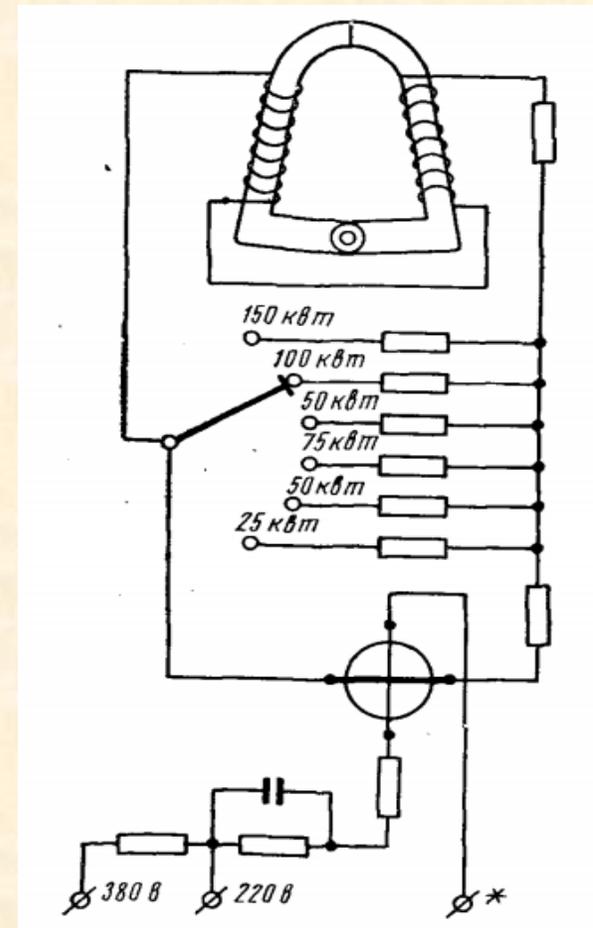
$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d(M_{12})}{d\alpha} \frac{I_{m1} \cdot I_{m2}}{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d(M_{12})}{d\alpha} I^2$$



Пример применения ферродинамического прибора:

Измерительные клещи Д90 для измерения мощности в цепях переменного тока. Класс точности – 4.0. Напряжение 220/380 В подключается к гнездам на верхней панели



Номинальное напряжение в в	220			380		
Предел измерения в кВт	25	50	75	50	100	150
Номинальный ток в а	150	300	400	150	300	500

Свойства электродинамического ЭМП

- Измеряет постоянные и переменные токи по одной шкале
- Измеряет среднеквадратическое значение переменного тока
- Высокая точность— нет ферромагнетика
- Можно измерять мощность – линейная шкала!!

Недостатки:

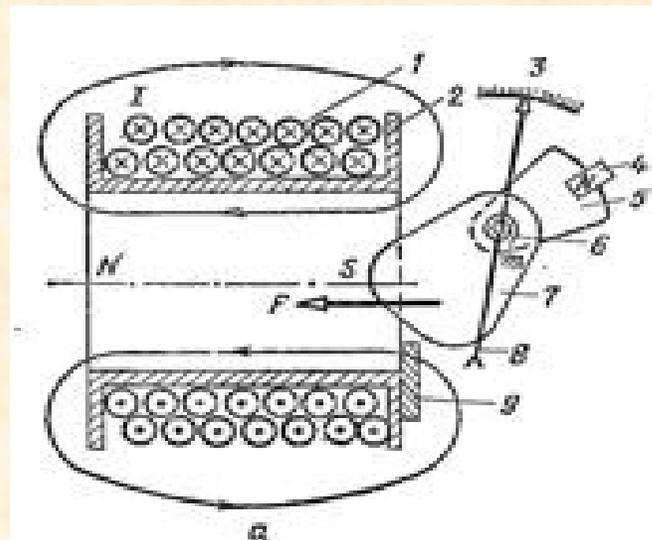
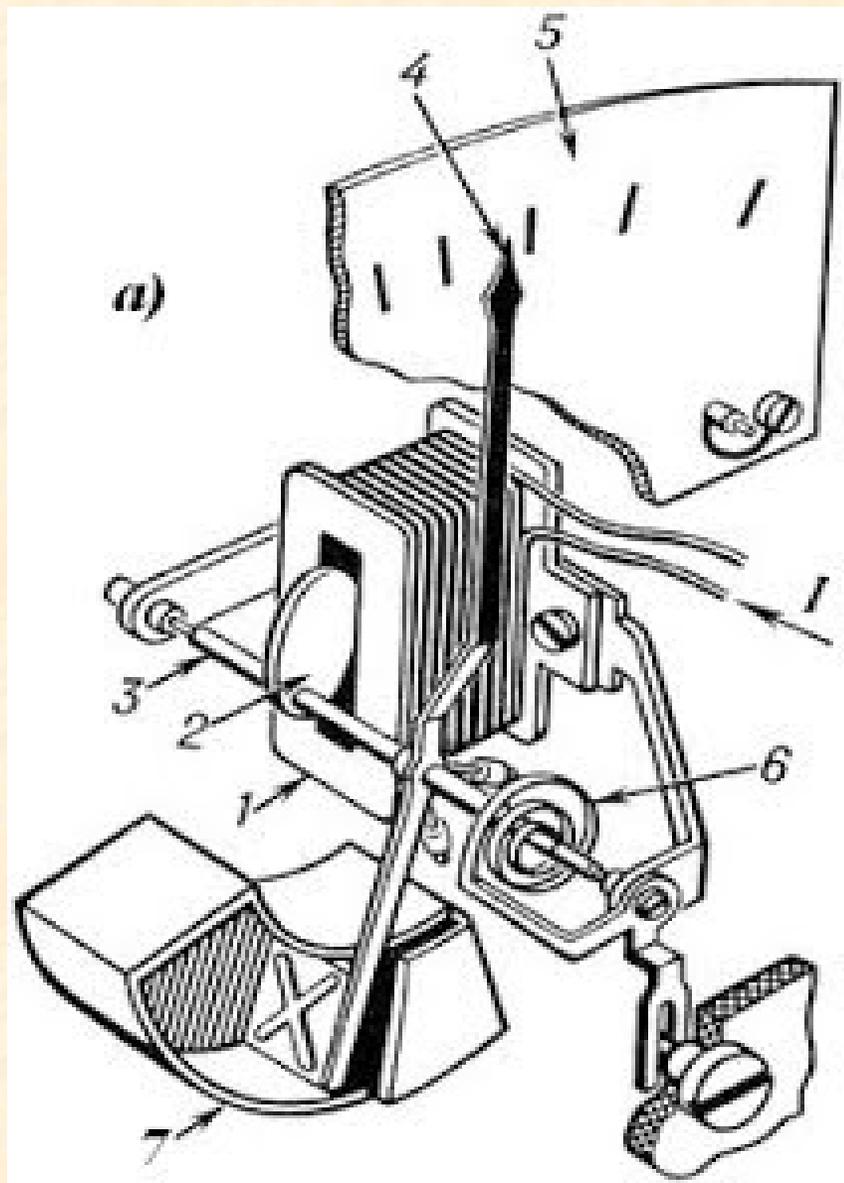
- Низкая чувствительность → ферродинамические ЭМП
- Нелинейность шкалы тока
- Сложная конструкция
- Низкая перегрузочная способность
- Сильное влияние внешних магнитных полей – требуется экранировка!!

Область применения:

Измерение постоянных и переменных токов с высокой точностью Классы точности – от 0.01. Рабочий эталон тока. Измерение мощности



Электромагнитный измерительный механизм



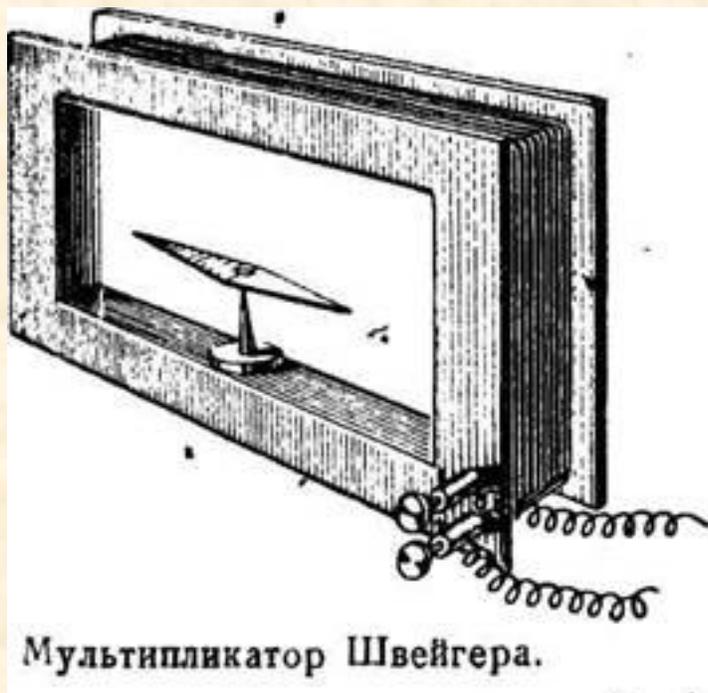
$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d \left(L \frac{i^2}{2} \right)}{d\alpha} = \frac{1}{\mu} \frac{dL}{d\alpha} \frac{i^2}{2}$$

Для переменного тока



$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{dL}{d\alpha} I^2$$

История: электромагнитный мультипликатор Швейггера (1820г)



Гальванометр, изобретённый в 1820 г. немецким учёным Иоганном Христофом Швайгерром (Johann Christoph Schweigger, 1779-1857), и названный им как мультипликатор

Свойства электромагнитного ЭМП

- Измеряет постоянные и переменные токи по одной шкале
- Измеряет среднеквадратическое значение переменного тока
- Простая и дешевая конструкция
- Высокая перегрузочная способность

Недостатки:

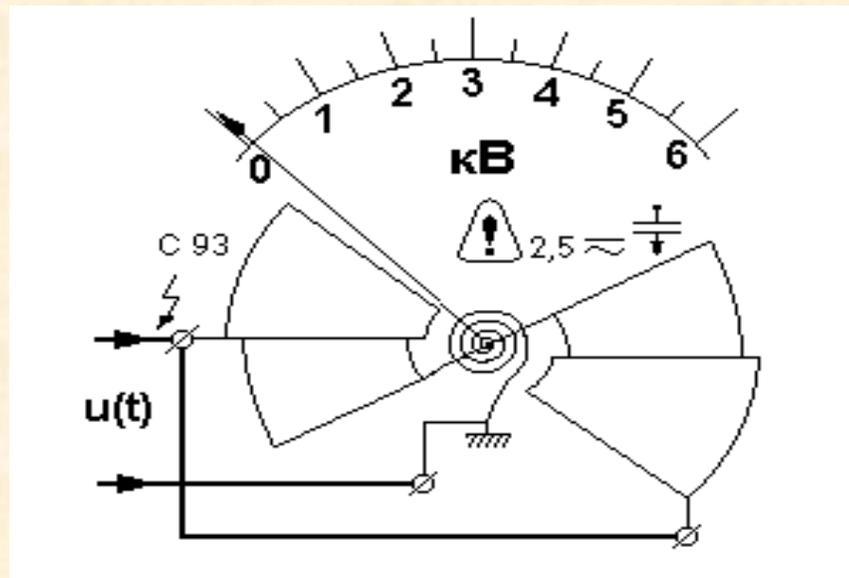
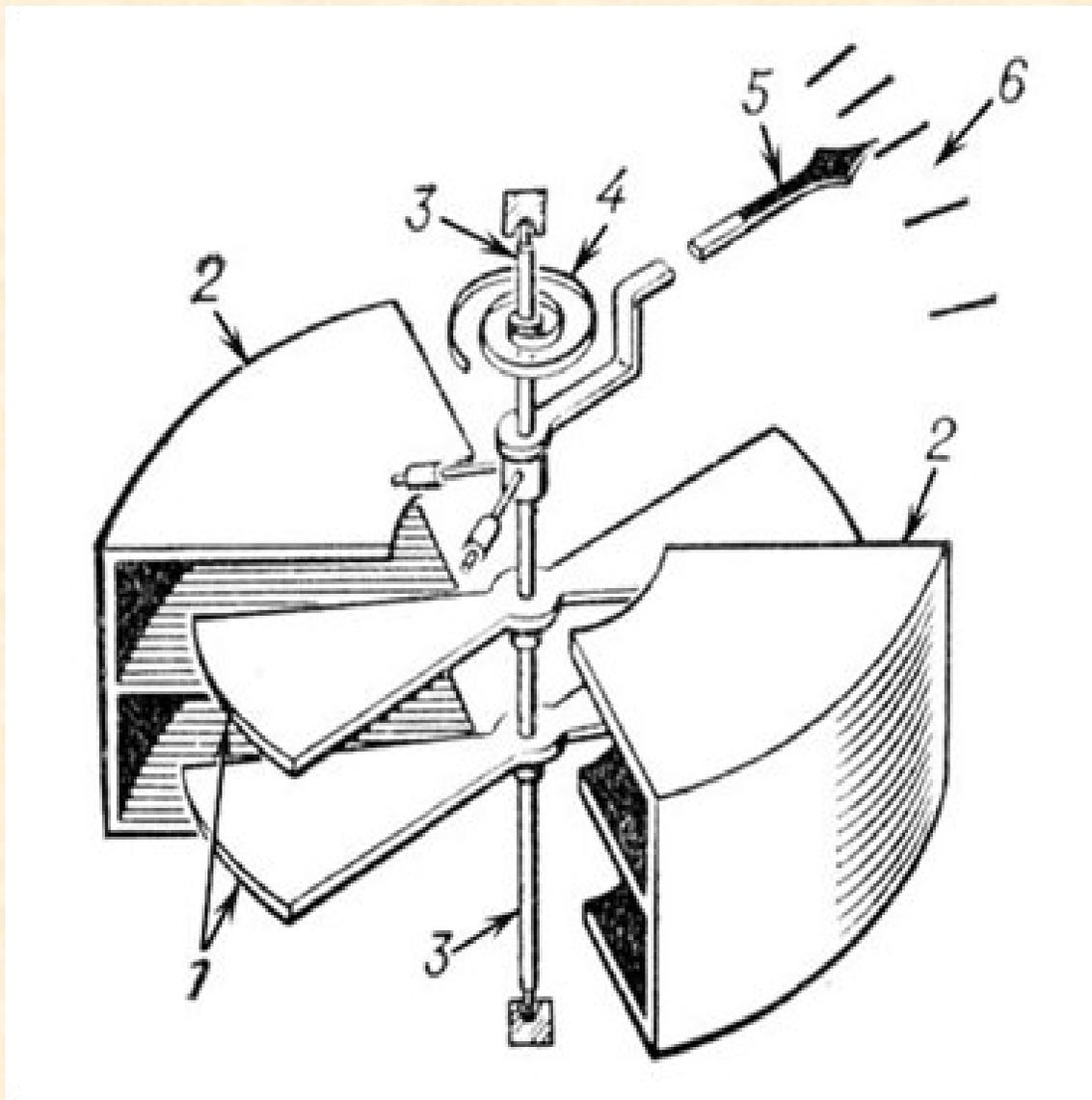
- Низкая чувствительность
- Низкая точность - нестабильность ферромагнетика
- Нелинейность шкалы тока
- Гистерезис ферромагнетика – вариация показаний на постоянном токе
- Сильное влияние внешних полей
- Большое потребление мощности
- Малый частотный диапазон - до 2 ...3 кГц

Область применения:

Измерение постоянных и переменных токов средних и больших величин. Классы точности – от 1.0.



Электростатический измерительный механизм



$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{d \left(C \frac{u^2}{2} \right)}{d\alpha} = \frac{1}{\mu} \frac{dC}{d\alpha} \frac{u^2}{2}$$

Для переменного напряжения $\rightarrow \alpha = \frac{1}{\mu} \frac{dC}{d\alpha} U^2$

Свойства электростатического ЭМП

- Измеряет постоянные и переменные напряжения по одной шкале
- Измеряет среднеквадратическое значение переменного напряжения
- Высокая точность - нет нестабильных элементов
- Простая и дешевая конструкция
- Высокая перегрузочная способность (но возможны пробой!!)
- Не потребляет энергии измеряемого сигнала – (большое входное сопротивление)
- Большой частотный диапазон- до 10 МГц

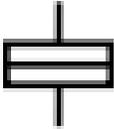
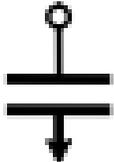
Недостатки:

- Нелинейность шкалы напряжения
- Низкая чувствительность
- Сильное влияние внешних электрических полей

Область применения:

Измерение постоянных и переменных напряжений средних и больших величин.
Киловольтметры. Классы точности – от 0.5

Характеристики электромеханических измерительных механизмов

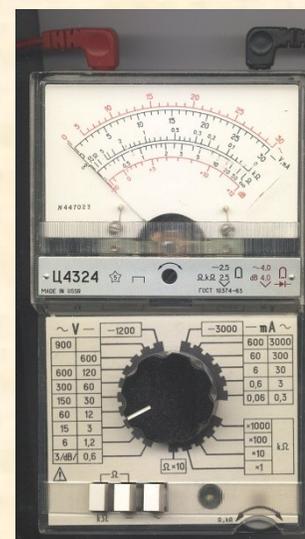
Тип измерительного механизма	Условное обозначение	Вращающий момент	Уравнение шкалы	Примечание
Магнитоэлектрический — МЭИМ (взаимодействие магнитных полей постоянного магнита и проводника (рамки) с током)		$M_{\varphi} = BnSI$	$\alpha = \frac{BnS}{k} I$	<p>I — ток в рамке; S — площадь рамки; n — число витков рамки; B — магнитная индукция; k — противодействующий момент (постоянный коэффициент); α — угол поворота указателя</p>
Электромагнитный — ЭМИМ (взаимодействие магнитного поля проводника с током и ферромагнитного сердечника)		$M_{\varphi} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{2k} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$	<p>L — индуктивность катушки; I — ток в катушке</p>
Электродинамический — ЭДИМ (взаимодействие магнитных полей двух проводников с током)		$M_{\varphi} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{k} I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cos(I_1, I_2)$	<p>I_1 — ток в подвижной катушке; I_2 — ток в неподвижной катушке; M_{12} — взаимная индуктивность между катушками</p>
Электростатический — ЭСИМ (взаимодействие двух заряженных электродов)		$M_{\varphi} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$	$\alpha = \frac{1}{2k} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$	<p>U — напряжение между электродами; C — емкость между электродами</p>

Электромеханические амперметры и вольтметры



Электромеханические мультиметры (тестеры, ампервольтметры, авометры)







СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники и
телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических основ
радиотехники*



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

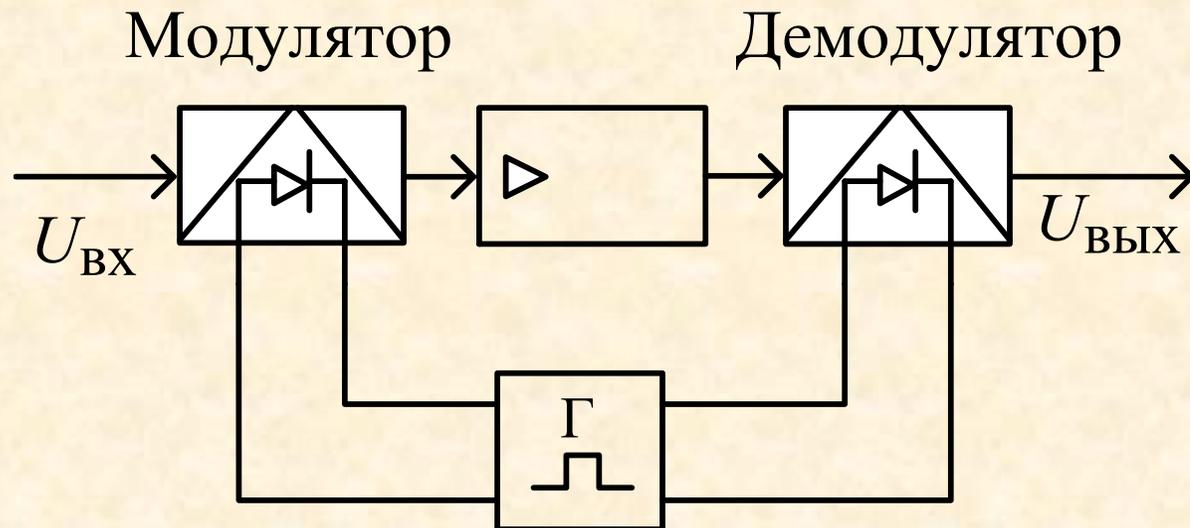
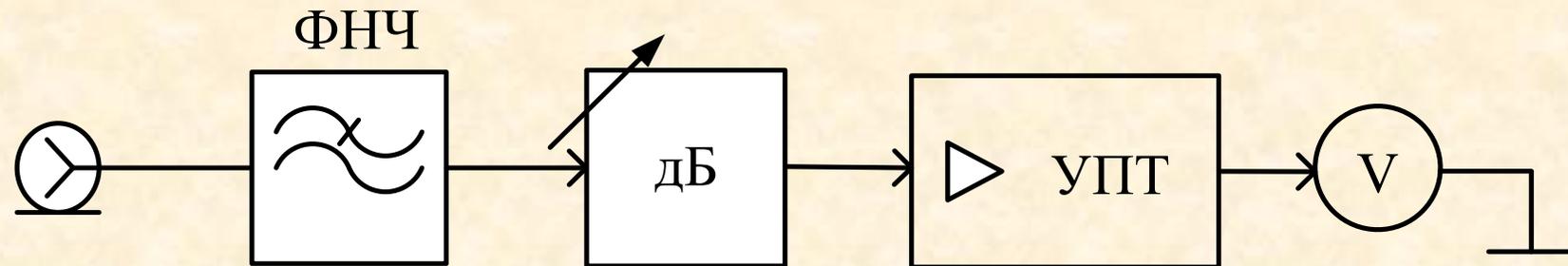
«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Электронные вольтметры

Санкт-Петербург
2024 г.

Электронные аналоговые вольтметры постоянного тока



УПТ типа «модулятор –
демодулятор» (МДМ) с
малым дрейфом нуля

Измерение переменного напряжения



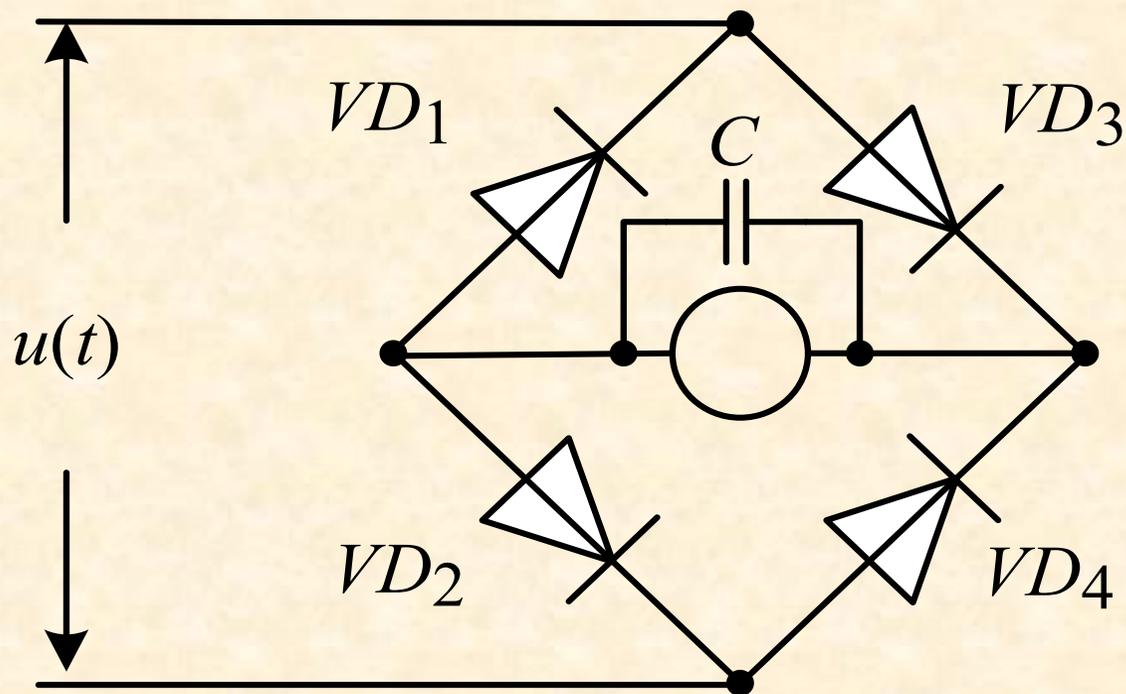
Вольтметр переменного тока типа **«усилитель-детектор»** - высокая чувствительность, большое входное сопротивление, ограниченный частотный диапазон

Вольтметр переменного тока типа **«детектор-усилитель»** - широкий частотный диапазон, высокое входное сопротивление, но малая чувствительность

Вольтметр средневыпрямленного значения

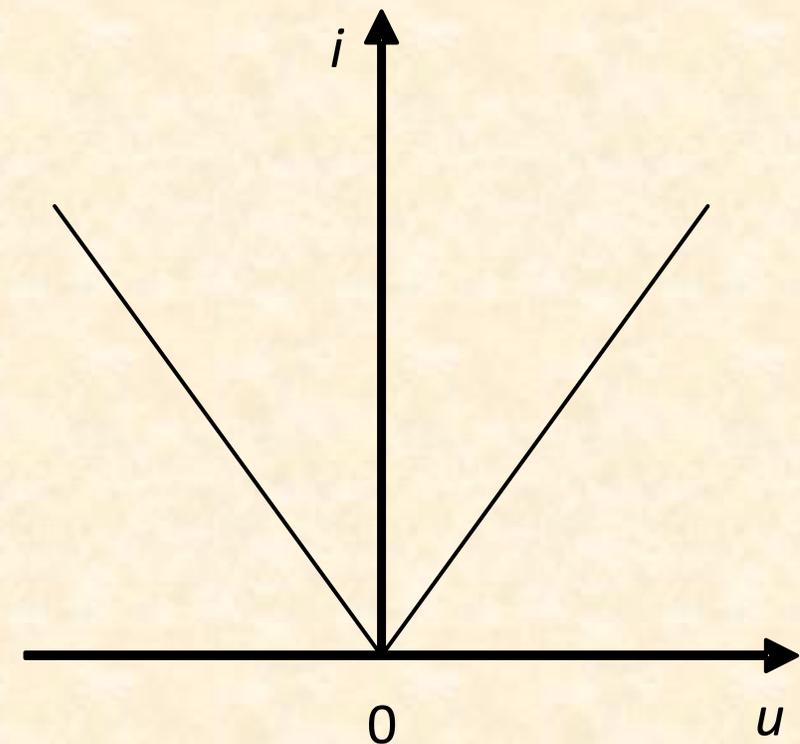
Детектор средневыпрямленных значений реализует преобразования «модуль-интеграл»

$$u(t) \rightarrow |u(t)| \rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$



Детектор
средневыпрямленных
значений – диодный мост
(выпрямитель)

Ток через микроамперметр протекает в одном направлении в течение обоих полупериодов переменного напряжения (в положительный полупериод по цепи VD2–R–VD3, а в отрицательный – по цепи VD4–R–VD1). При использовании **линейного участка ВАХ** диода вольтамперная характеристика детектора позволяет взять модуль от входного напряжения

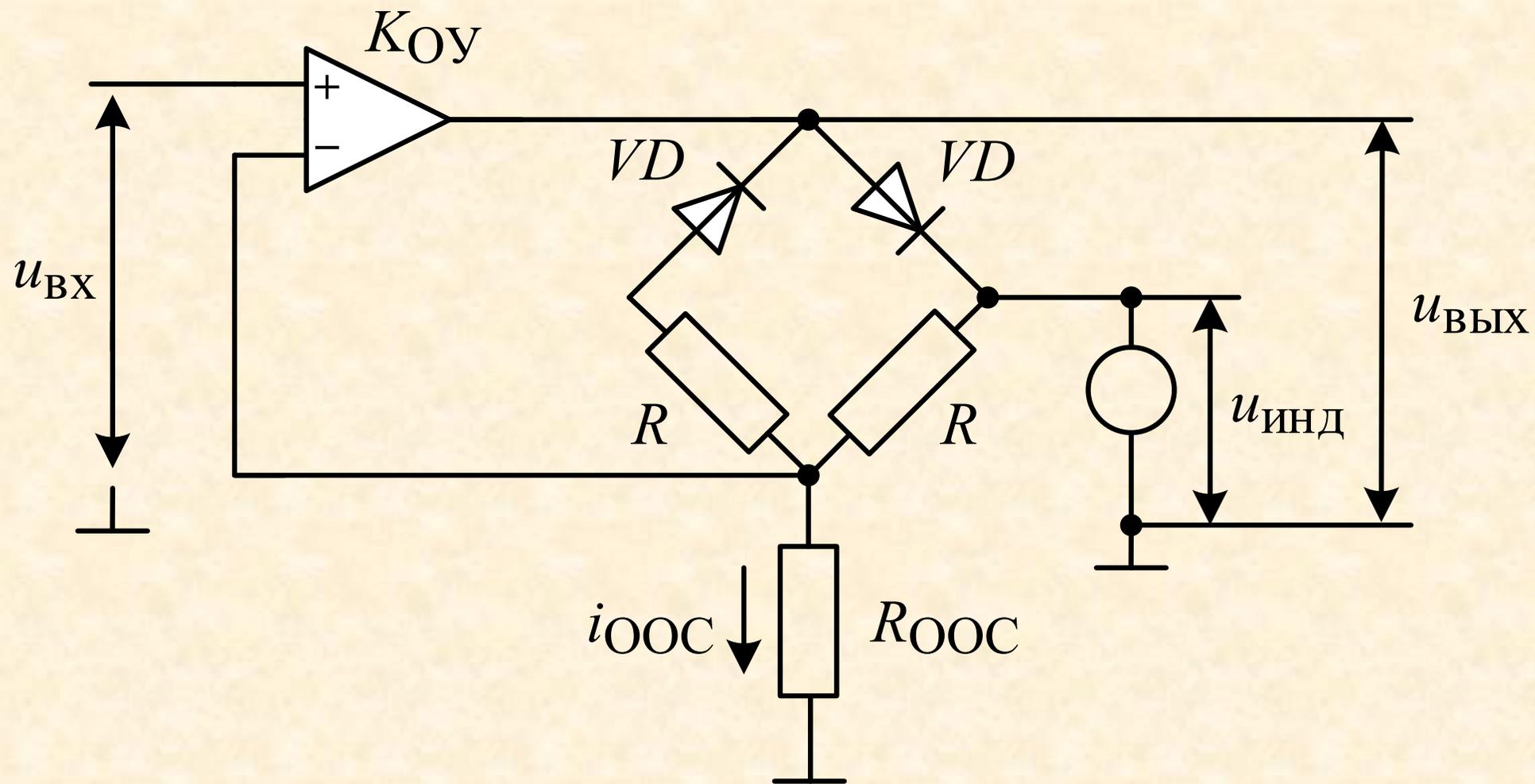


ВАХ детектора

среднеквадратических значений при линейных значениях

ВАХ диодов

Схема детектора средневыпрямленных значений с ООС



Вольтметр среднеквадратического значения

$$u(t) \rightarrow (u(t))^2 \rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt \rightarrow \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt}$$

Преобразования в детекторе
среднеквадратического
значения

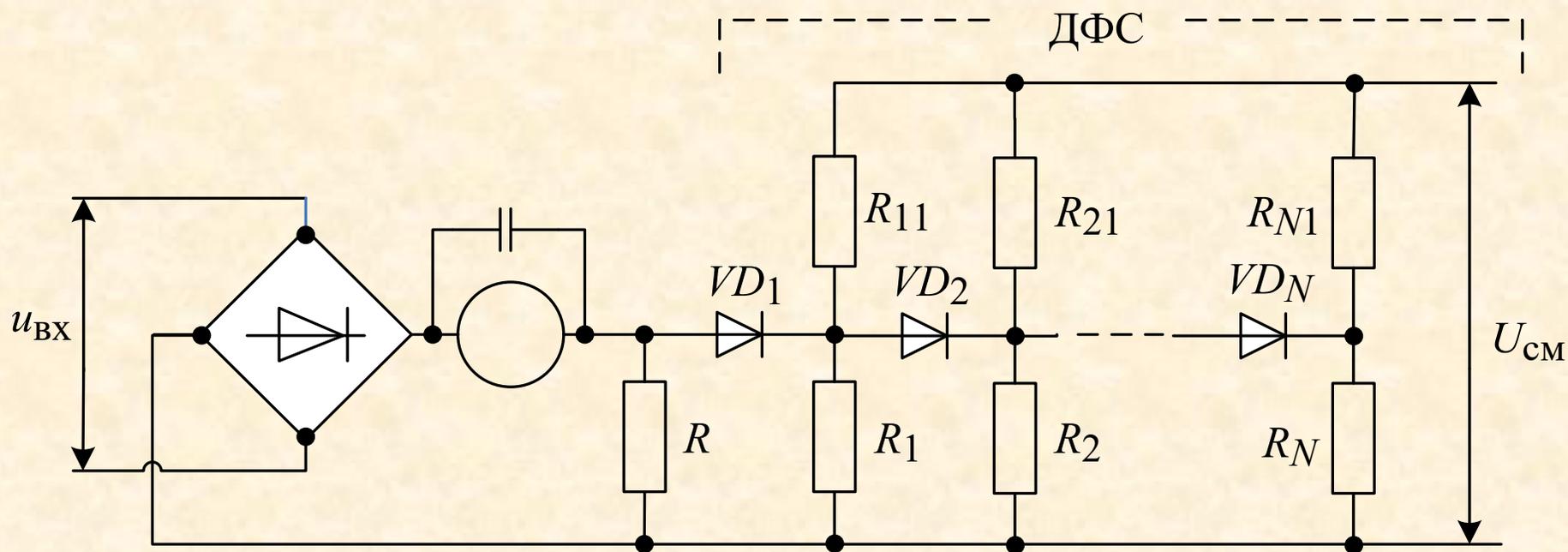


Схема детектора среднеквадратичных значений с ДФС

- При малом входном напряжении диод $VD1$ заперт напряжением первого делителя:

$$E_1 = \frac{U_{\text{см}} R_1}{R_1 + R_{11}}$$

Ток через индикатор (магнитоэлектрический миллиамперметр) определяется сопротивлением резистора R . При

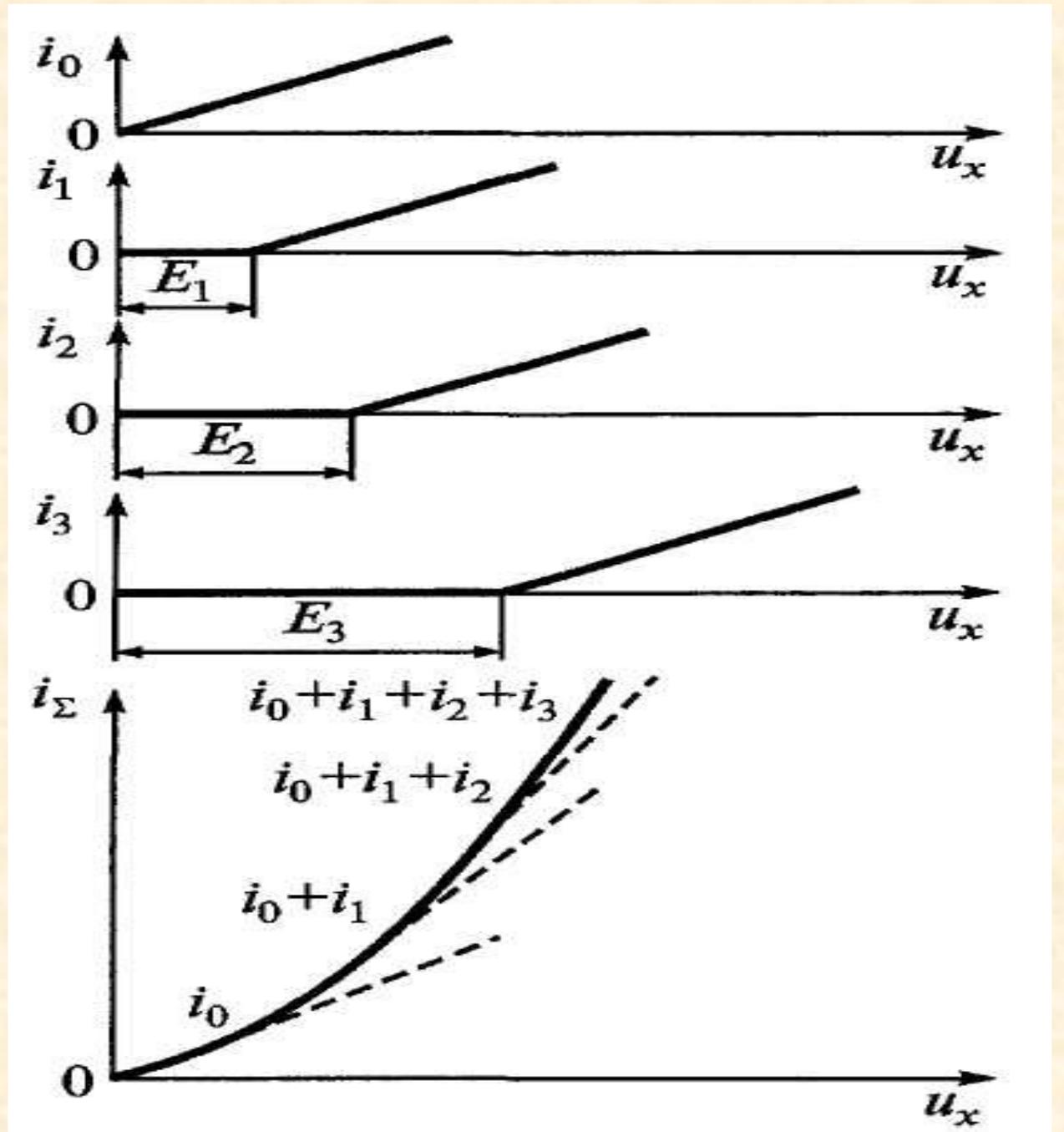
$$u_{\text{вх}} > E_1$$

диод отпирается, тогда ток через прибор возрастает за счёт шунтирования резистора R параллельно подключённым к нему (через открытый диод) резистором $R1$. Второй диод $VD2$ в этот момент заперт напряжением:

$$E_2 = \frac{U_{\text{см}} R_2}{R_2 + R_{21}} > E_1$$

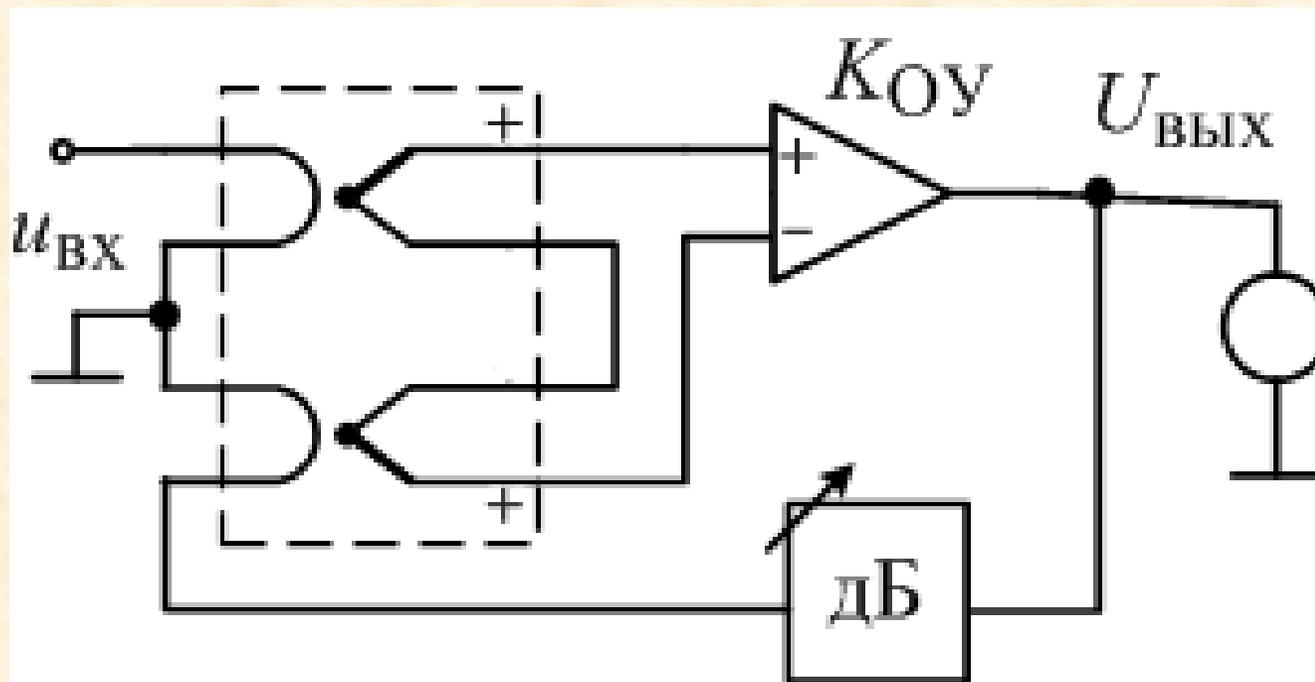
При возрастании $u_{вх}$ отпирается второй диод. Ток определяется тремя параллельно соединёнными резисторами. Подбором запирающих напряжений E_N всех диодных цепочек и резисторов R_N строится кусочно-линейная аппроксимация квадратичной ВАХ детектора.

:



Детектор с термоэлектрическим преобразователем.

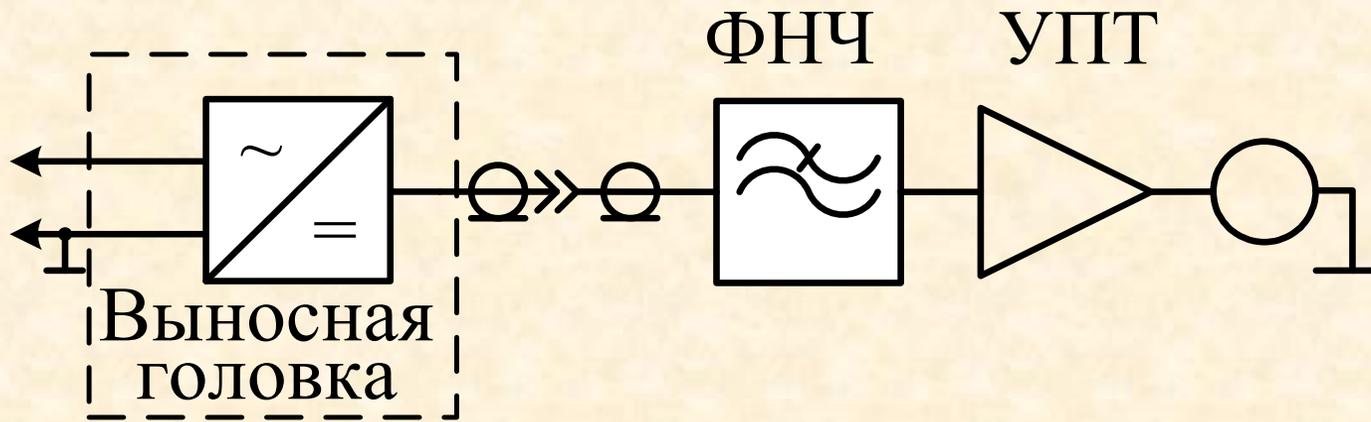
$$u(t) \rightarrow P = \frac{1}{R_h T} \int_0^T (u(t))^2 dt = \frac{U^2}{R_h} = (t_2^0 - t_1^0) / R_t \rightarrow E_t = K_t (t_2^0 - t_1^0) = \frac{R_t K_t}{R_h} U^2,$$



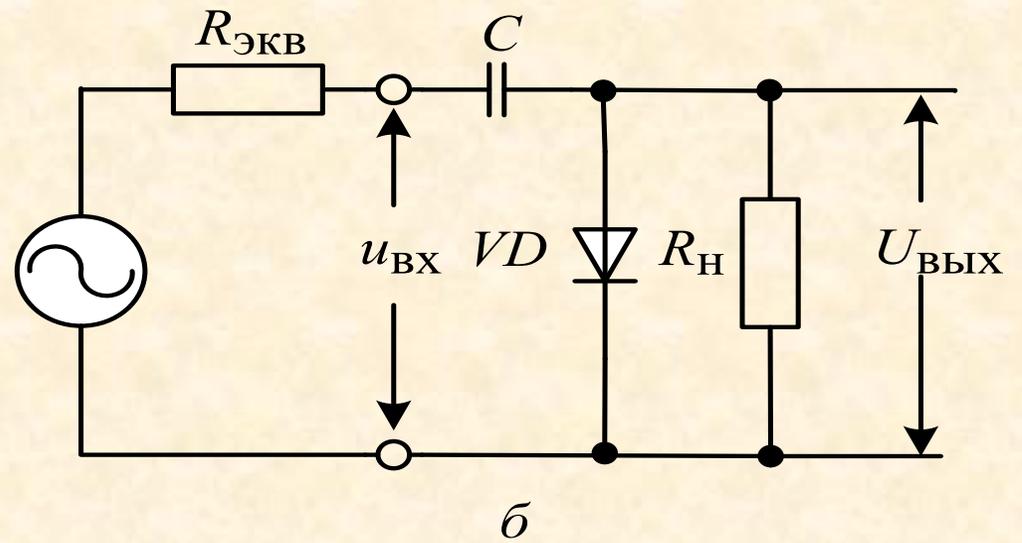
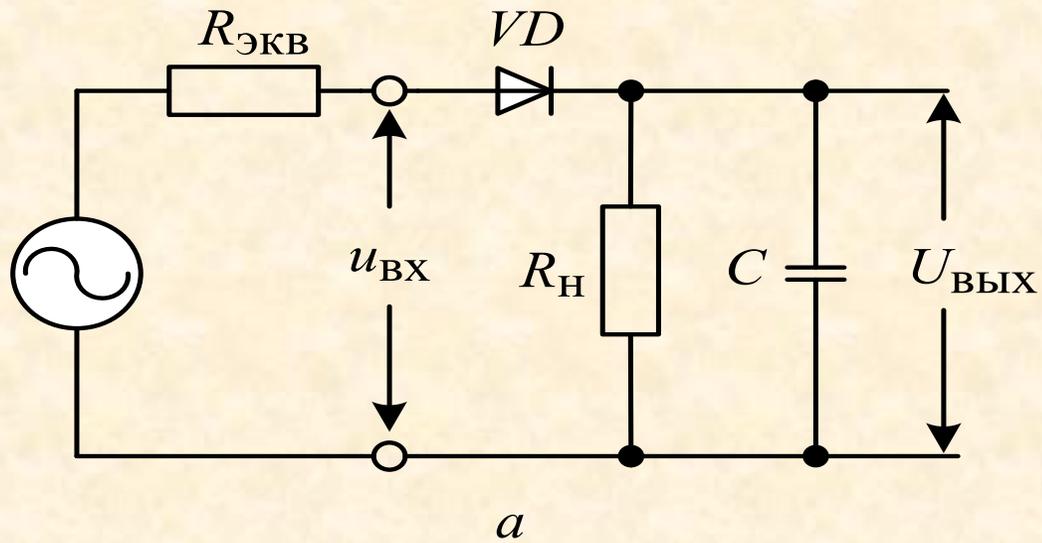
$$U_{ВЫХ} = \frac{K_{ОУ} R_t K_t}{R_h} (U_{ВХ}^2 - U_{ВЫХ}^2 K_{ат}^2) \quad \rightarrow \quad U_{ВЫХ} \cong \frac{U_{ВХ}}{K_{ат}}$$

При большом $K_{ОУ}$

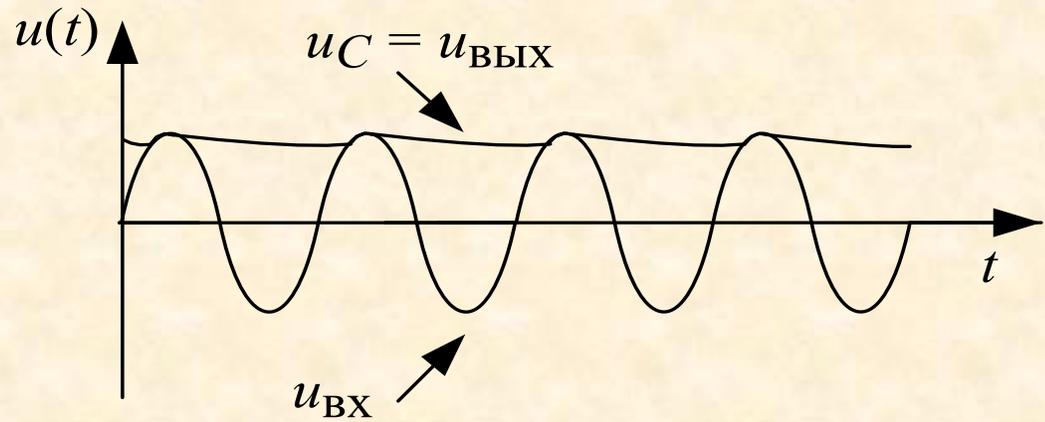
Вольтметры амплитудного значения (импульсные вольтметры)



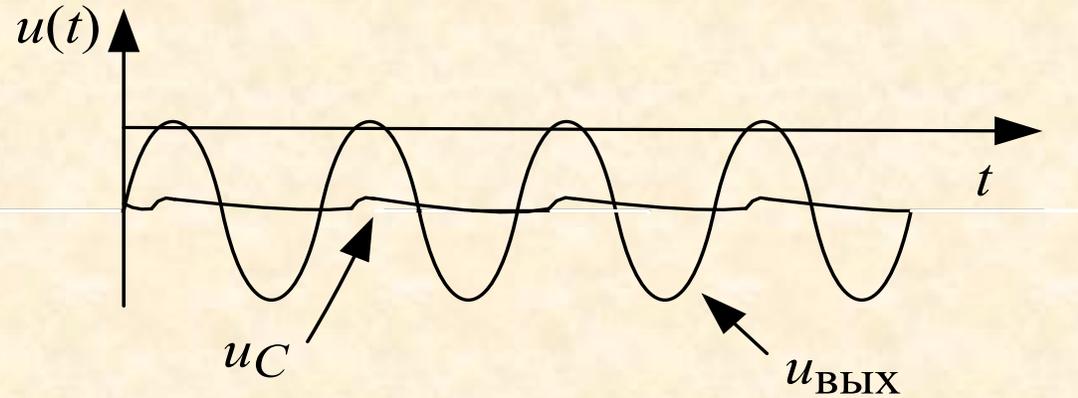
Структурная схема амплитудного вольтметра типа «детектор–усилитель»



Амплитудный детектор: а – с открытым входом; б – с закрытым входом



a



б

. Временные диаграммы напряжений амплитудного детектора: *a* – с открытым входом; *б* – с закрытым входом

$$\tau^+ \cong C \left(R_{VD}^+ + R_{ЭКВ} \right)$$

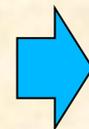
$$\tau^- = C \left(\left(R_{VD}^- + R_{ЭКВ} \right) \parallel R_H \right)$$

закрытым входом



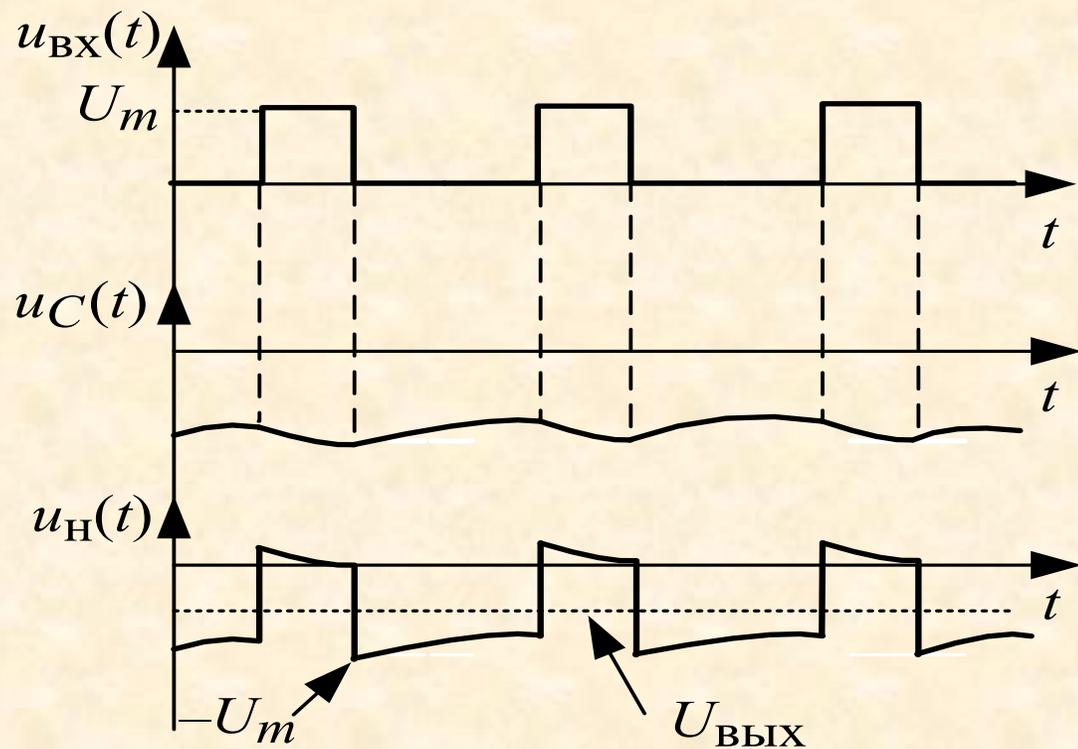
Постоянные времени заряда и разряда конденсатора в схеме с открытым входом

. Постоянные времени заряда и разряда конденсатора в схеме с закрытым входом



$$\tau^+ \cong C \left(R_{VD}^+ + R_{ЭКВ} \right)$$

$$\tau^- = C \left(R_{ЭКВ} + \left(R_{VD}^- \parallel R_H \right) \right)$$



Диаграммы напряжений
 пикового детектора
 с закрытым входом при
 импульсном сигнале

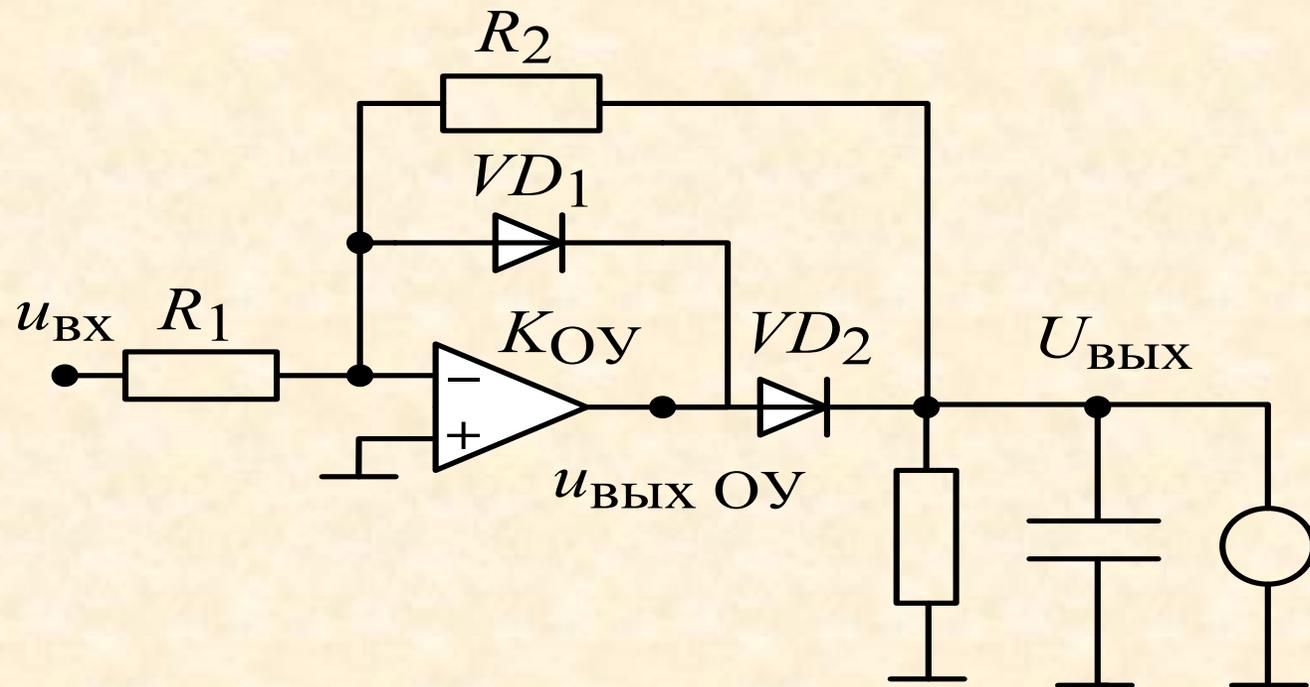
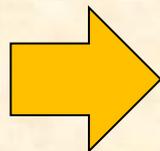
Среднее значение напряжения на выходе после сглаживающего ФНЧ

$$U_{\text{вых}} \cong U_m - \bar{U}_{\text{вх}} = U_{m+}$$

Если переключить полярность диода, то $U_{\text{вых}} \cong U_{m+} - U_m = U_{m-}$

Для определения полного размаха импульса надо сложить U_{m+} и U_{m-}

Амплитудный
детектор
с нелинейной
ООС



Конденсатор заряжается при отрицательном значении сигнала на входе через открытый диод $VD2$ до амплитуды выходного напряжения $u_{ВЫХ} ОУ$.

Диод $VD1$ закрыт – поэтому напряжение определено отношением резисторов ООС $R2/R1$. При положительном напряжении на входе $ОУ$ выходное напряжение отрицательно и близко к нулю из-за открытого диода $VD1$. Диод $VD2$ закрыт и конденсатор практически не разряжается.

Электронные аналоговые вольтметры



Электронные милливольтметры GW Instek



GVT-427B

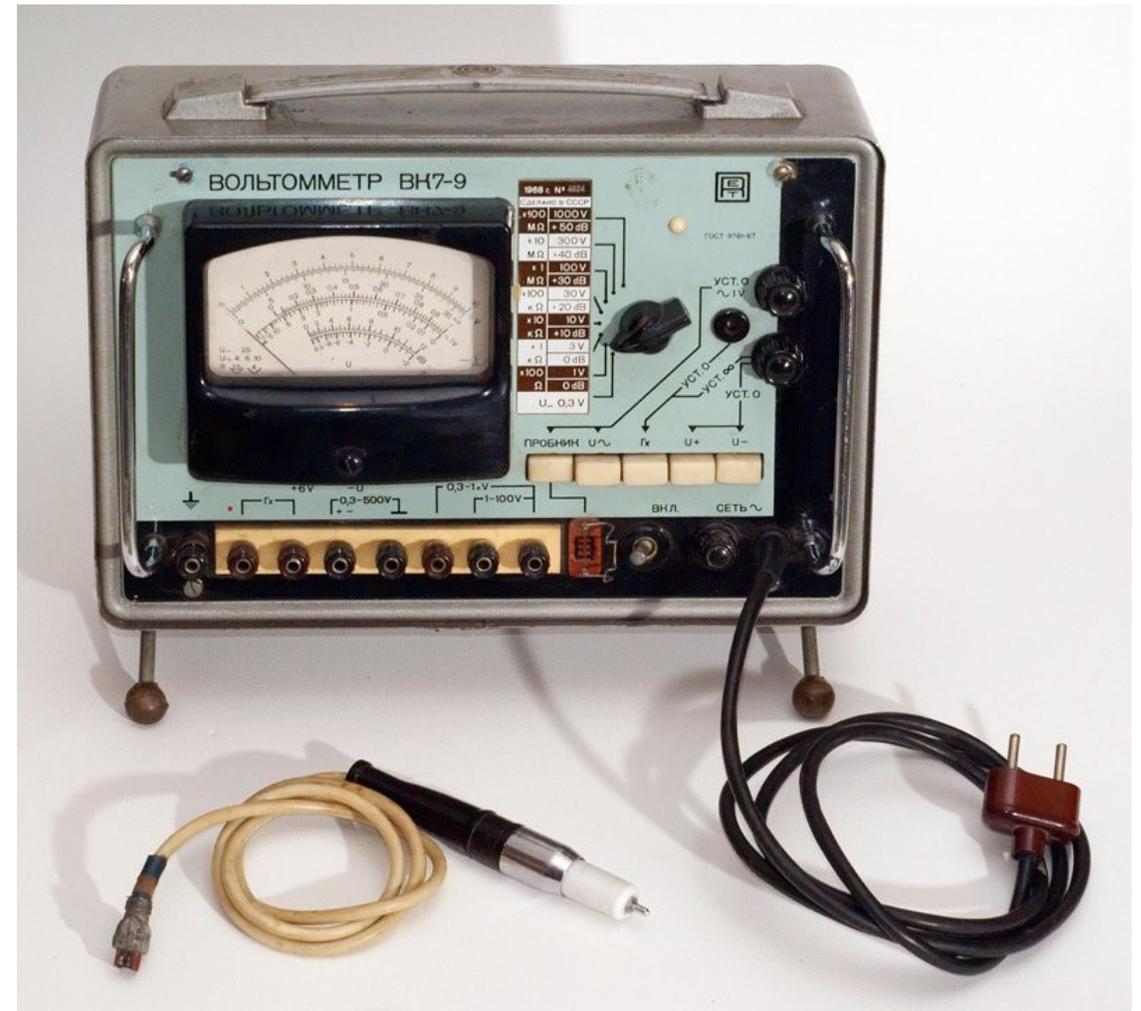


GVT-417B

Электронные ВЧ вольтметры



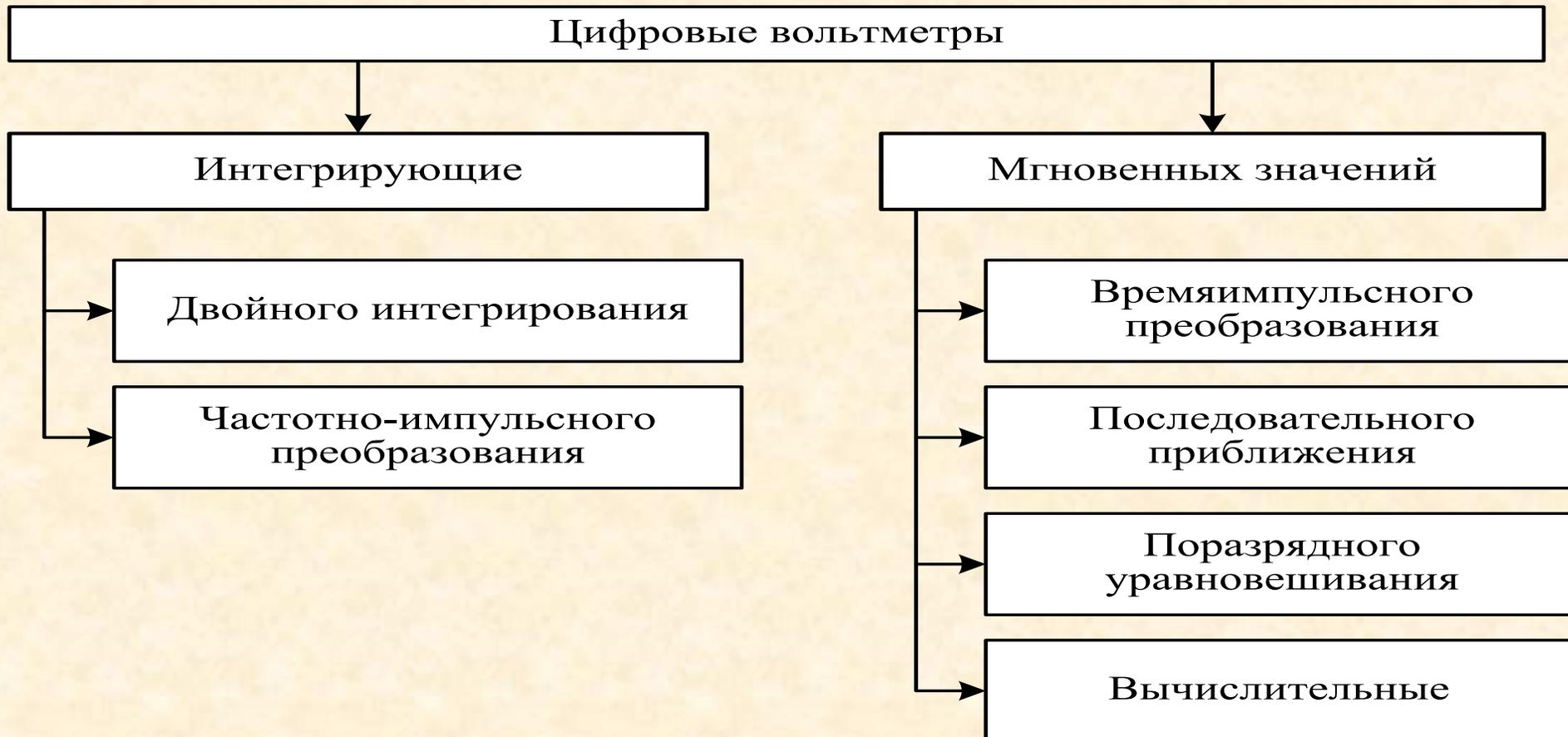
Вольтметр среднеквадратического значения 0,3мВ - 300В, 50 МГц.



Вольтметр амплитудного значения 0,3 В - 100 В; 20 Гц – 700 МГц

Цифровые вольтметры

Цифровые вольтметры (ЦВ) - приборы для измерения напряжения с цифровой индикацией результата. Используют преобразование аналогового значения напряжения в цифровой код *аналого-цифровым преобразователем (АЦП)*.



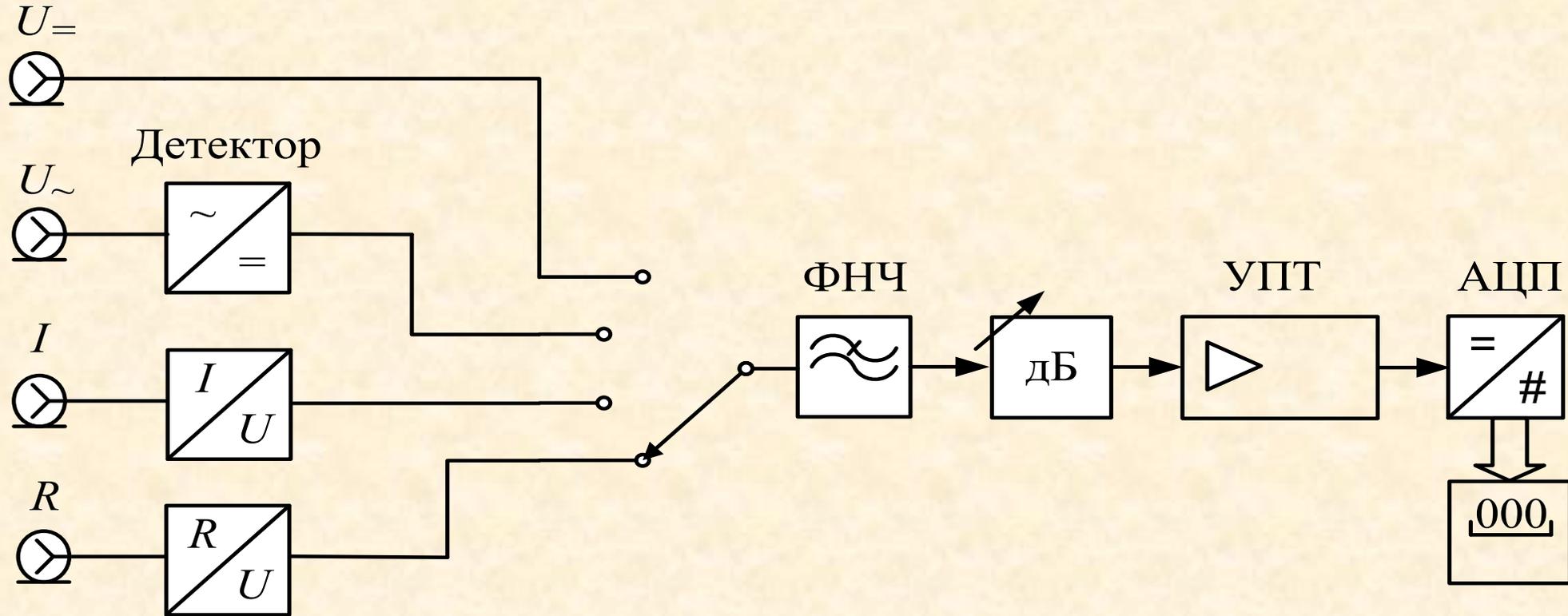
Достоинства ЦВ по сравнению с аналоговыми вольтметрами:

- высокая и заранее известная точность;
- широкий диапазон измерения напряжения, высокая чувствительность;
- отсутствие субъективной погрешности при отсчёте результата;
- Многофункциональность (мультиметры);
- простота автоматизации измерений;
- возможность подключения вольтметра к компьютеру, в измерительные системы.

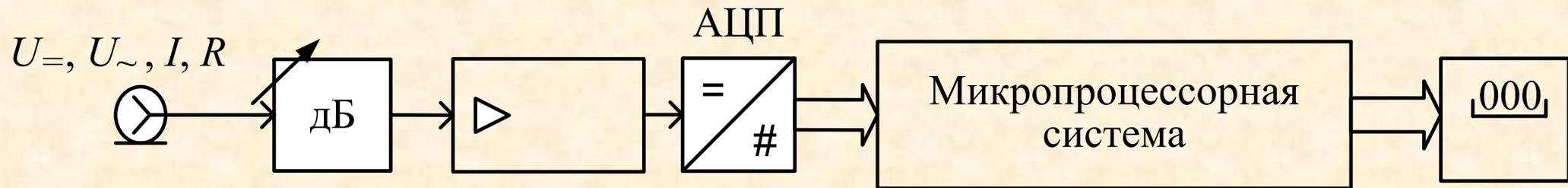
Недостатки ЦВ:

- относительная сложность схемы и дороговизна;
- ограниченная рабочая полоса частот и небольшое быстродействие;
- в ряде ЦВ низкая помехоустойчивость
- для ряда измерительных задач (поиск максимума, настройка и пр.) отсутствие аналогового индикатора в вольтметре усложняет работу с прибором.

Структурная схема цифрового вольтметра-мультиметра



Структурная схема вычислительного цифрового вольтметра



Параметры ЦВ (кроме общих параметров аналоговых вольтметров):

- разрешающая способность (шаг квантования). Это дискрет напряжения, которое способен различить ЦВ. Разрешающая способность задает минимальную погрешность измерения. Обычно она соответствует единице младшего разряда результата измерения;
- разрядность ЦВ – это число десятичных знаков (разрядов) в результате, выводимом на отсчетное устройство.. Если старший разряд *неполный* (например, может принимать значения 0 и 1), то говорят о *дробной разрядности вольтметра*. $3 \frac{1}{2}$ разряда соответствует индикации в пределах 0000...1999, $3 \frac{3}{4}$ – 0000...3999. Числитель дробного разряда показывает максимальное значение, которое он может принимать, а знаменатель - число возможных состояний. Если неполный разряд $\frac{1}{2}$, то единица - это максимальное значение, которое он может принимать, а двойка - число возможных состояний (0 или 1). Для $\frac{3}{4}$ максимальное значение 3 и четыре возможных состояния (0, 1, 2 или 3).

Предел допускаемой основной и дополнительной погрешностей, %, согласно ГОСТ 14014–94 указывают в стандартном виде:

$$\delta = \pm \left(c + d \left(\frac{U_{\max}}{U_x} - 1 \right) \right) \quad \text{или} \quad \delta = \pm \left(c' + d \left(\frac{U_{\max}}{U_x} \right) \right)$$

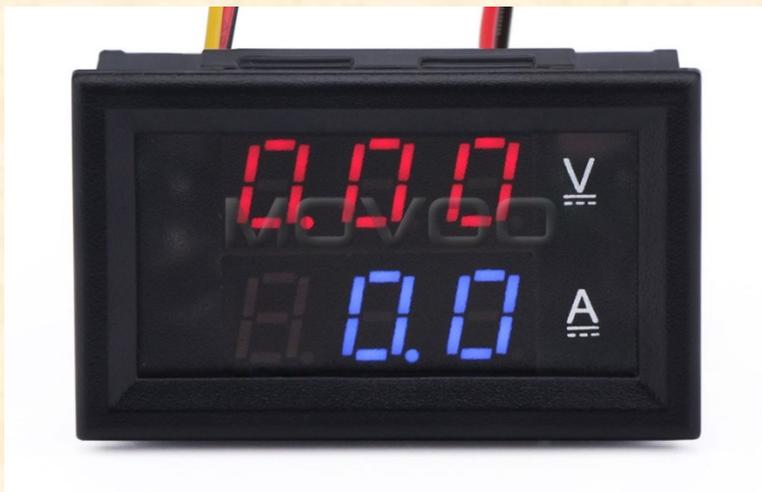
Вывод формулы: $\Delta = a + bU_x$; $\delta = \frac{\Delta}{U_x} = \frac{a}{U_x} + b + \frac{a}{U_{\max}} - \frac{a}{U_{\max}}$;

$$d = \frac{a}{U_{\max}}; c = b + d; \delta = c + d \left(\frac{U_{\max}}{U_x} - 1 \right);$$



Формула для погрешности включает мультипликативную и аддитивную части и учитывает как погрешности квантования, так и инструментальные погрешности АЦП (нелинейность преобразования, смещение нуля) и других блоков вольтметра.

Цифровые вольтметры и мультиметры



Цифровые переносные мультиметры





СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники и
телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических основ
радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет**

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

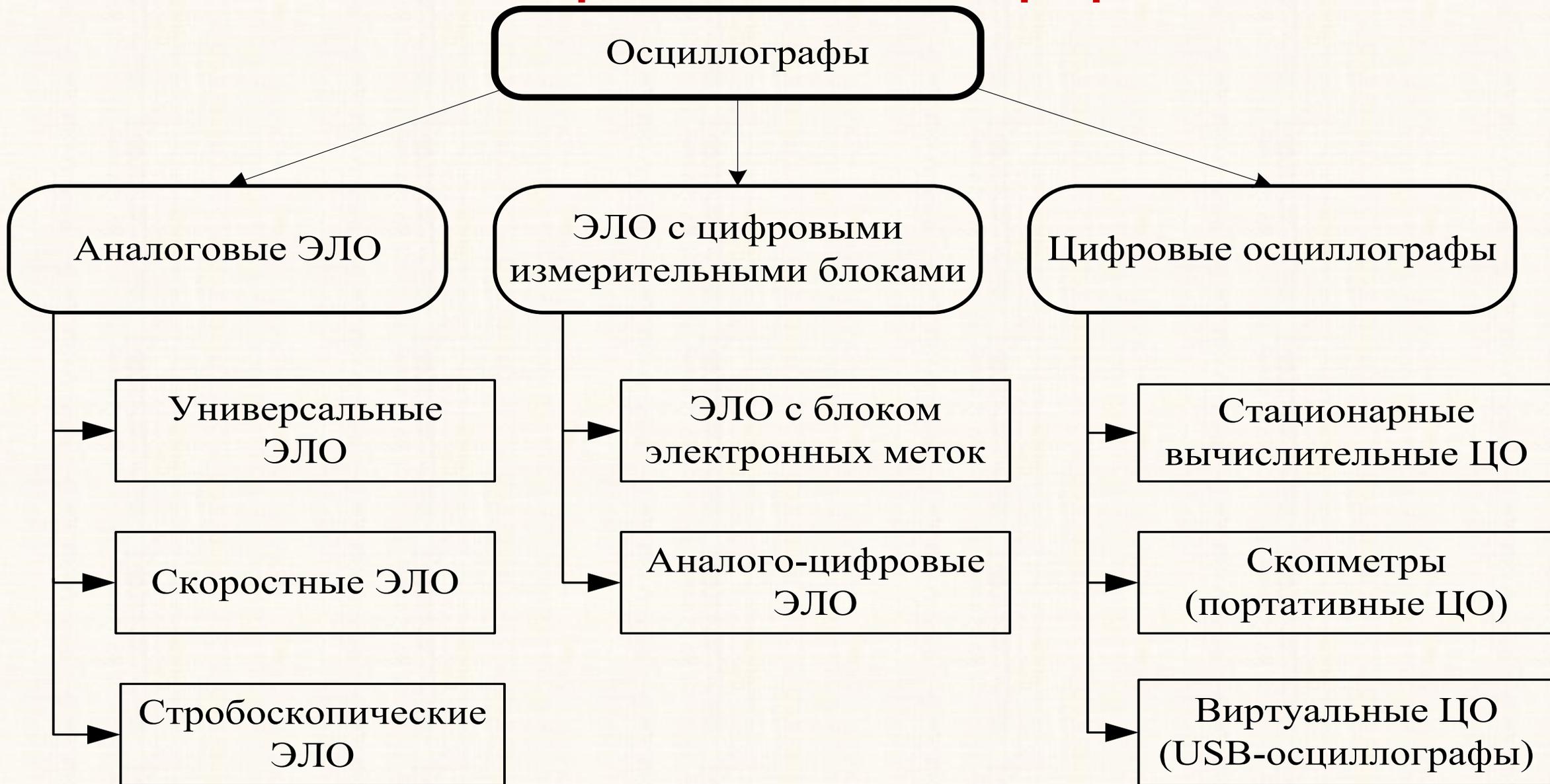
«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Электронно-лучевой осциллограф

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Классификация осциллографов



Краткая история осциллографии

В 1885 году российский физик А.Р.Колли создал *осциллометр* – прототип шлейфовых осциллографов. В 1893 году французский физик Андре Блондель (*Andre Blondel*) изобрел электромеханический осциллограф.

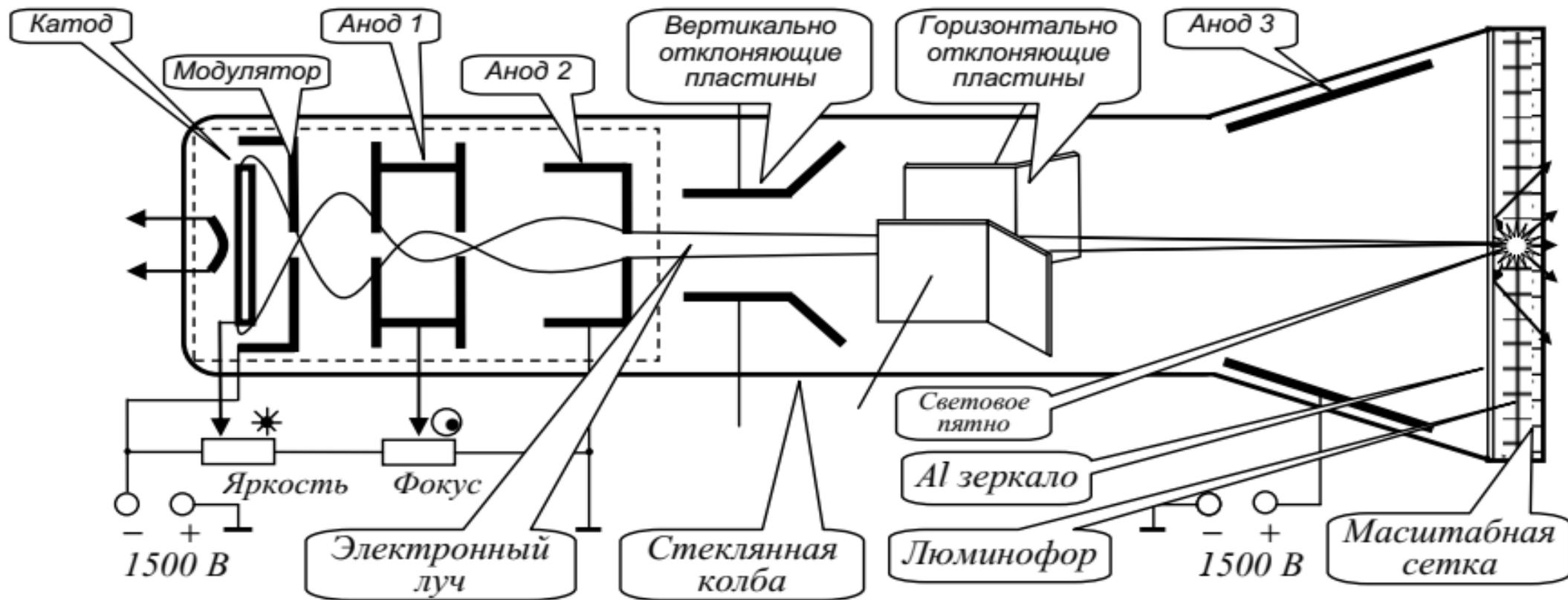
В 1897 году немецкий ученый Карл Фердинанд Браун (*Karl Ferdinand Braun*) создал первый катодно-лучевой осциллограф. В 1907 году российский ученый, профессор Б.Л.Розинг (1836-1933) предложил телевизионную систему с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) с видимым изображением, на экране которой он увидел форму электрического разряда молнии. Эта система и стала прообразом электронного осциллографа.

В 1931 году американская компания *General Radio* впервые продемонстрировала осциллограф, который уже можно было использовать вне лаборатории. Первый двухлучевой осциллограф был разработан в конце 1930-х годов английской компанией *Cossor*, в дальнейшем *Raytheon*. Фосфорное послесвечение в ЭЛТ было введено компанией *Du Mont Labs*, США. К концу 1940-х годов мировым лидером в осциллографии стала компания *Tektronix*, вскоре к ней присоединилась компания *Hewlett-Packard*, и уже в 1950-х годах практически во всех технически развитых странах стали производить эти приборы.

В 1946 году Говард Воллум (*Howard Vollum*) и Мелвин Джек Мёрдок (*Melvin Jack Murdock*), основатели фирмы *Tektronix*, изобрели осциллограф со *ждущей разверткой* модель 511, имеющий полосу пропускания 10 МГц. Первый промышленный *стробоскопический осциллограф* 185А был выпущен фирмой *Hewlett-Packard* в 1960 году и имел полосу пропускания 500 МГц. В 1963 году фирма *Tektronix* впервые выпустила на рынок осциллограф на *бистабильной запоминающей ЭЛТ*, позволивший регистрировать однократные сигналы. Первый *цифровой осциллограф* был разработан под руководством Уолтера ЛеКроя (*Walter LeCroy*), основателя фирмы *LeCroy*, для исследовательского центра *CERN* в конце 1970-х годов.

Первый советский промышленный электронный осциллограф был разработан на заводе 555 в Вильнюсе Сергеем Николаевичем Макеевым в 1948 году и серийно выпускался Рыбинским приборостроительным заводом. В 1957 году его наименование было изменено с ЭО-7 на С1-1. Полоса пропускания осциллографа составляла 250 кГц.

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)



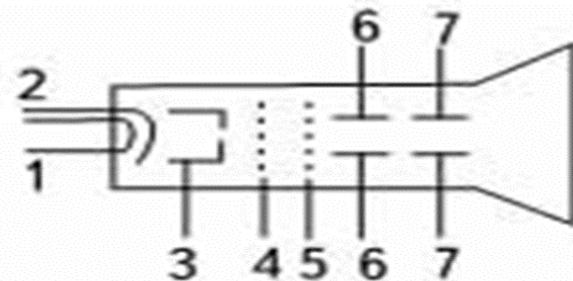
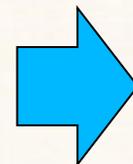
Условное обозначение ЭЛТ на схемах:

1,2 – нагреватель и катод;

3- модулятор;

4,5 – аноды;

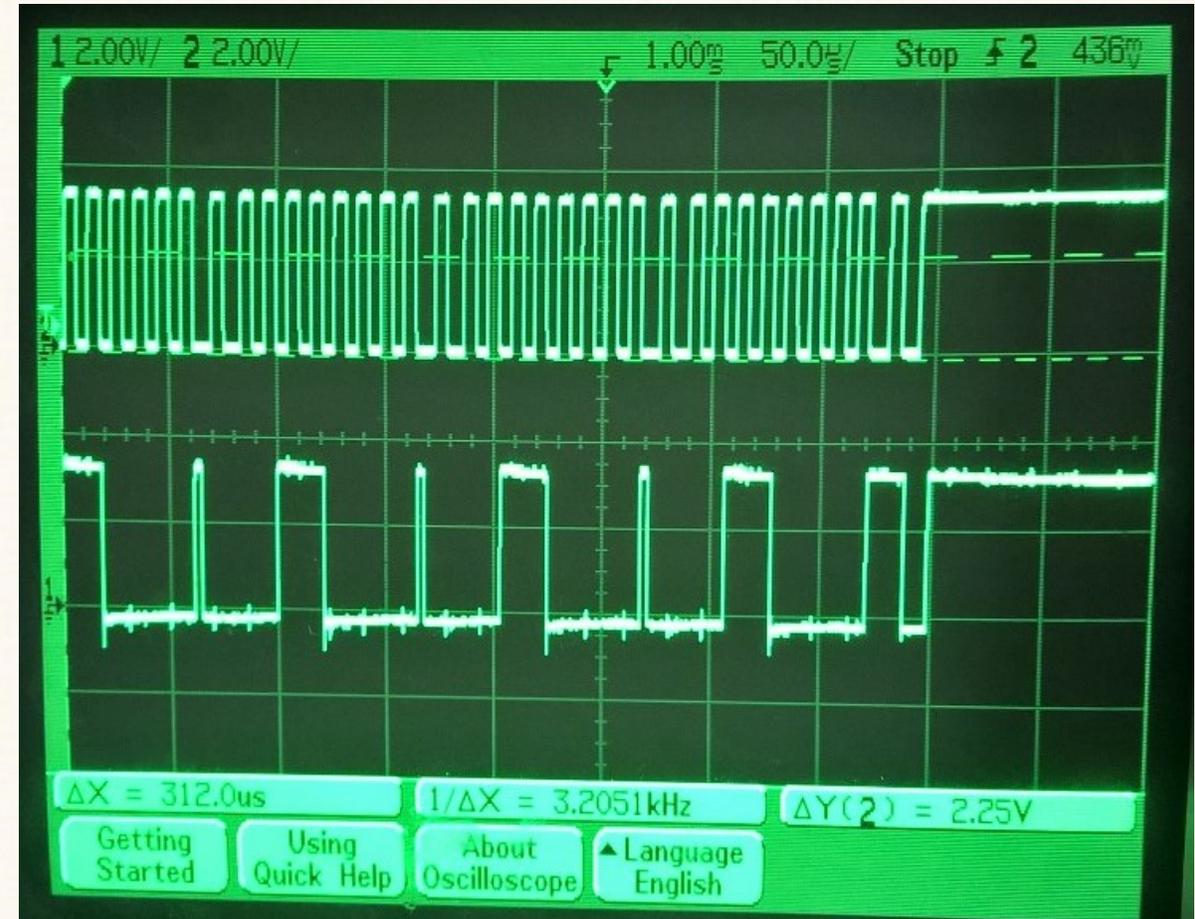
6, 7 - отклоняющие пластины



Экран осциллографа

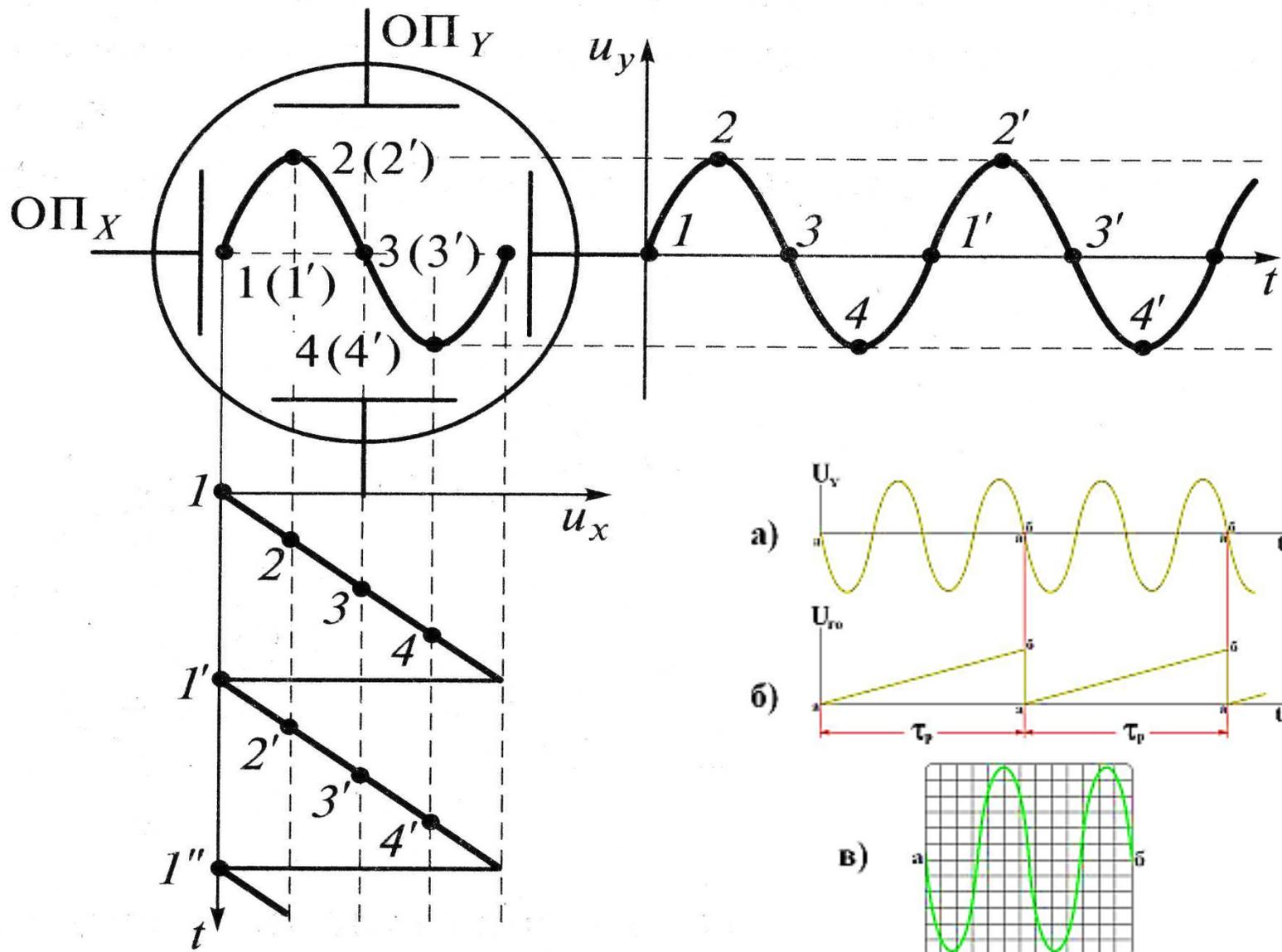


Аналоговый ЭЛО

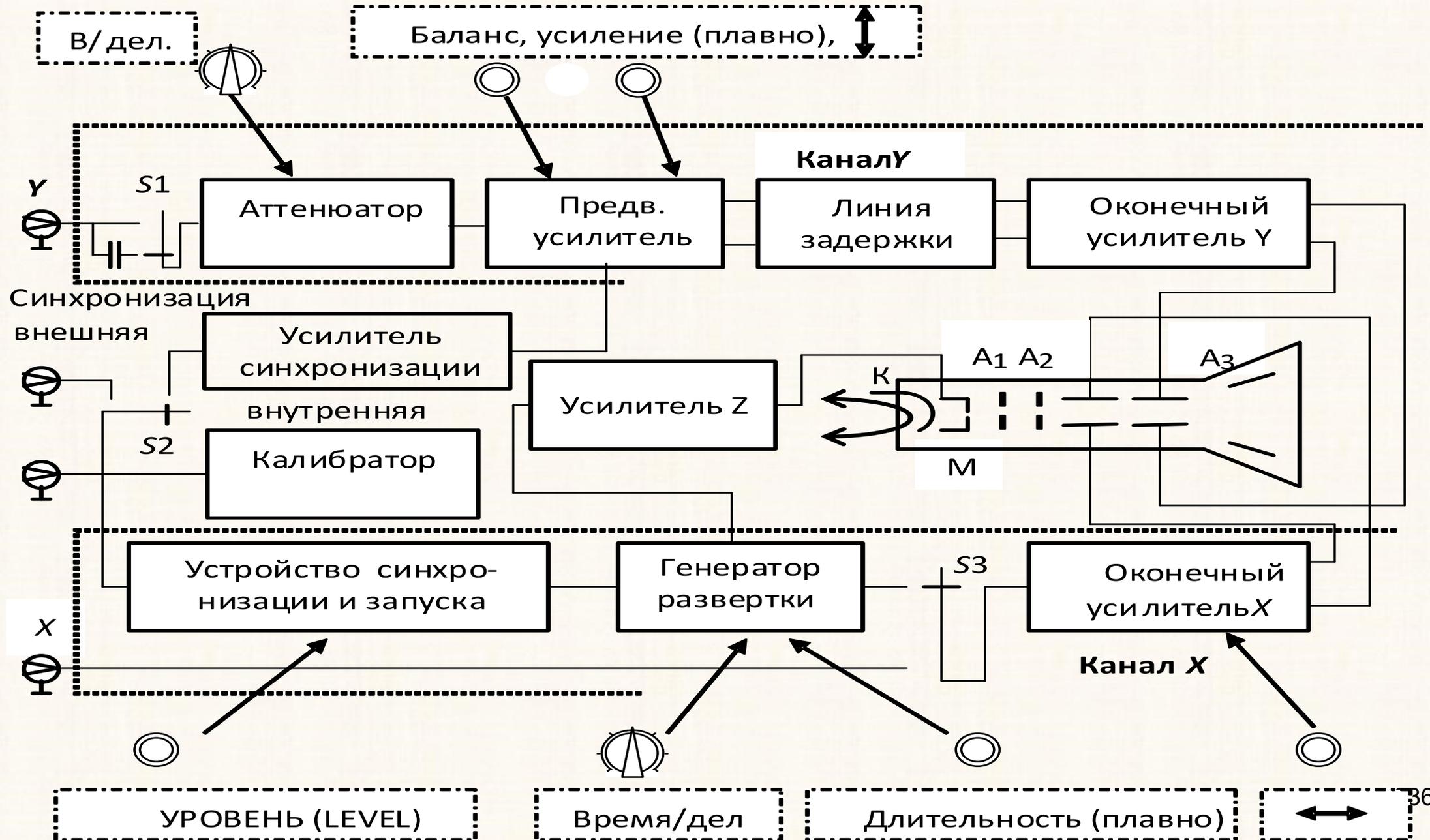


Цифровой осциллограф (ЦО)

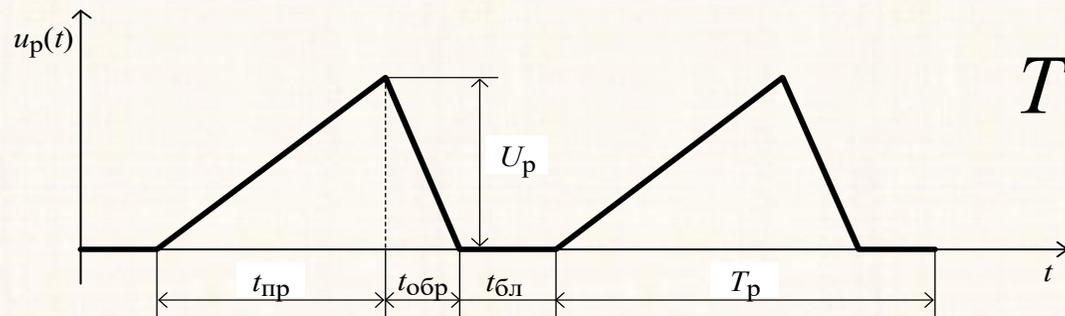
Принцип создания осциллограммы на экране ЭЛТ



Структурная схема аналогового осциллографа

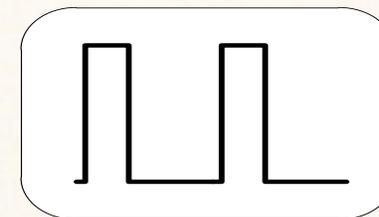
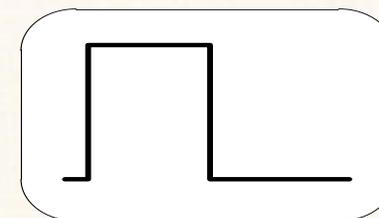
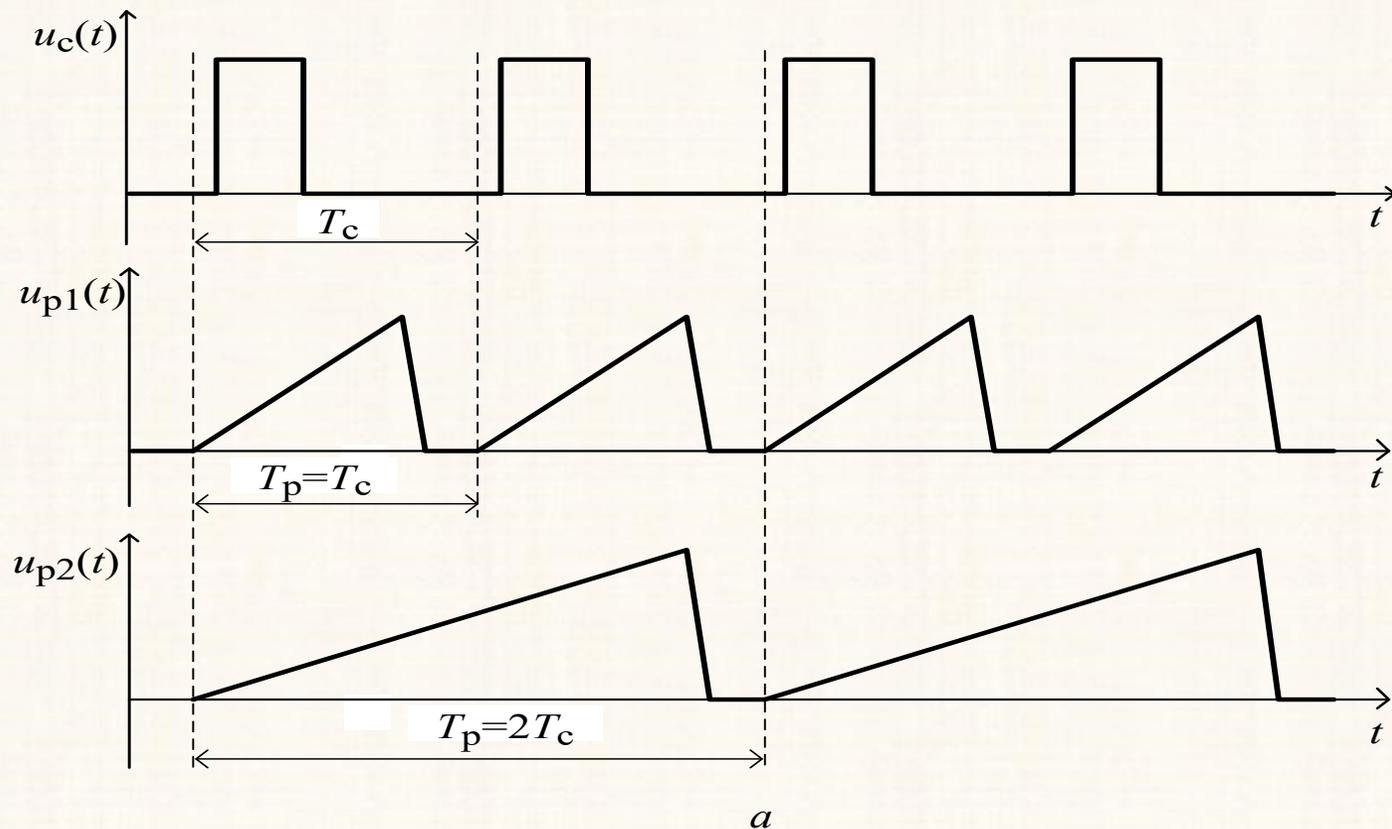


Напряжения непрерывной развертки ЭЛО (автоколебательный режим развертки)

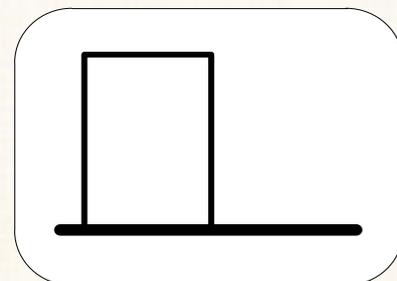
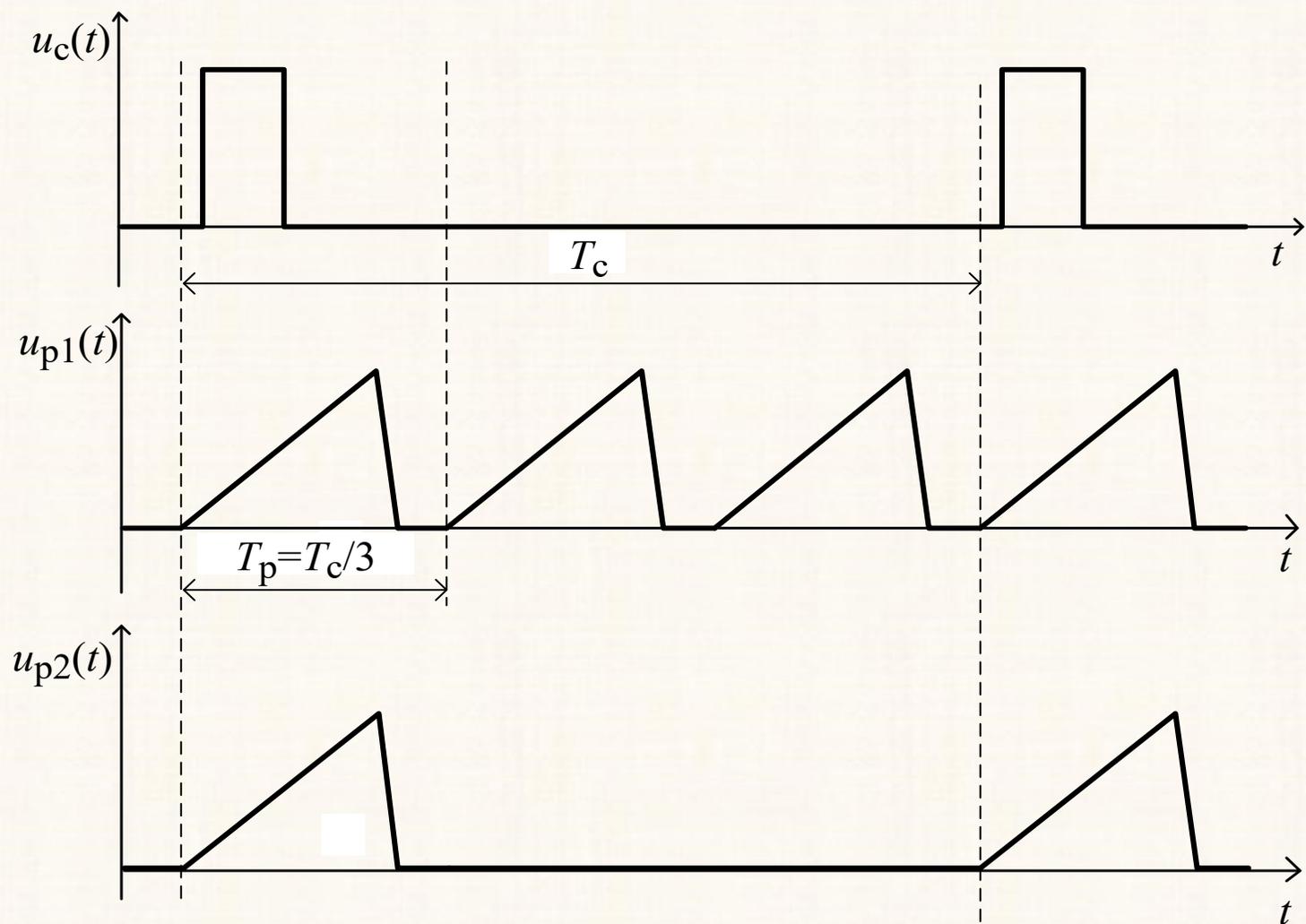


$$T_p = t_{\text{пр}} + t_{\text{обр}} + t_{\text{бл}}$$

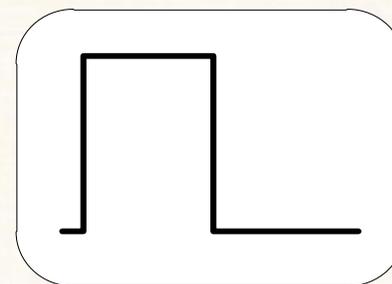
$$T_p = n T_c, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Напряжения ждущей развертки ЭЛО

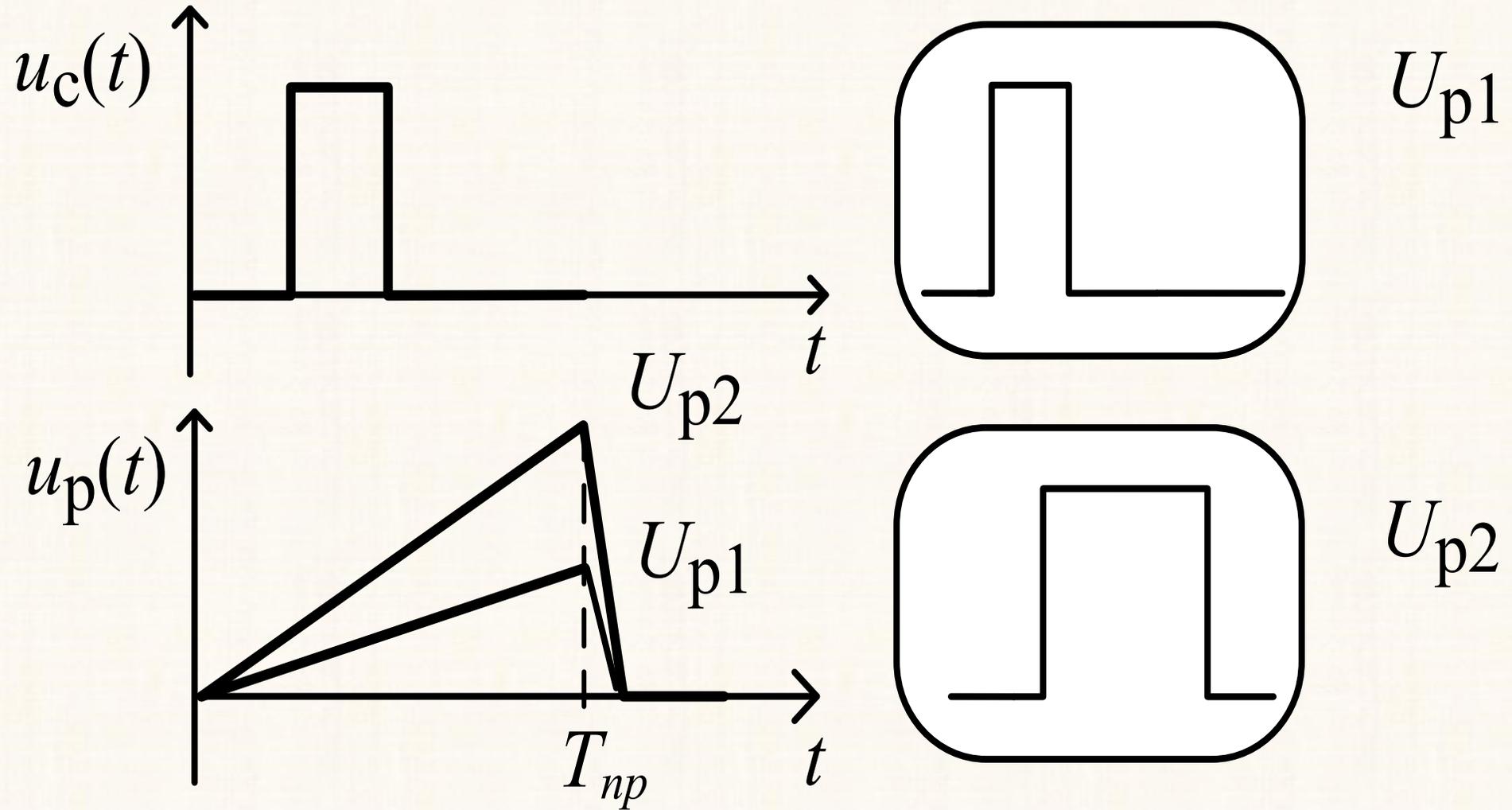


a



б

Режим растяжки развертки ЭЛО



Параметры осциллографа

К основным параметрам ЭЛО относятся:

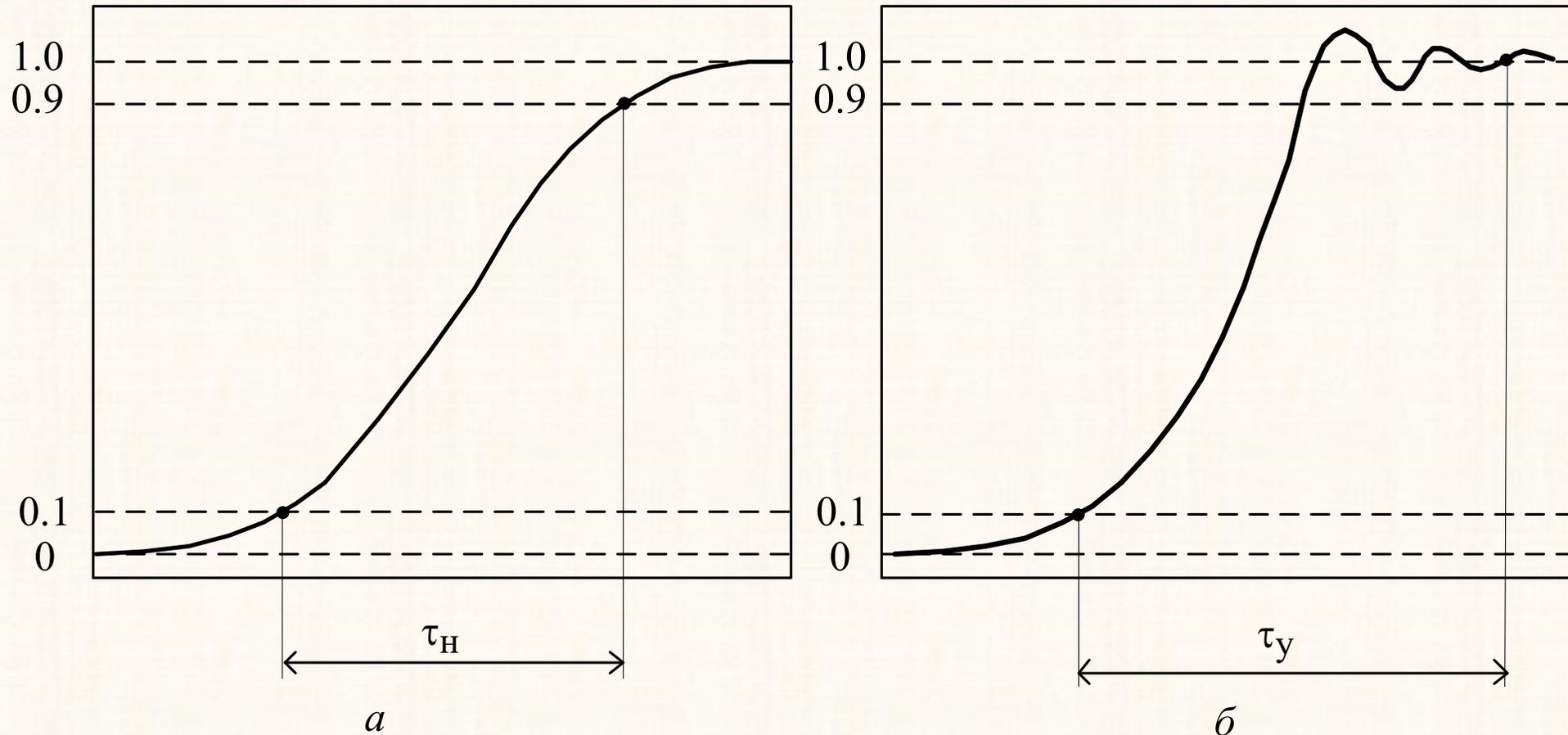
- Диапазон установки *коэффициента отклонения* K_o (значение входного напряжения, обеспечивающее отклонения луча на одно деление по вертикали).
- Погрешность установки K_o или погрешность измерения напряжения.
- Диапазон установки *коэффициента развертки* K_r (время смещения луча по горизонтали на одно деление шкалы).
- Погрешность установки K_r или погрешность измерения временных интервалов.
- Параметры переходной характеристики (ПХ) осциллографа: время нарастания, время установления, выброс ПХ.
- Параметры входа канала Y : активное входное сопротивление и входная емкость.

К дополнительным параметрам относятся:

- Параметры АЧХ осциллографа: полоса пропускания, нормальный диапазон АЧХ, расширенный диапазон АЧХ.
- Коэффициент развязки между каналами

Переходная характеристика осциллографа

Переходная характеристика (ПХ) осциллографа - осциллограмма скачка напряжения с пренебрежимо малым фронтом.



ПХ ЭЛО может иметь вид ПХ апериодического (а) или колебательного (б) звена.

Главный параметр ПХ – **время нарастания** $\tau_{\text{н}}$.

Для колебательной формы ПХ вводят дополнительные параметры – **время установления** $\tau_{\text{у}}$ и величину **выброса** $\delta_{\text{в}}$.

Время нарастания измеряют по осциллограмме между точками 0.1 и 0.9 от установившегося значения сигнала. Если входной скачок имеет конечное время фронта $\tau_{\text{ф}}$, то время нарастания $\tau_{\text{н}}$ рассчитывают по формуле:

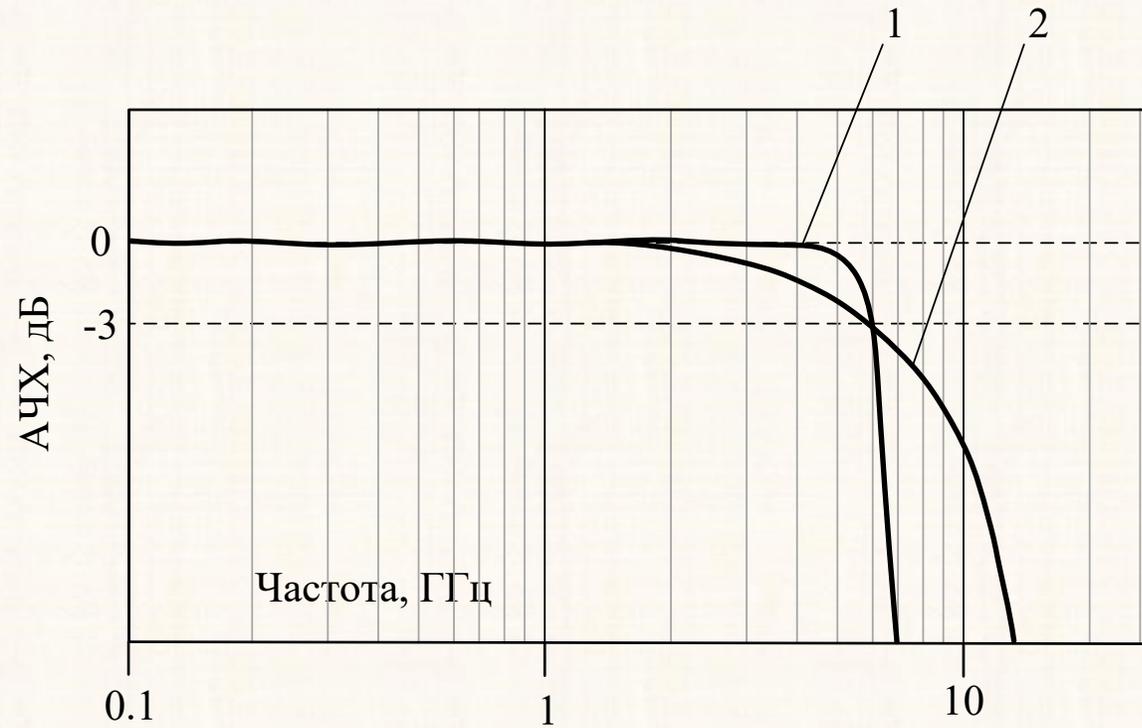
$$\tau_{\text{н}} = \sqrt{\tau_{\text{изм}}^2 - \tau_{\text{ф}}^2}$$

$\tau_{\text{изм}}$ – величина, измеренная по шкале осциллографа.

Время установления отсчитывают между уровнем 0.1 и моментом, когда осцилляции на вершине ПХ не станут пренебрежимо малы. *Выброс* оценивают в % от амплитуды ПХ.

АЧХ осциллографа

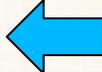
АЧХ осциллографа – зависимость относительного вертикального размера изображения гармонического сигнала от его частоты. Важнейшим параметром АЧХ является **верхняя граничная частота** осциллографа f_v . Она определяется по спаду АЧХ до уровня 0.707 от значения на низкой (опорной) частоте.



АЧХ осциллографа: 1 – максимально плоская, 2 – близкая к гауссовой

Верхняя граничная частота и время нарастания ПХ, согласно ГОСТ, связаны соотношением

$$\tau_H = \frac{350}{f_B}$$

 частота выражена в МГц, а время – в нс.

Измерение амплитуды гармонического сигнала на границе полосы пропускания приводит к значительным погрешностям (до 30 % на f_B).

Поэтому осциллограф характеризуют также **нормальным диапазоном** АЧХ.

Это полоса частот, в пределах которой неравномерность АЧХ не превышает погрешности коэффициента отклонения, заявленной для данного осциллографа. Для расширения нормального диапазона используют форму АЧХ, более близкую к прямоугольной.

Отечественные аналоговые осциллографы СССР С1-5 и ЛО-70



www.wasp.kz

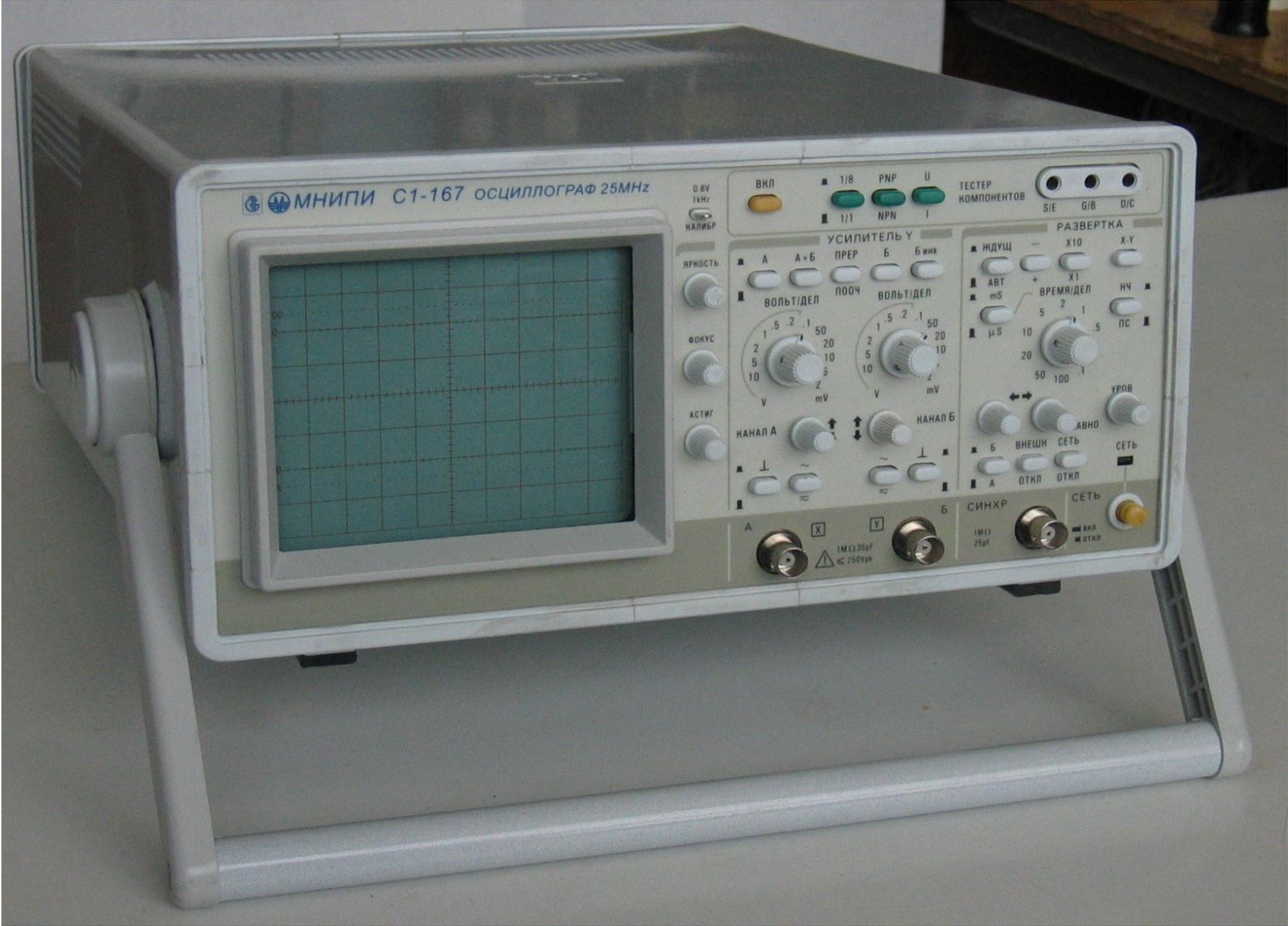
Отечественный аналоговый осциллограф С1-92



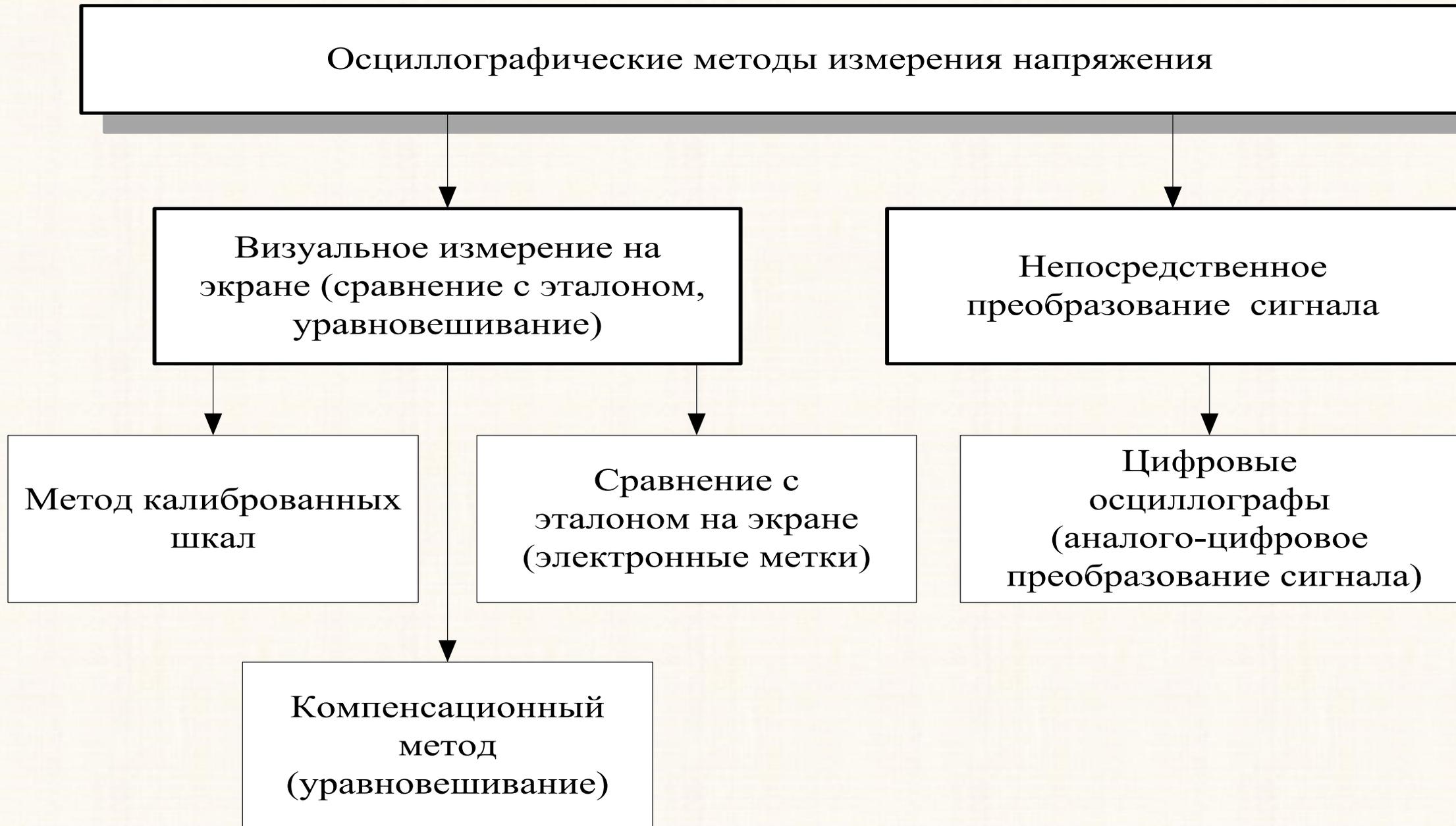
Осциллограф-мультиметр С1-112а



Современный отечественный аналоговый осциллограф С1-167



Классификация методов осциллографических измерений



Осциллографические методы измерения временных интервалов

Визуальное измерение на экране

Метод калиброванных шкал

Сравнение с эталонным импульсом на экране

Калиброванная развертка

Электронные метки

Компенсационный метод с постоянным напряжением

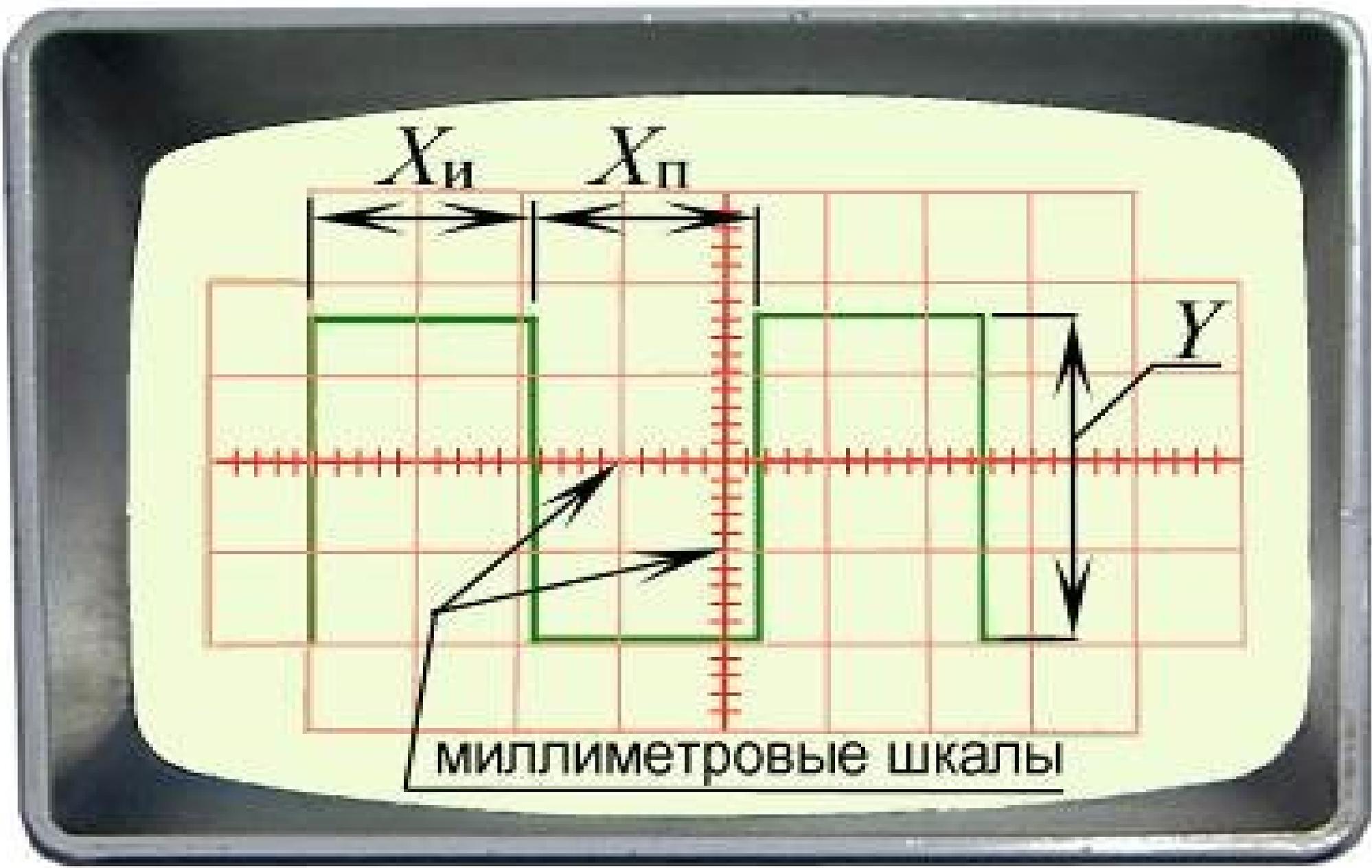
Метод замещения с задержанной разверткой

Непосредственное преобразование сигнала

Цифровые осциллографы (цифровая развертка)

Трансформация временного масштаба (стробоскопические осциллографы с калиброванной частотой стробирования)

Метод калиброванных шкал



Метод калиброванных шкал

- Регулируем размер изображения 80 ... 90 % от шкал осциллографа.
- Измеряем интересующий размер изображения по вертикали в делениях шкалы. Умножив число делений на установленный коэффициент отклонения K_0 , получаем искомое значение напряжения.
- Измеряем интересующий интервал времени (в делениях шкалы) и умножаем на коэффициент развертки K_r . При использовании растяжки развертки его необходимо умножить на коэффициент растяжки (обычно $\times 0.1$).

Калибровка шкал: Перед измерениями на вход Y подают сигнал калибратора (меандр) с известными параметрами.

- Плавной регулировкой усиления канала Y добиваются соответствия вертикального размера изображения сигнала калибратора установленному коэффициенту отклонения осциллографа.
- Калибровку осциллографа по оси X производят плавной подстройкой длительности прямого хода развертки так, чтобы размер периода сигнала калибратора соответствовал бы установленному коэффициенту развертки.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



Факультет радиотехники и
телекоммуникаций



*Кафедра Теоретических основ
радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Измерение фазового сдвига

Санкт-Петербург
2022 г.

Под **фазовым сдвигом** понимают разность начальных фаз двух гармонических сигналов одинаковой частоты. Для негармонических сигналов понятие фазового сдвига заменяют *сдвигом во времени (временной задержкой)*.

Для гармонических сигналов фазовый и временной сдвиги связаны между собой:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{2\pi\Delta t}{T} [\text{рад}] = \frac{360^\circ\Delta t}{T} [\text{град}]$$

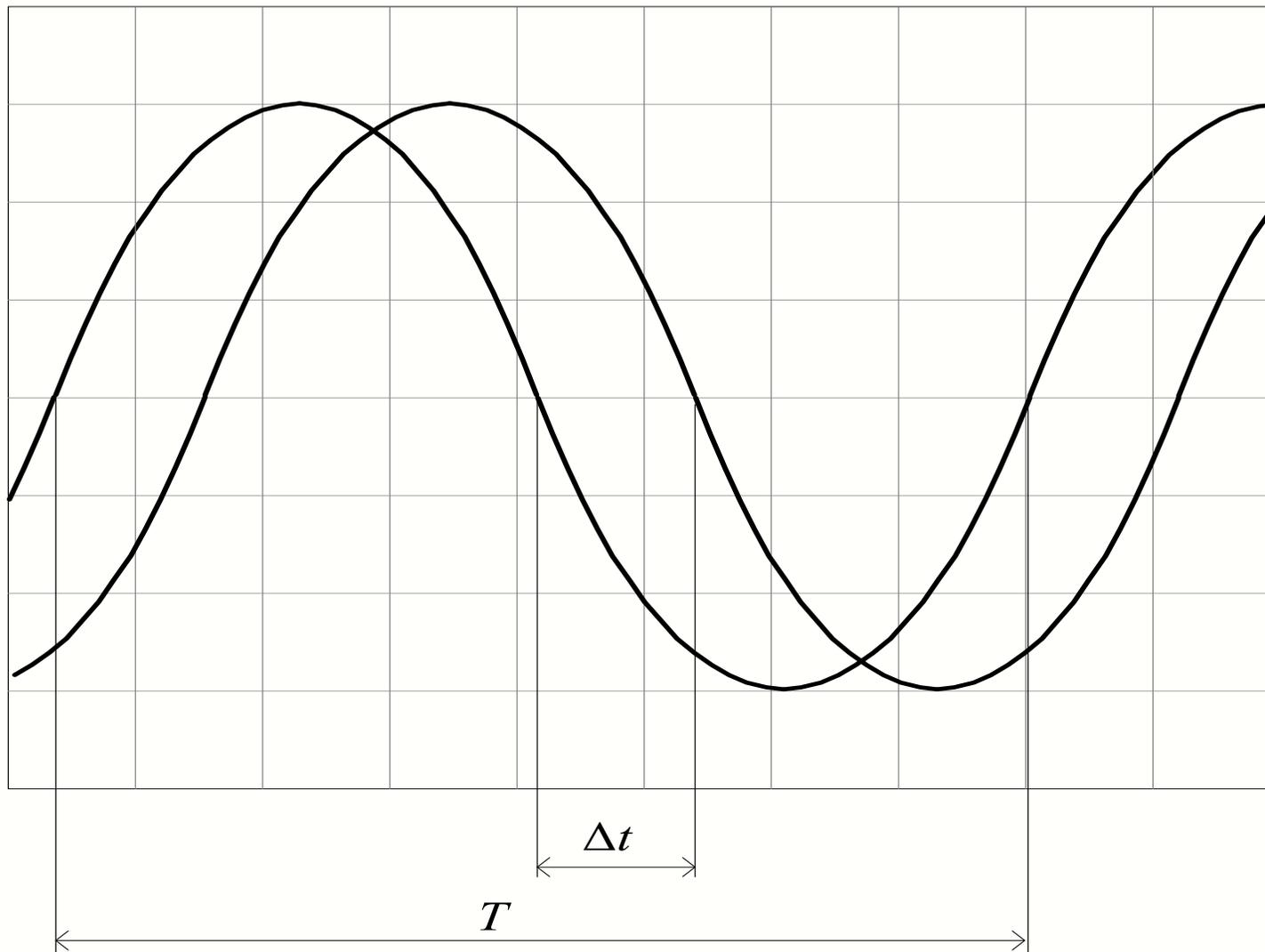
Фазовый сдвиг принято выражать в градусах; если он равен нулю, то такие колебания называют *синфазными*, если 180° – *противофазными*. Если фазовый сдвиг между колебаниями равен 90 , говорят, что сигналы находятся в *квадратуре*

Осциллографические методы измерения фазового сдвига

Метод *линейной развертки*.

Используют двухканальный ЭЛО

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T} = \frac{360^\circ\Delta t}{T}$$

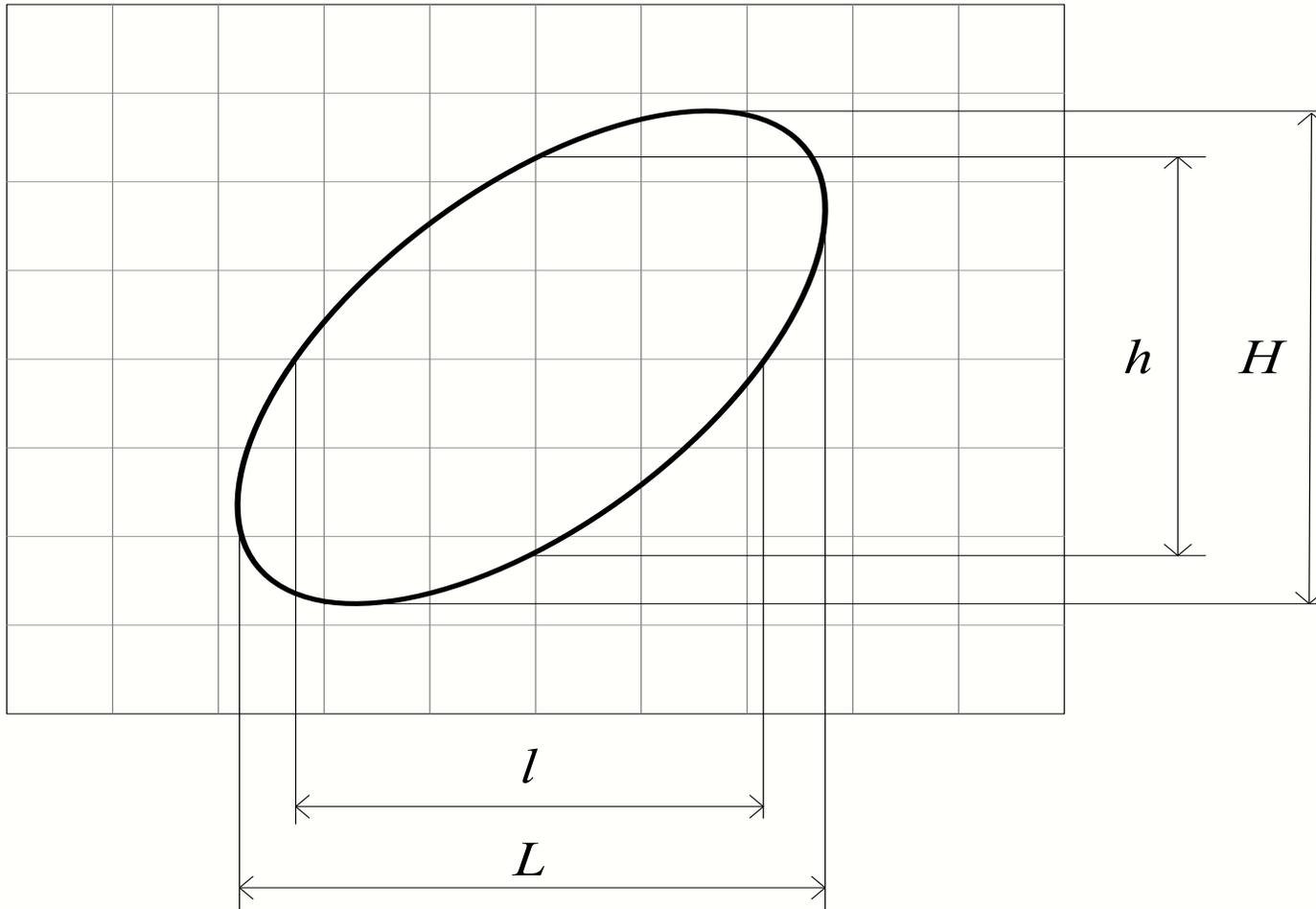


$$X(t) = AU_x \cos(\omega t),$$

$$Y(t) = BU_y \cos(\omega t + \Delta\varphi),$$

$$Y(t) = B \cos(\omega t) \cos(\Delta\varphi) - B \sin(\omega t) \sin(\Delta\varphi) =$$

$$= \frac{B}{A} X(t) \cos(\Delta\varphi) - \sqrt{B^2 - \left(\frac{BX(t)}{A}\right)^2} \sin(\Delta\varphi).$$

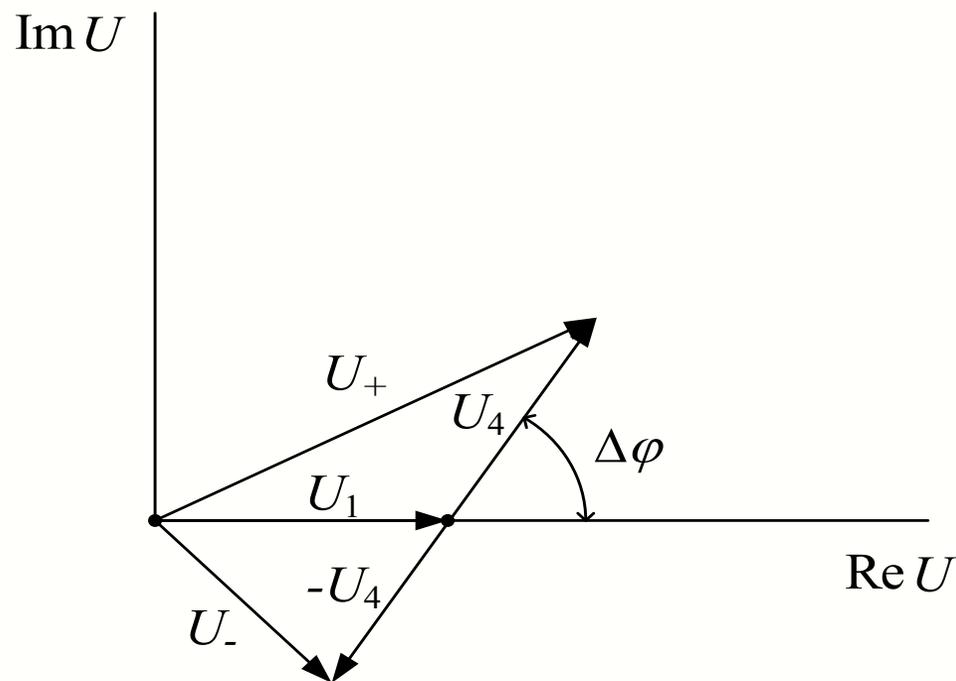
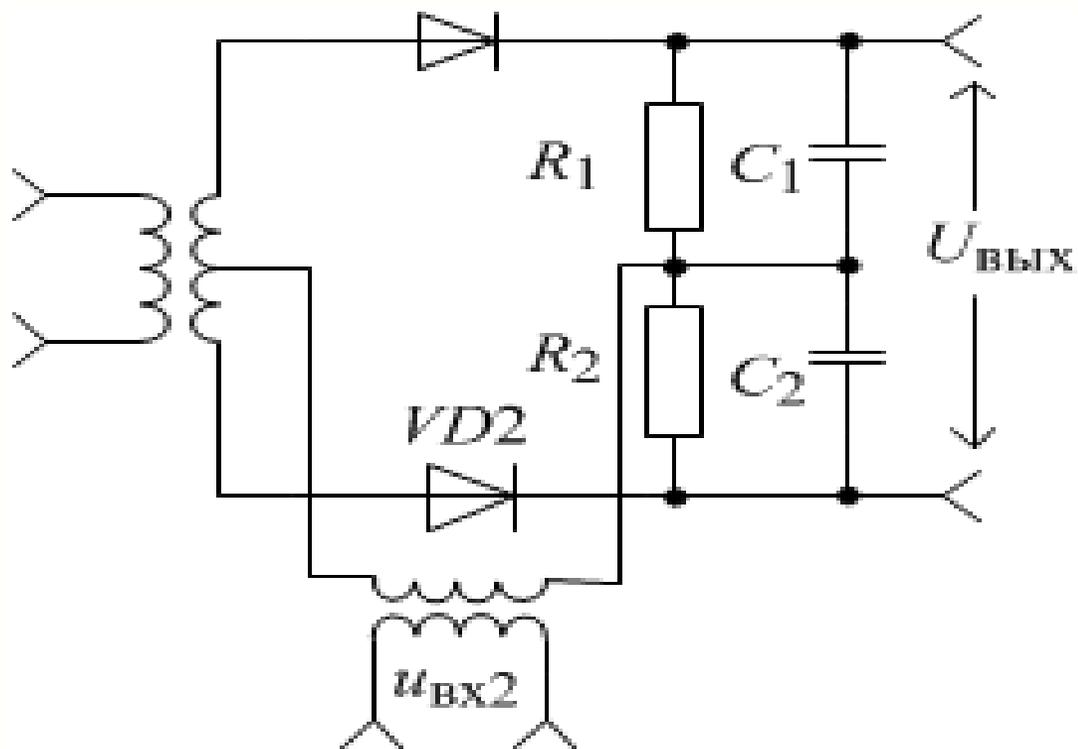


$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{Y(t_0)}{B}\right) = \arcsin\left(\frac{h}{H}\right)$$

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{l}{L}\right)$$

Измерение разности фаз фазовыми детекторами

Фазовый детектор (ФД) преобразует измеряемый фазовый сдвиг в напряжение, функционально связанное с измеряемой величиной

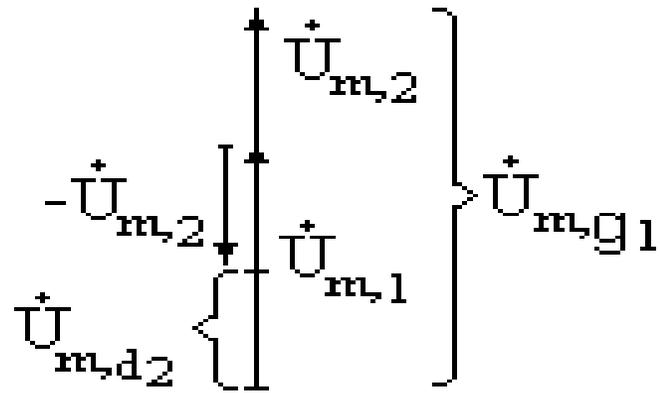


$$U_+ \equiv U_1^2 + U_4^2 - 2U_1U_4 \cos(\Delta\varphi) \quad , \quad U_- \equiv U_1^2 + U_4^2 + 2U_1U_4 \cos(\Delta\varphi)$$

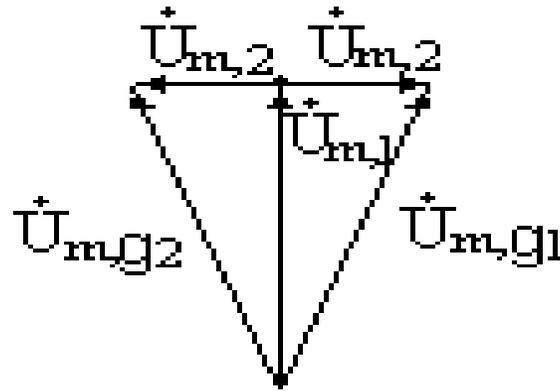
$$U_{\text{вых}} \equiv 4U_1U_4 \cos(\Delta\varphi)$$

Векторные диаграммы сложения сигналов фазового детектора

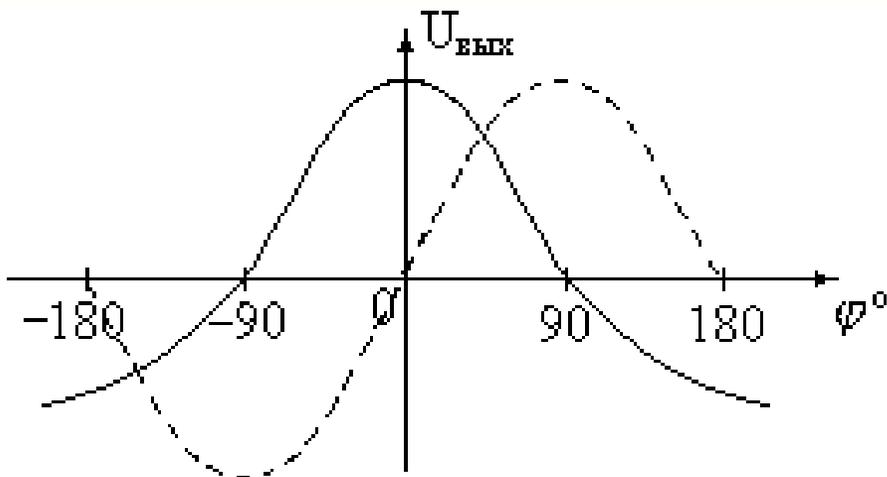
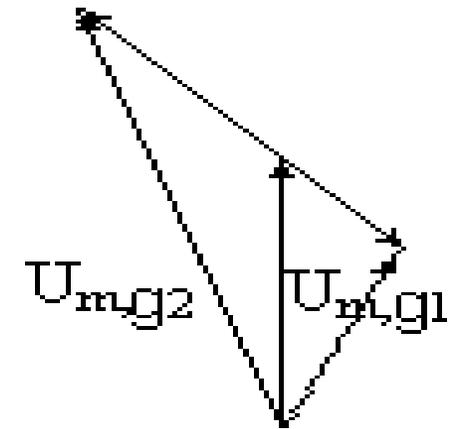
$$\Delta\varphi = 0^\circ$$



$$\Delta\varphi = 90^\circ$$

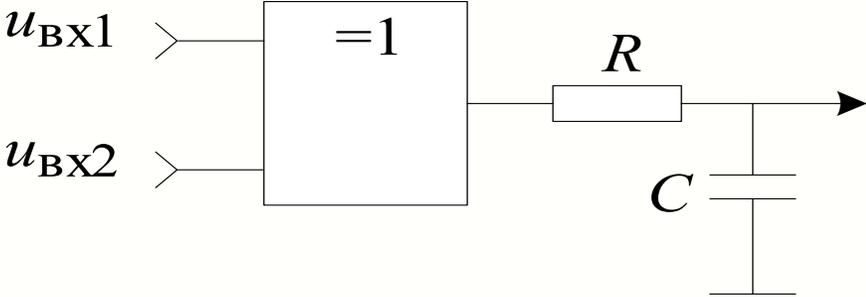


$$90^\circ < \Delta\varphi < 180^\circ$$

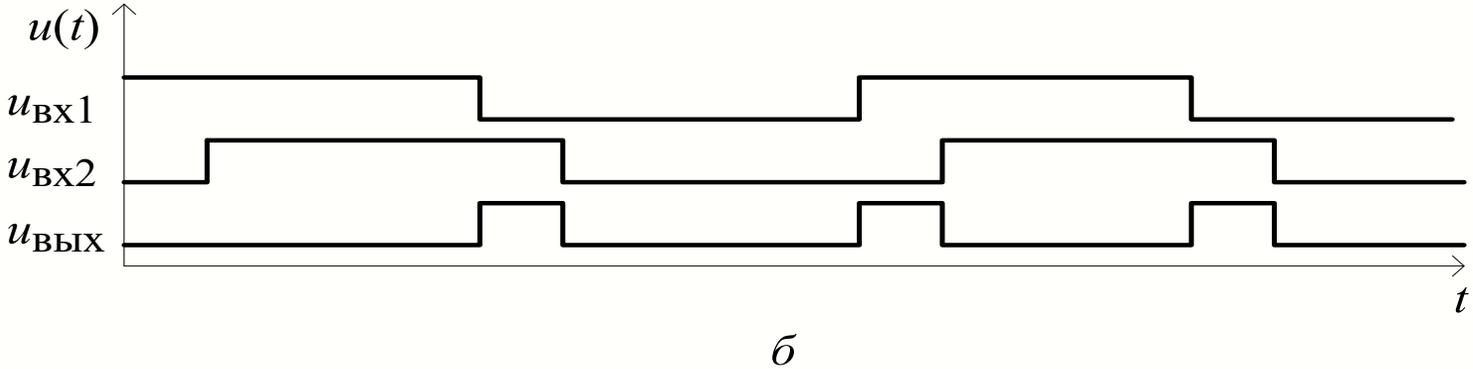
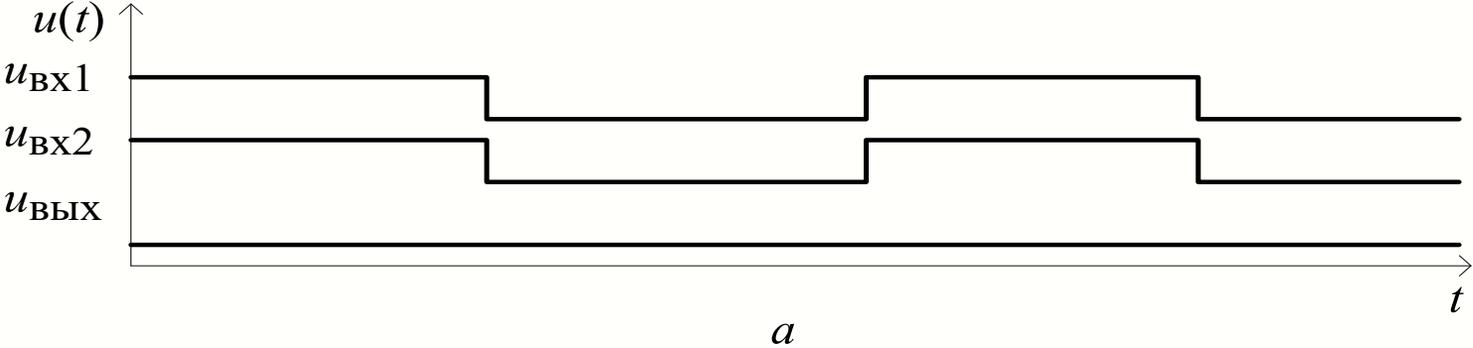


При нулевой разности фаз выходное напряжение максимально, при 90° – равно нулю, при фазе, большей 90° напряжение отрицательно. Сдвигая опорное напряжения на 90° , можно получить характеристику детектора в виде синусной функции, линейной вблизи нуля (пунктирная кривая)

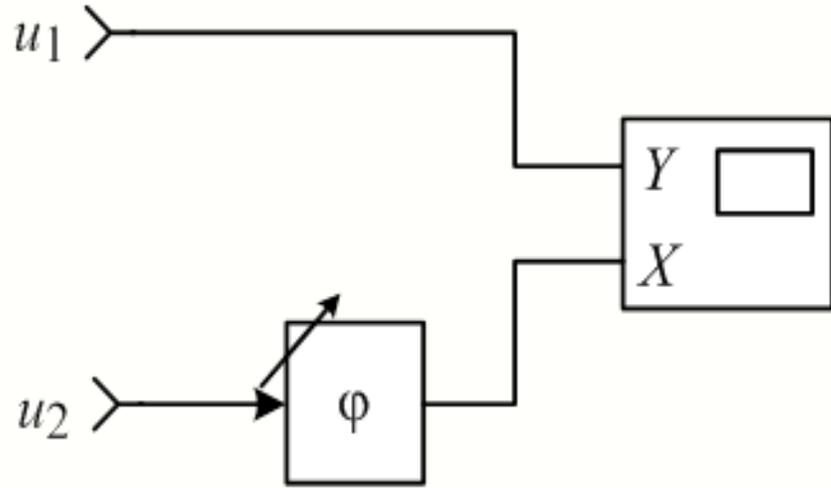
Фазовый детектор на основе логического элемента «исключающее ИЛИ»



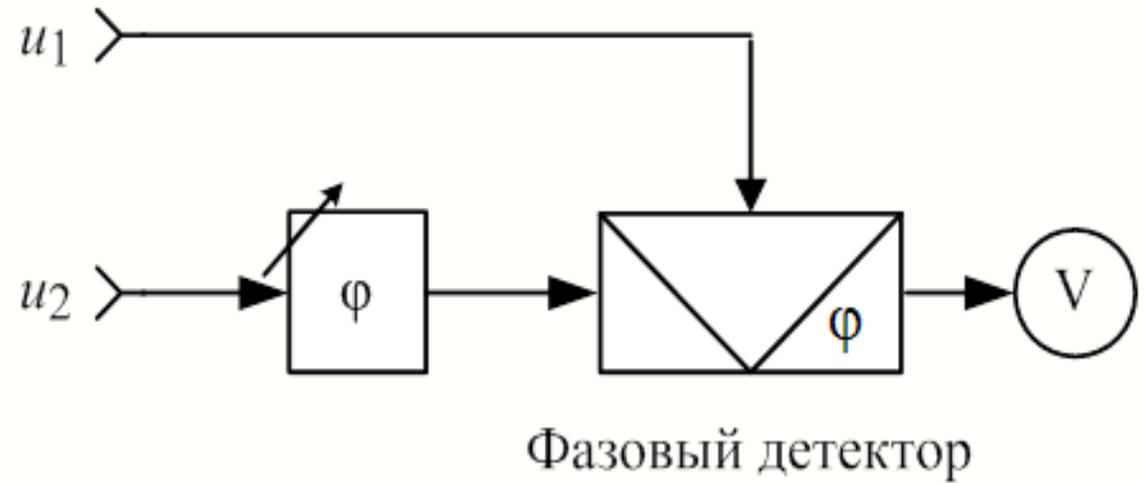
V_{X1}	V_{X2}	V_{YX}
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Компенсационный метод измерения фазового сдвига



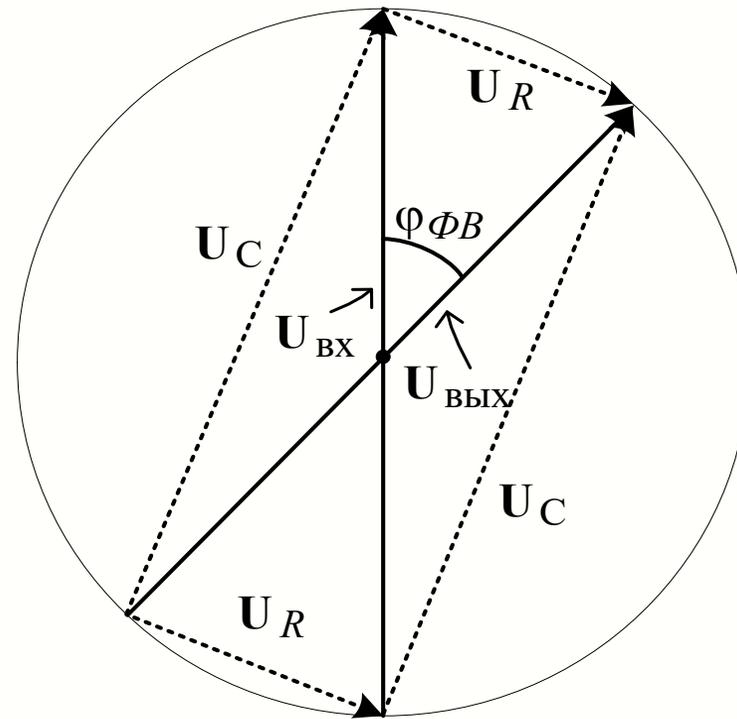
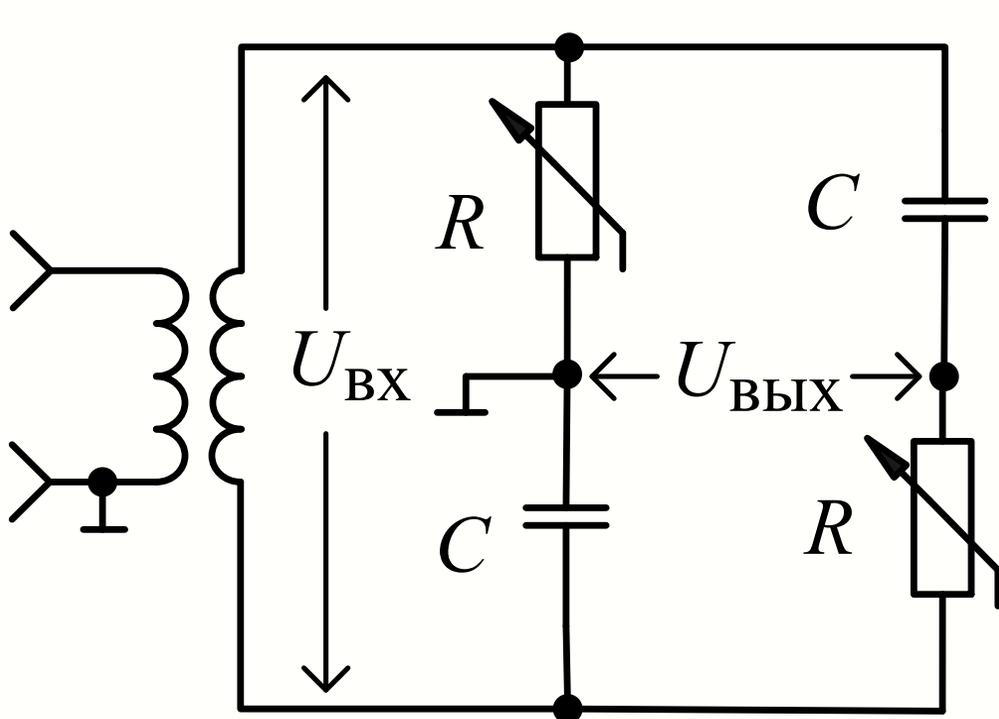
$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ФВ}} - \varphi_{\text{ФВ0}}.$$



$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ФВ}} - \varphi_{\text{ФВ0}} + \varphi_{\text{диф}}.$$

Погрешность компенсационного метода определяется погрешностью градуировки фазовращателя и точностью фиксации момента равенства фаз (чувствительности фазового индикатора). Недостатком метода является необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте измерения.

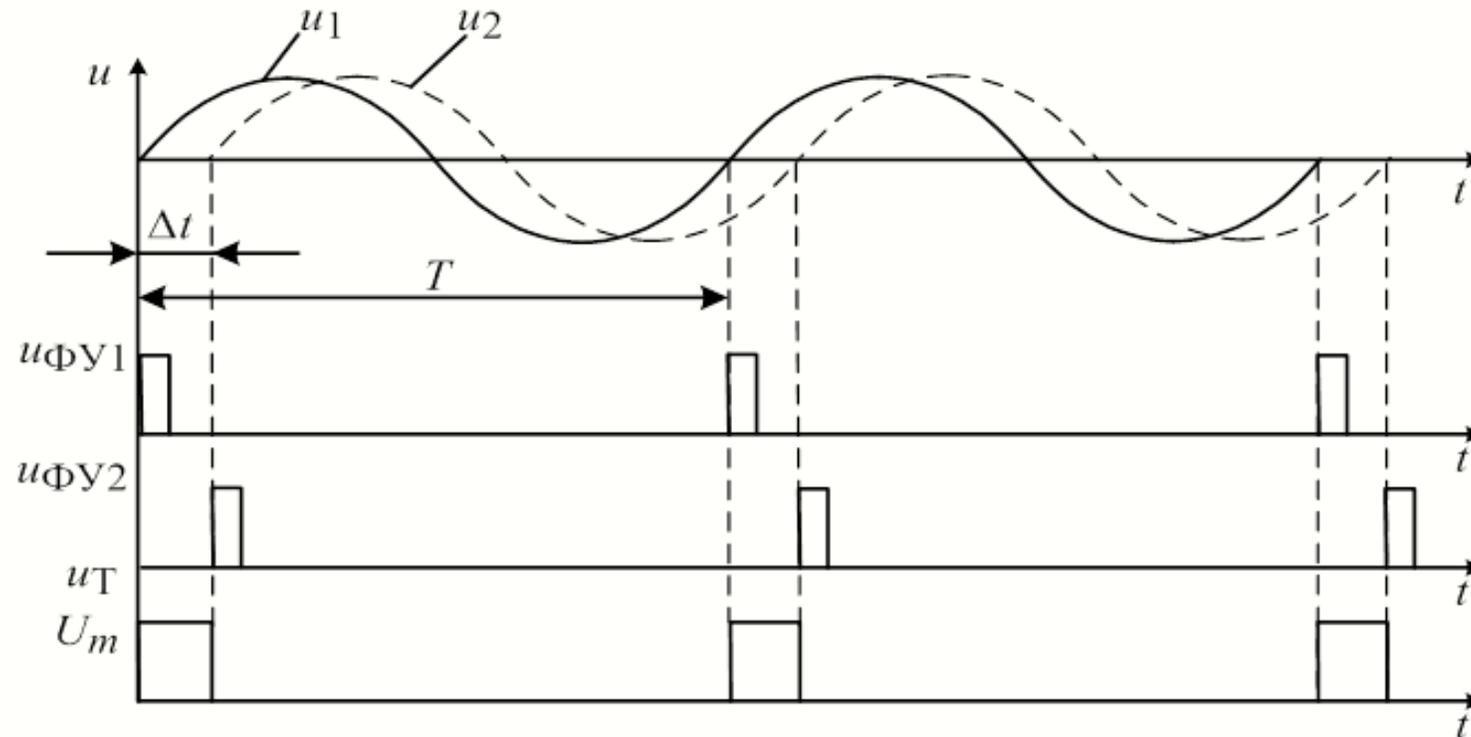
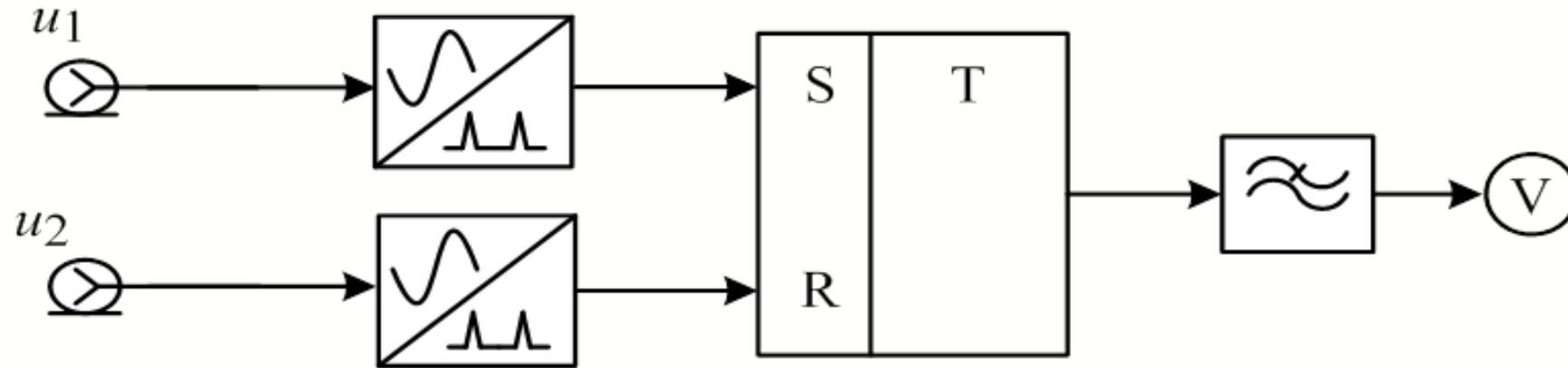
Фазовращатель мостового типа



При изменении R от 0 до ∞ значения U_R и U_C меняются от нуля до максимума, равного входной амплитуде $U_{вх}$. На векторной диаграмме видно, что при этом угол между входным и выходным напряжением меняется от 0 до 180 градусов. Амплитуды сигналов $U_{вх}$ и $U_{вых}$ при этом остаются постоянными.

$$\varphi_{ФВ} = -2 \arctg(2\pi fRC)$$

Метод преобразования фазового сдвига в напряжение

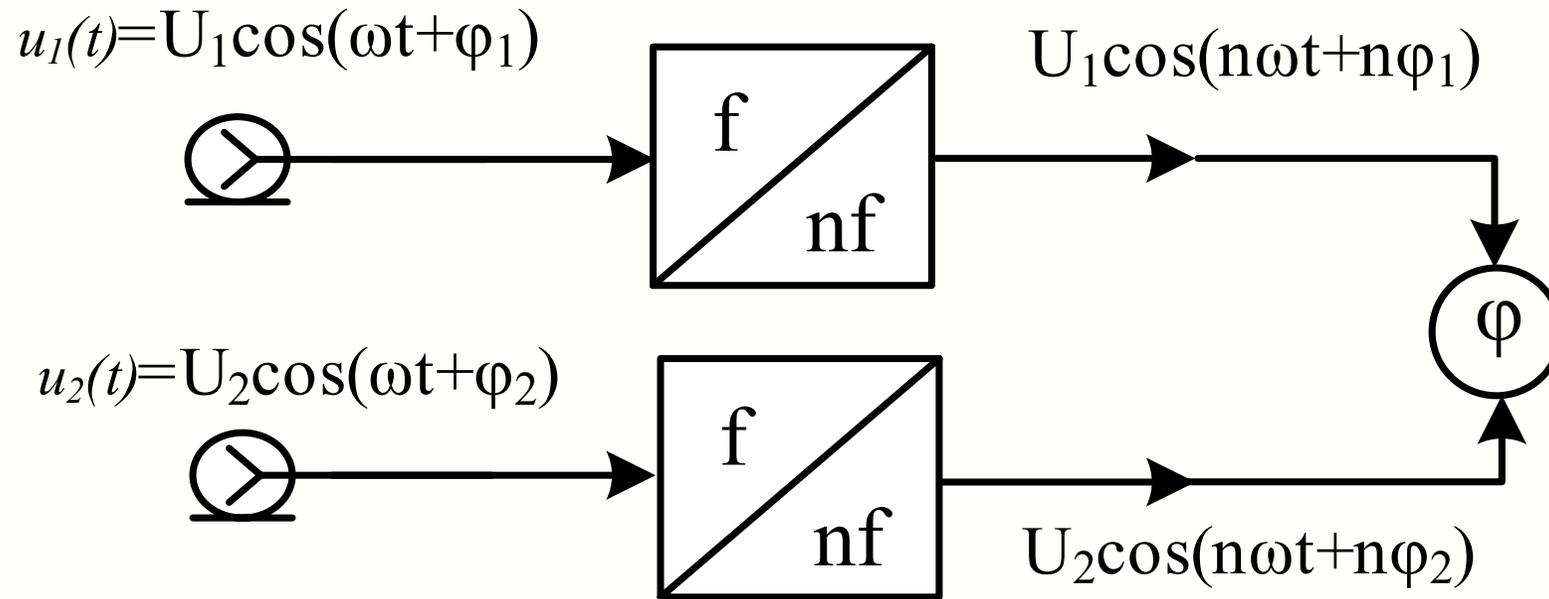


Для построения аналоговых фазометров используют преобразование фазового сдвига в импульсы с длительностью, пропорциональной измеряемой величине и постоянной амплитудой U_m . Измеряя постоянную составляющую импульсов, получаем показания, пропорциональные фазовому сдвигу

$$U_{\text{изм}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_T(t) dt = \frac{U_m \Delta t}{T} = \frac{U_m \Delta \varphi}{360^\circ}$$

В цифровых фазометрах используют *метод дискретного счета* для измерения длительности импульсов и периода входных сигналов.

Если точность измерения недостаточна, используют *умножение частоты*



$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_{\text{изм}}}{n} = \frac{(n\varphi_2 - n\varphi_1)}{n}$$

Недостаток: при большом увеличении фазового сдвига появляется многозначность отсчёта (фаза превышает 360 градусов)

Аналоговый измеритель фазового сдвига Д586

переносной прибор,
предназначенный для
измерения $\cos\varphi$ в однофазных
и трехфазных цепях
переменного тока
промышленной частоты.
Класс точности — 1,5.
Рабочая частота — 48,5Гц —
51,5Гц.



Аналоговый измеритель фазового сдвига ФК2-12



Аналоговый ВЧ фазометр для частотного диапазона 1-1000 МГц. Диапазон измерения: разности фаз $0 \pm 180^\circ$; напряжения 100 мкВ-1 В. Погрешность измерения: разности фаз не более $\pm 2,5^\circ$; напряжения 10% (1-300 МГц), 20% (300-500 МГц)



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники и
телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических основ
радиотехники*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

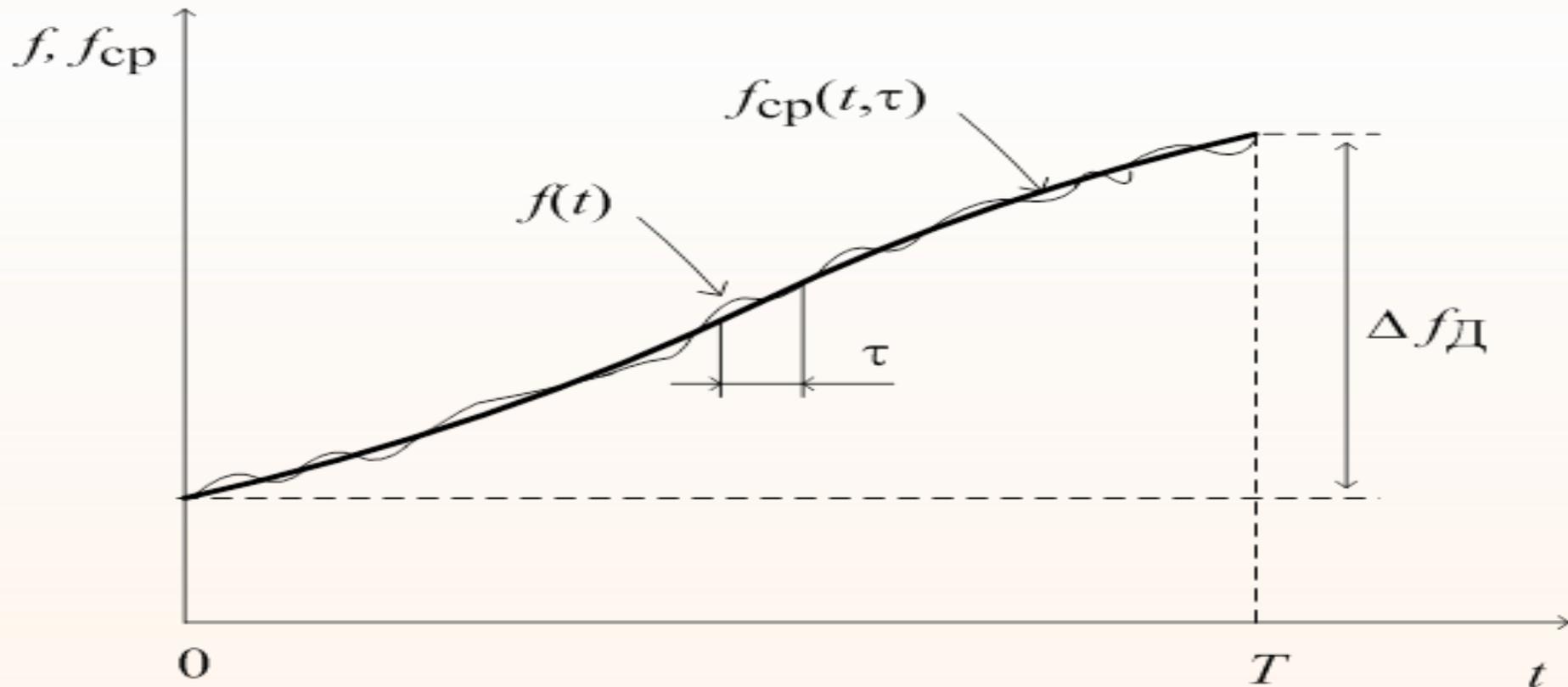
«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Измерение частоты

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Классификация методов и средств измерения частоты



Мгновенная частота радиосигнала $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = f + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$

Задачи частотных измерений:

- оценка мгновенной частоты в заданный момент времени;
- определение средней частоты сигнала,
- измерение нестабильности частоты;
- измерение частоты несущей радиосигнала, частоты заполнения радиоимпульса

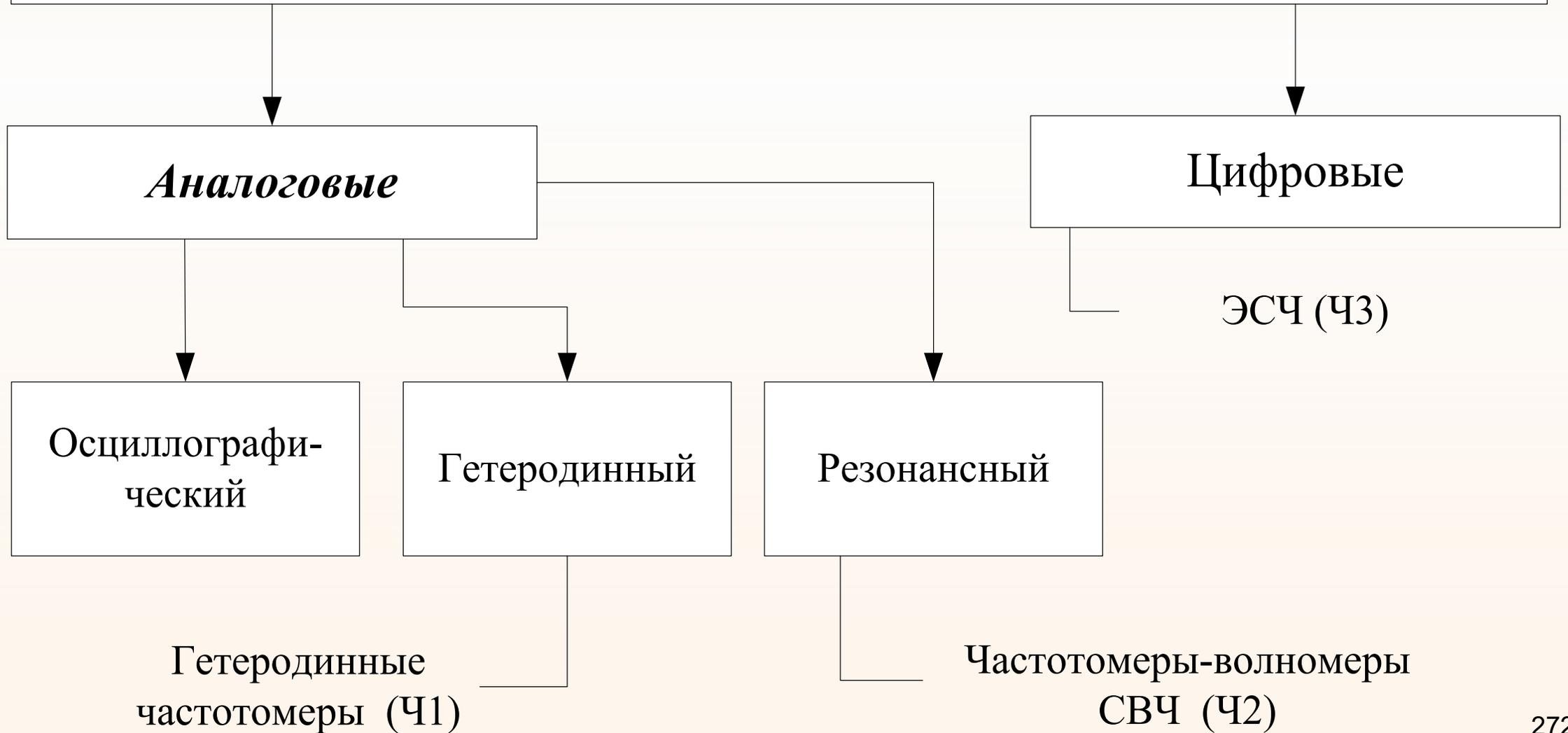
Кратковременная нестабильность – быстрая флуктуация частоты в течении малого времени τ .

Долговременная нестабильность – медленный уход частоты за заданное время T .

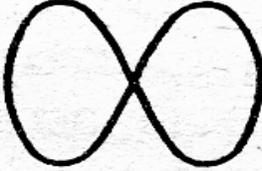
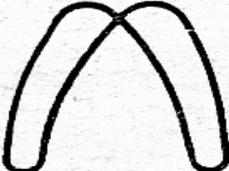
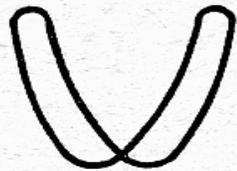
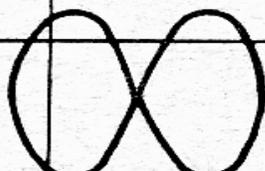
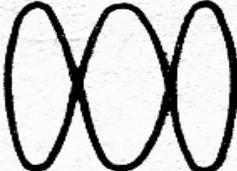
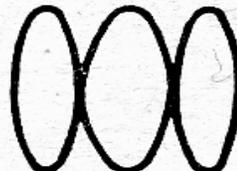
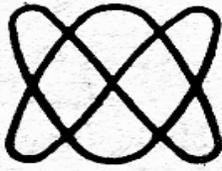
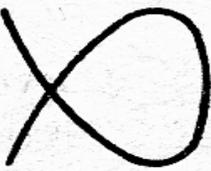
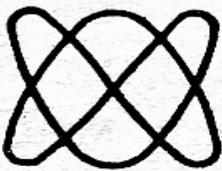
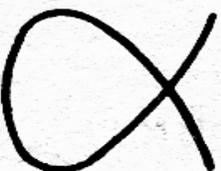
Измерение частоты осуществляется за определенное время ($T_{изм}$).

Рекомендованы определенные соотношения между T и $T_{изм}$ (например 1 сутки – 1 час, 100 с – 1 с и пр.).

Методы измерения частоты радиосигналов

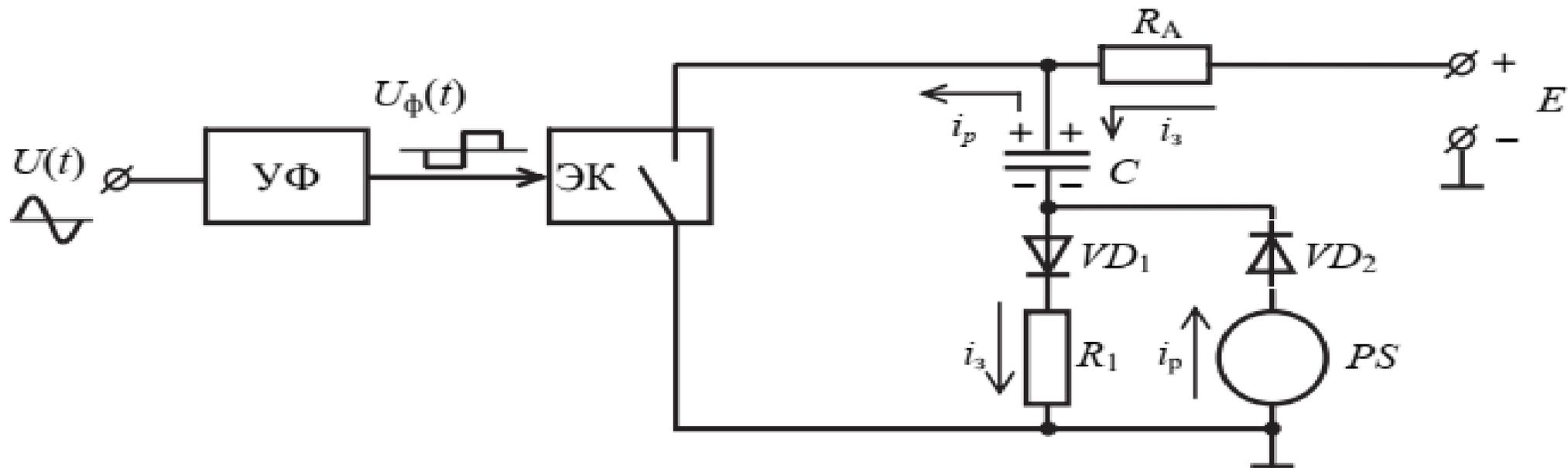


Осциллографический метод сравнения частот (метод фигур Лиссажу).

f_X/f_Y	0°	45°	90°	135°	180°
$\frac{1}{1}$					
$\frac{1}{2}$					
$\frac{1}{3}$					
$\frac{2}{3}$					

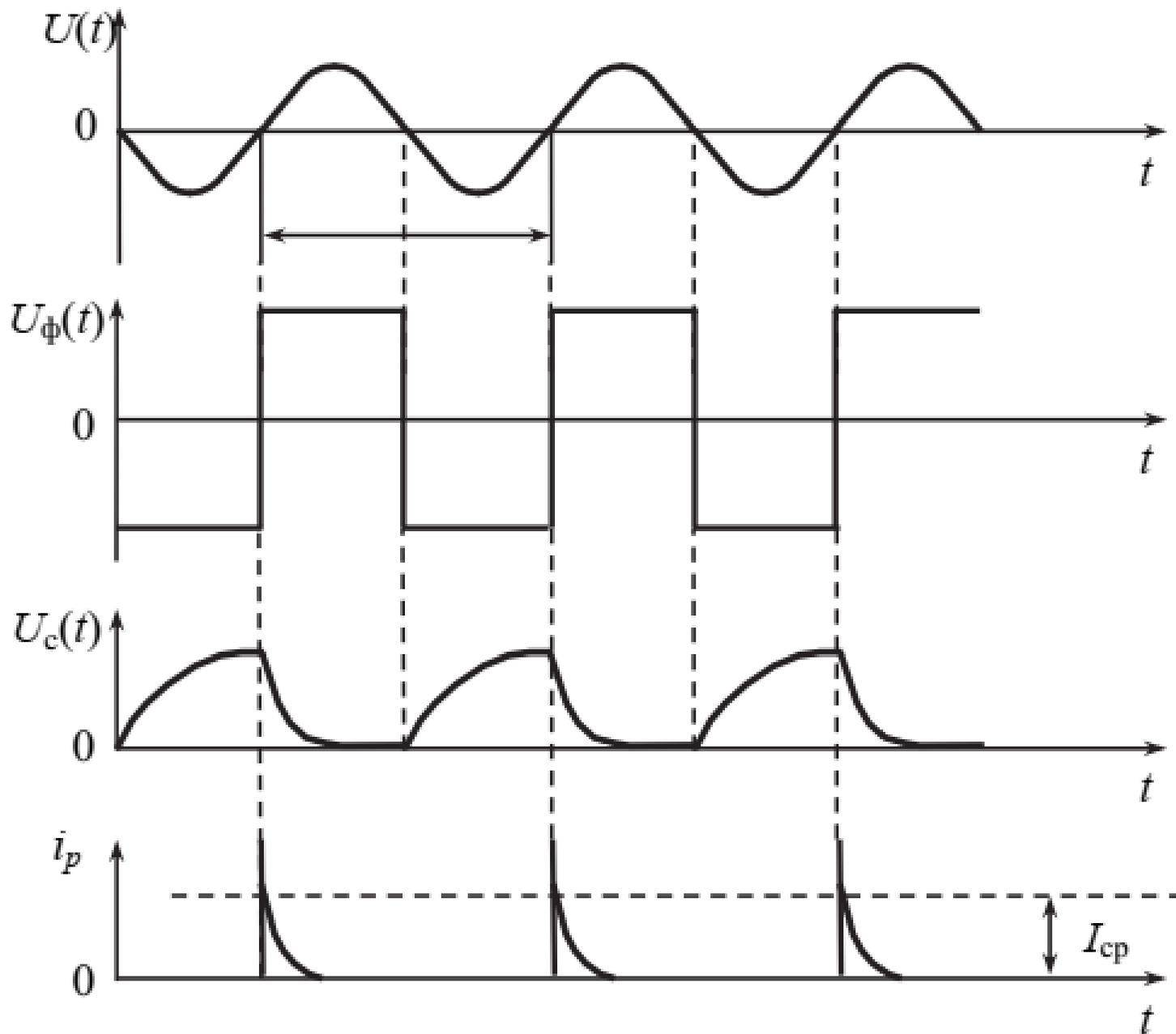
Фигуры Лиссажу при подаче на вход Y и X гармонических сигналов неизвестной и образцовой частот

Электронный конденсаторный частотомер



Входной сигнал преобразуется в меандр в усилителе-формирователе (УФ). Этот меандр управляет электронным коммутатором (ЭК). Конденсатор C при разомкнутом коммутаторе заряжается до опорного напряжения E через диод VD_1 , резисторы R_A и R_1 . При замыкании коммутатора происходит разряд конденсатора через магнитоэлектрический миллиамперметр (PS) и диод VD_2 .

Временные
диаграммы
сигналов в
электронном
конденсаторном
частотомере



Заряд конденсатора равен $q = C \cdot E$

Заряд можно рассчитать через ток разряда i_p за период входного сигнала T_x

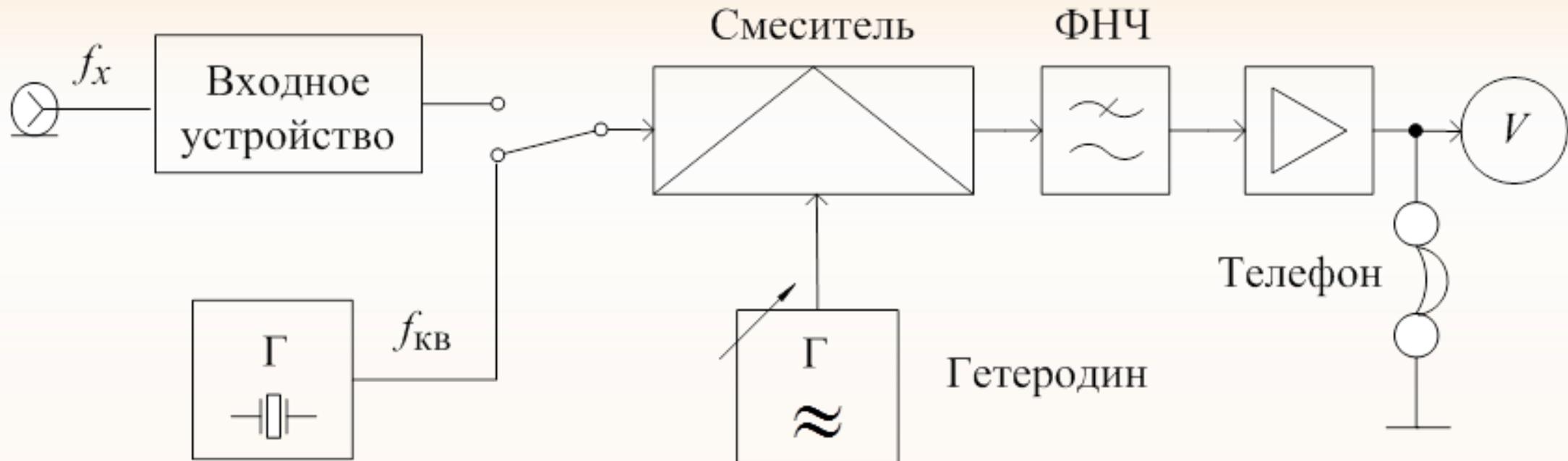
$$q = \int_0^{T_x} i_p(t) dt$$

Показания магнитоэлектрического прибора равны **среднему** току разряда (равному отношению заряда к периоду T_x) и прямо пропорциональны частоте f_x

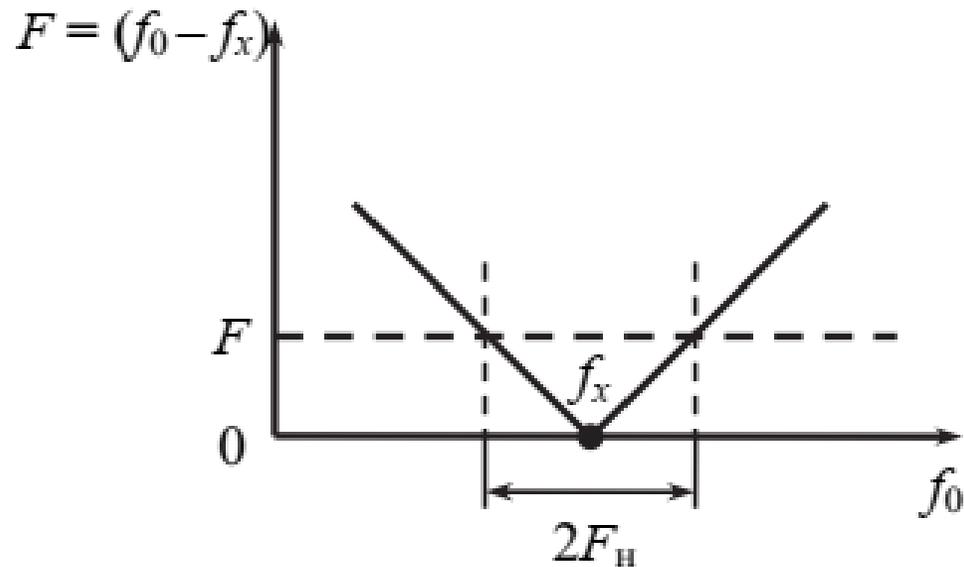
$$I_{cp} = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} i_p(t) dt = \frac{q}{T_x} = \frac{EC}{T_x} = EC \cdot f_x$$

Погрешность измерения частоты определяется точностью опорного напряжения, стабильностью конденсатора и параметрами коммутатора. Метод применяют на частотах до сотен кГц

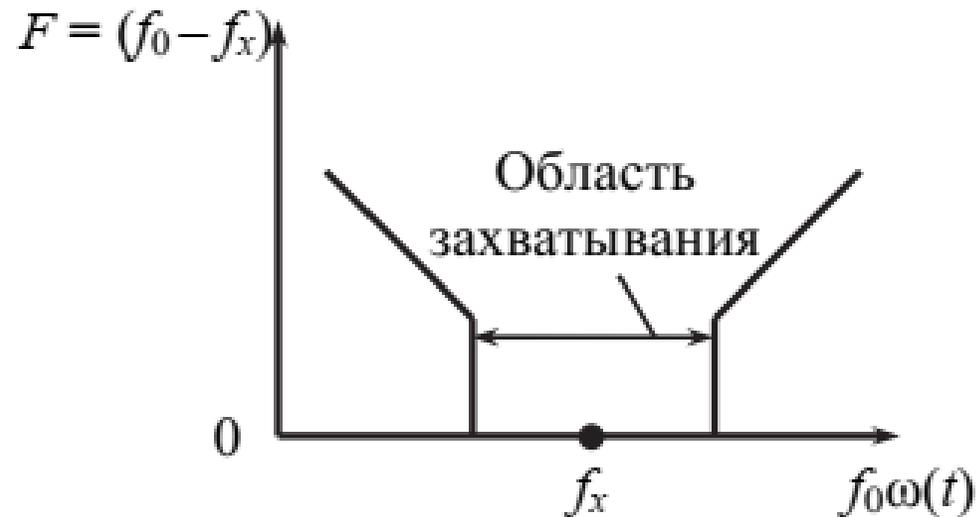
Гетеродинный частотомер (метод нулевых биений)



Кварцевый генератор служит для калибровки шкалы гетеродина в отдельных точках (1 МГц, 10 МГц). Перестройкой гетеродина добиваются равенства его частоты (или частоты его гармоники) с измеряемой f_x . Фиксация равенства частот - по сигналу нулевых биений (разностной частоты), который выводят на магнитоэлектрический прибор и электромагнитный телефон.



a



б

Рис. 6.8. Графики зависимости частоты биений от настройки генератора опорных частот

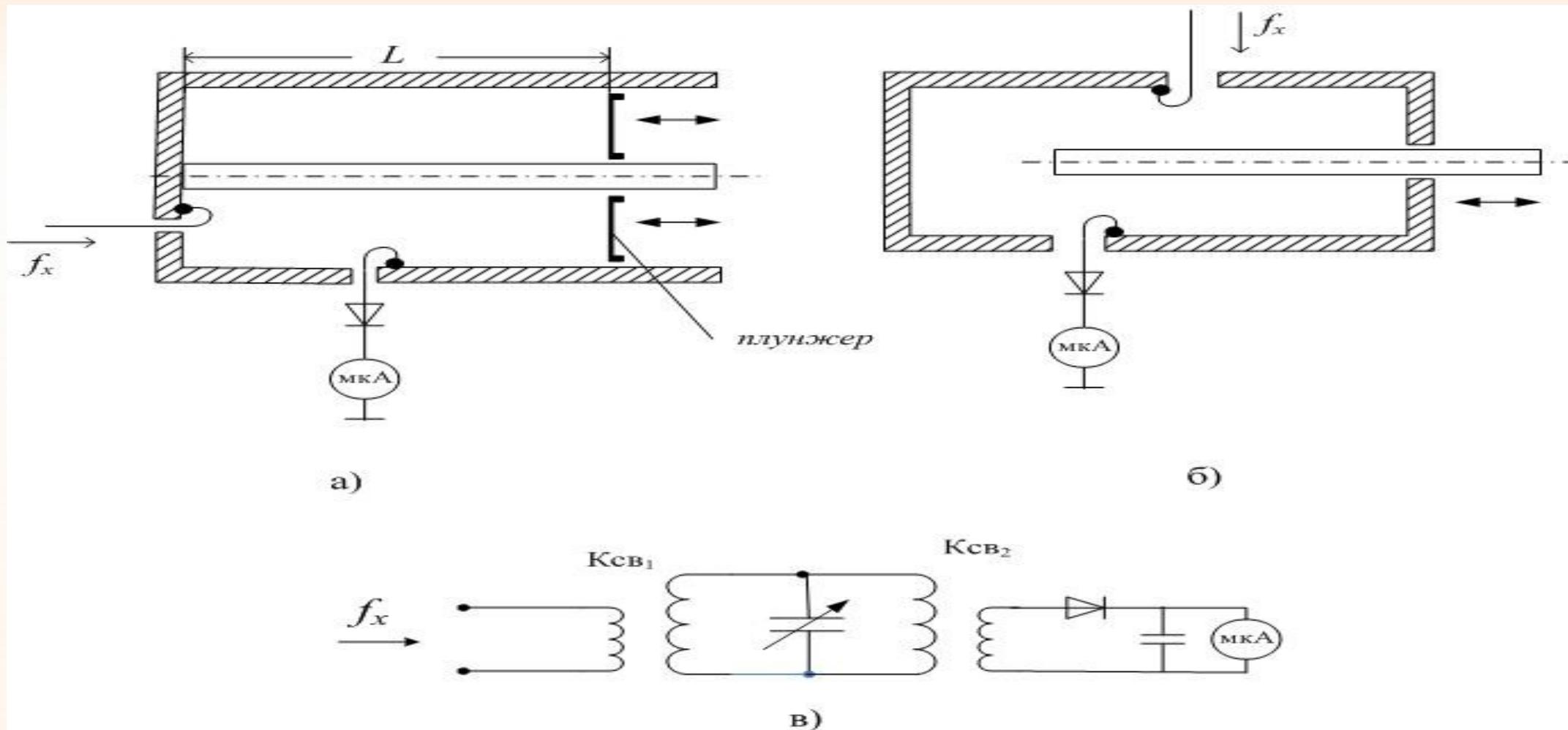
В области $2 \cdot F_H$ звук в наушниках имеет частоту менее 20 Гц и не слышен. В этой области нулевые биения наблюдаются на магнитоэлектрическом приборе (область захватывания).

Погрешность метода определяется, в основном, точностью калибровки гетеродина (порядка $10^{-3} \dots 10^{-5}$).

Гетеродинный частотомер Ч4-1

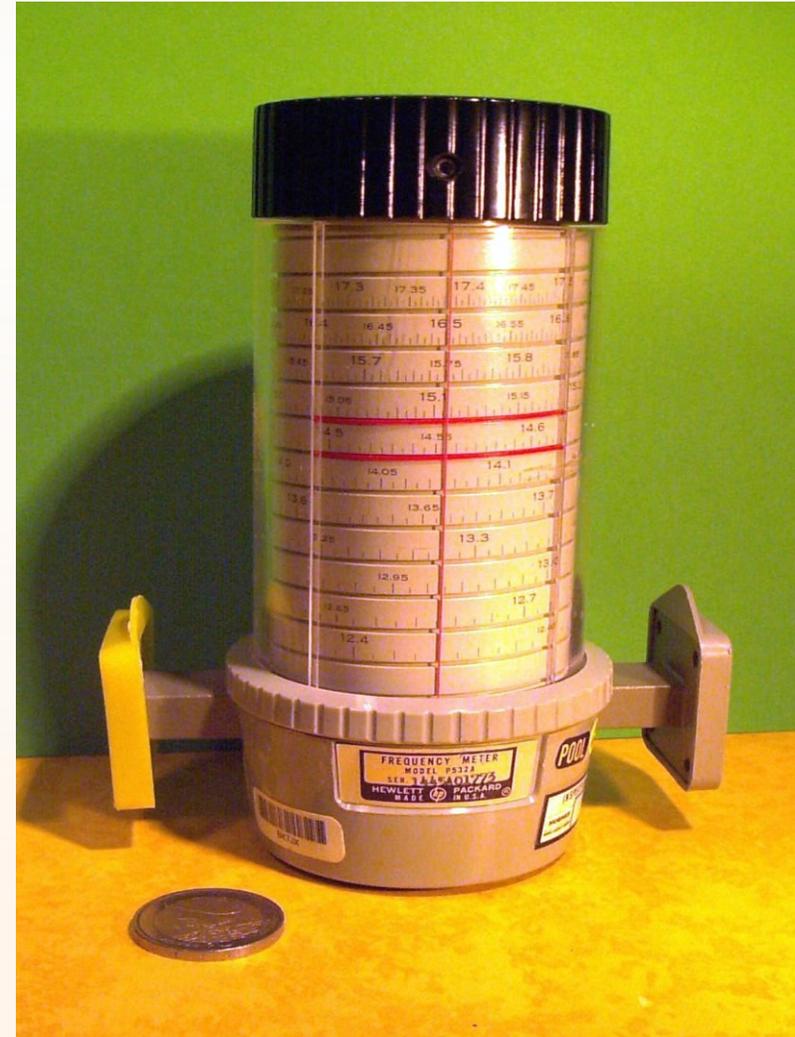
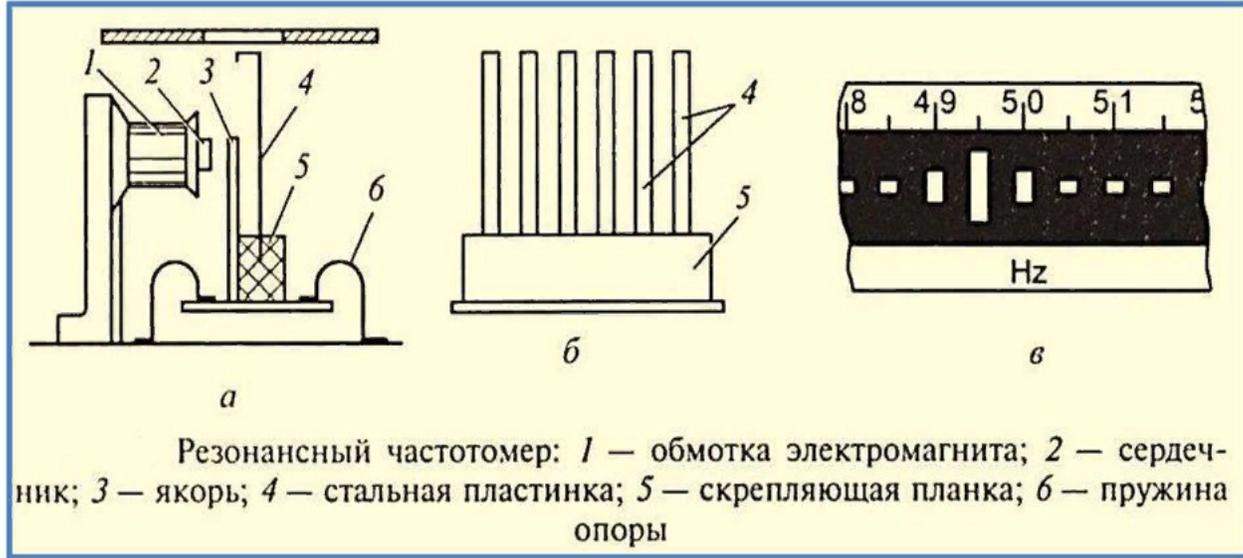


Резонансный метод измерения частоты



Коаксиальные резонансные частотомеры: а- полуволновый; б – четвертьволновый; в - проходная схема частотомера

Резонансные частотомеры разных диапазонов частот



Метод дискретного счета

Принцип измерения: подсчет за известный интервал времени $T_{сч}$ числа импульсов N , сформированных из входного сигнала. Измеряемая частота f_x (ее среднее значение за время $T_{сч}$)


$$f_x \approx \frac{N}{T_{сч}}$$

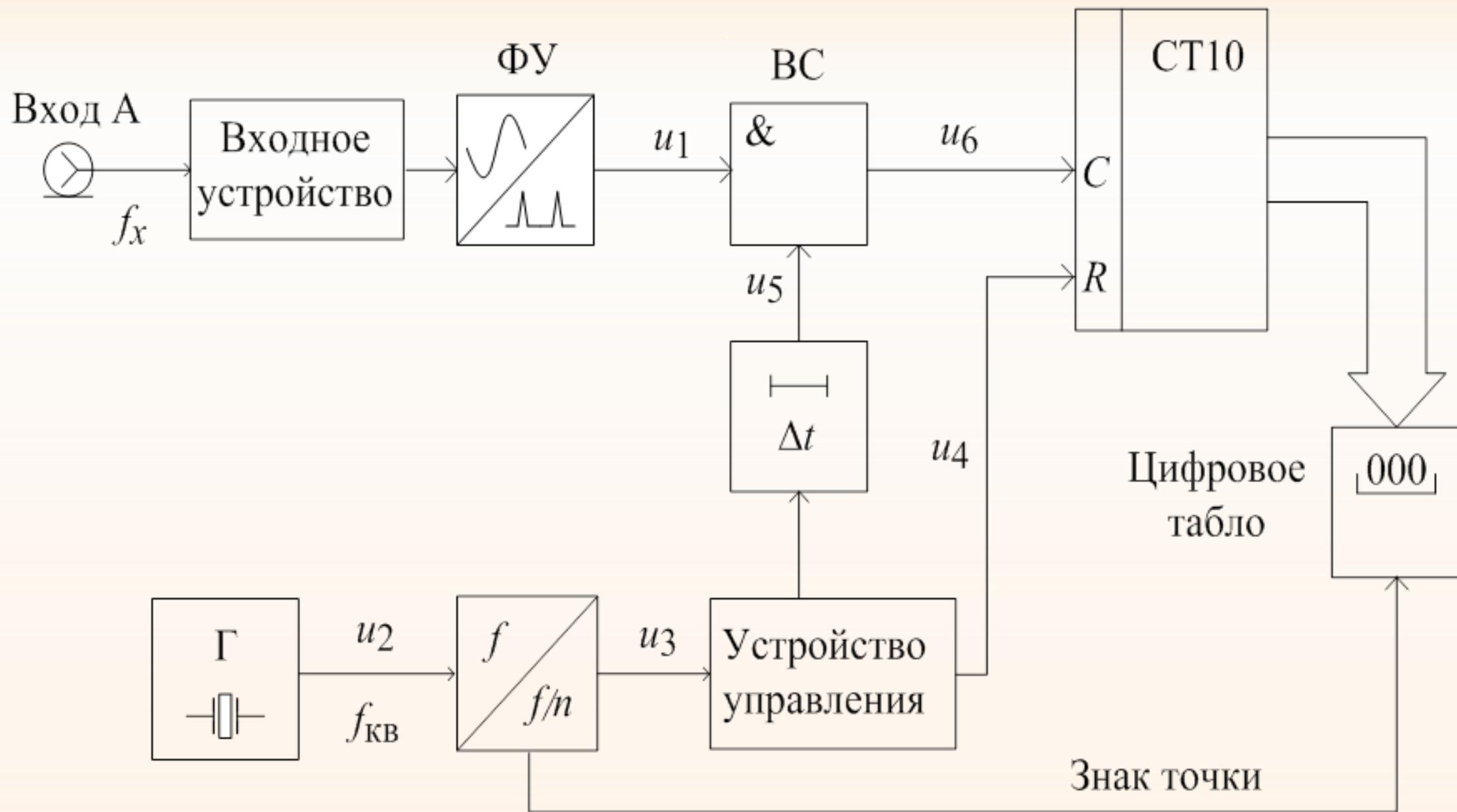
Метод дискретного счета - разновидность метода сравнения. Результат показывает, во сколько раз неизвестная частота больше образцовой, период которой равен времени счета


$$f_{обр} = \frac{1}{T_{сч}}$$

Приборы, основанные на методе дискретного счета, называют **электронно-счетными частотомерами** (ЭСЧ, *electronic counters*). Они применяются для измерения

- Частоты;
- Периода и временных интервалов;
- Отношения частот;
- Количества импульсов и количества оборотов (тахометры);
- Фазового сдвига.

ЭСЧ в режиме измерения частоты методом прямого счета (direct counting).



Временные диаграммы ЭСЧ

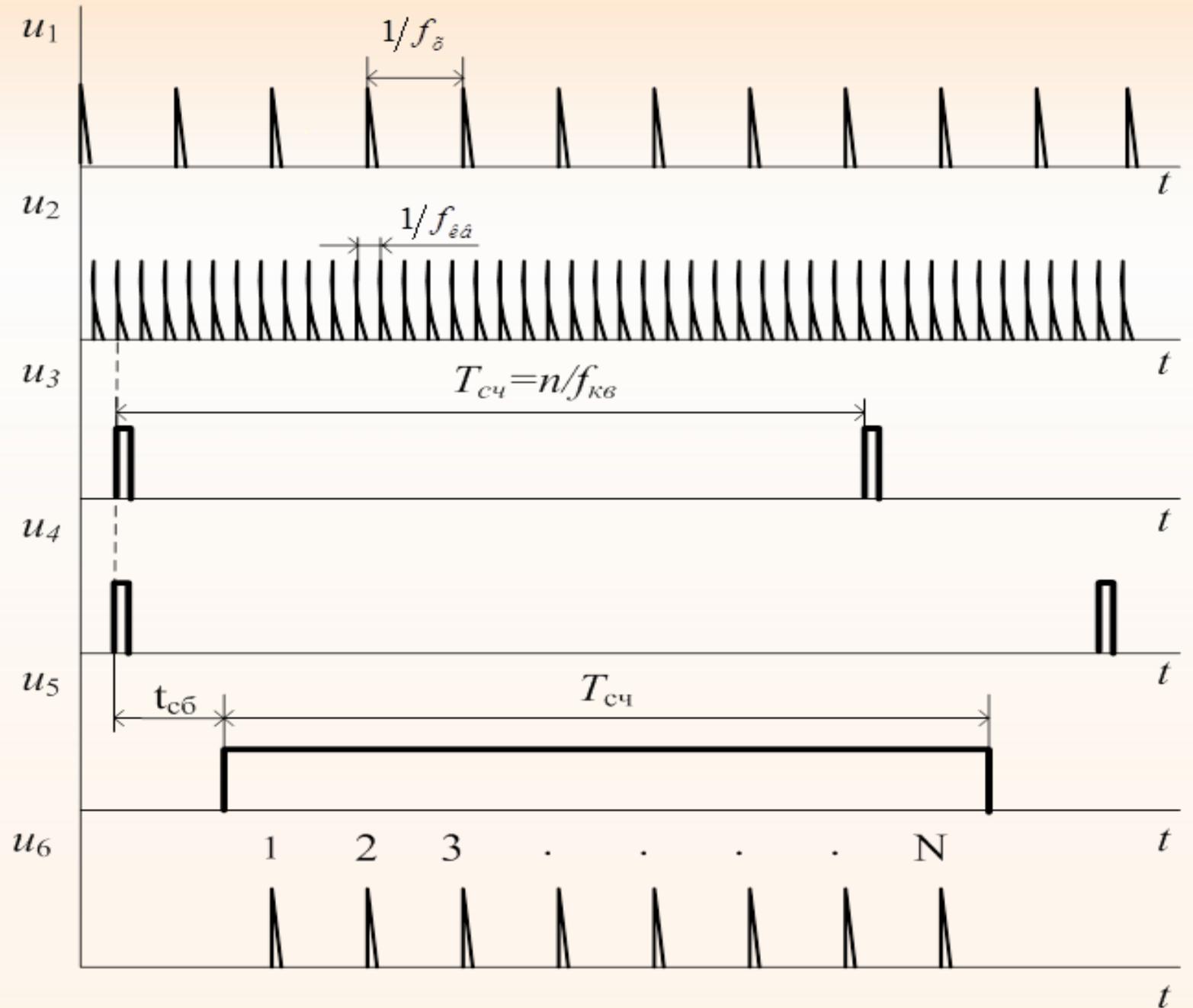
$$T_{\text{сч}} = nT_{\text{кв}} = T_{\text{кв}} \cdot 10^k$$

$$f_{\text{кв}} = 10^p, \text{ Гц}$$

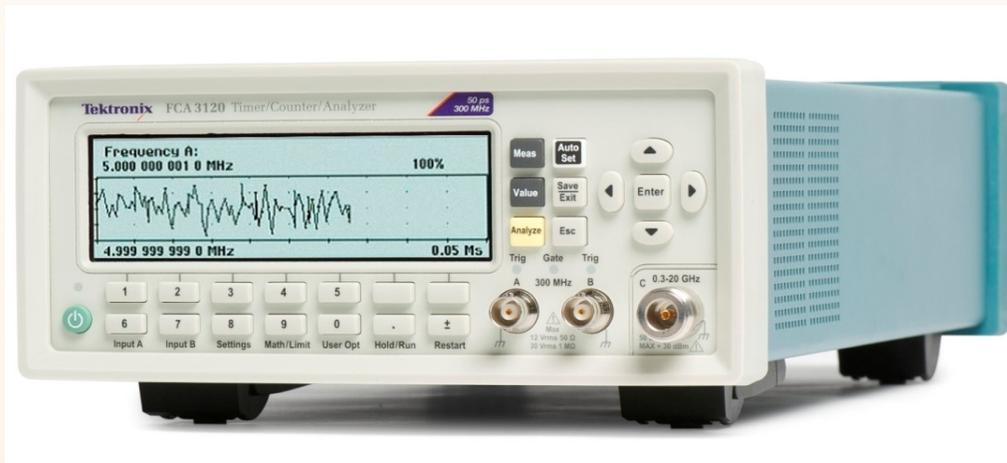
$$N = \text{int}[f_x \cdot T_{\text{сч}}] \pm 1$$

$$f_x \approx 10^{(p-k)} N, \text{ Гц}$$

$$\delta f_x = \pm \left(\delta f_{\text{кв}} + \frac{1}{f_x \cdot T_{\text{сч}}} \right)$$



Электронно-счетные частотомеры зарубежных компаний



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

***Аналоговые измерительные
генераторы***

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Измерительные генераторы – источники образцовых (тестовых) сигналов. Отличаются возможностью установки формы и параметров выходных сигналов с заданной точностью (с нормируемыми метрологическими параметрами).

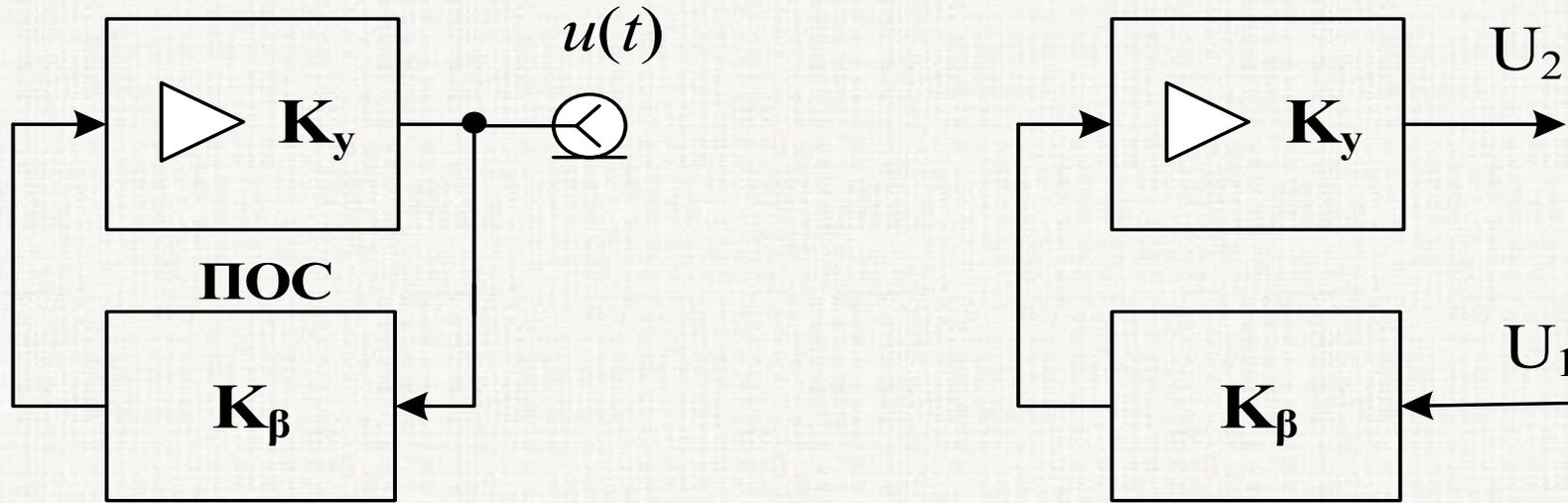
Типы измерительных генераторов (по принципу действия)

- Аналоговые генераторы (подгруппа приборов Г-)
- Генераторы сигналов произвольной формы с прямым цифровым синтезом сигнала (Direct Digital Synthesis – DDS)
- Синтезаторы частоты - генераторы гармонических сигналов, частота которых «синтезируется» путем деления и умножения, сложения и вычитания частоты опорного высокостабильного генератора и его гармоник.

Виды аналоговых измерительных генераторов по ГОСТ 15069-86

- **Низкочастотные генераторы сигналов (подгруппа Г3)** – RC-генераторы гармонических колебаний низких частот (от десятков герц до единиц МГц);
- **Высокочастотные генераторы сигналов (Г4)** вырабатывают гармонические модулированные и немодулированные колебания ВЧ и СВЧ (от 0,1 МГц до десятков гигагерц);
- **Генераторы импульсов (Г5)** – источники одиночных или периодических видеоимпульсов прямоугольной формы.
- **Генераторы сигналов специальной формы (Г6)**. Это функциональные генераторы низких и инфранизких частот сигналов сложной формы.
- **Генераторы сигналов случайной формы (Г2)**- (шумовые генераторы).

Принцип действия автогенератора



Возможность генерации определяется двумя условиями - балансом фаз и балансом амплитуд в разомкнутой системе

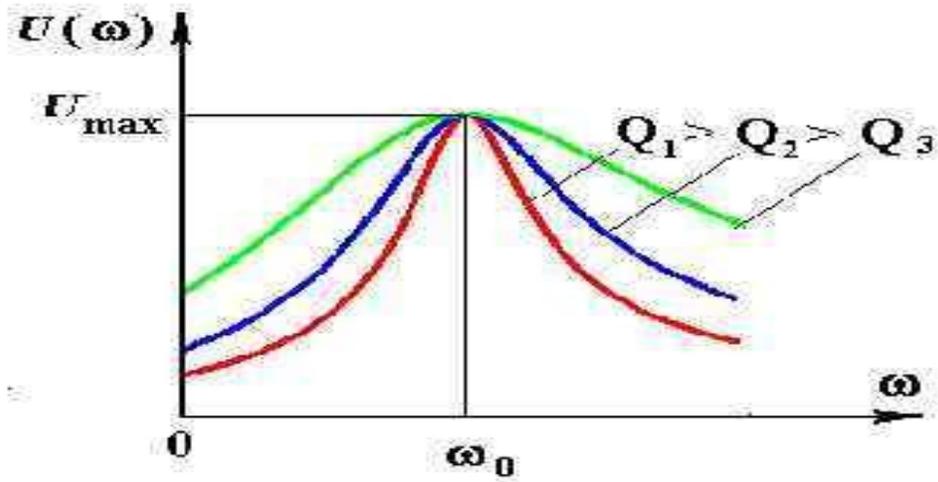
Баланс амплитуд: на частоте генерации произведение модулей коэффициентов передачи усилителя K_y и цепи обратной связи β должно быть равно единице .

$$\Rightarrow K_y \cdot K_\beta = 1$$

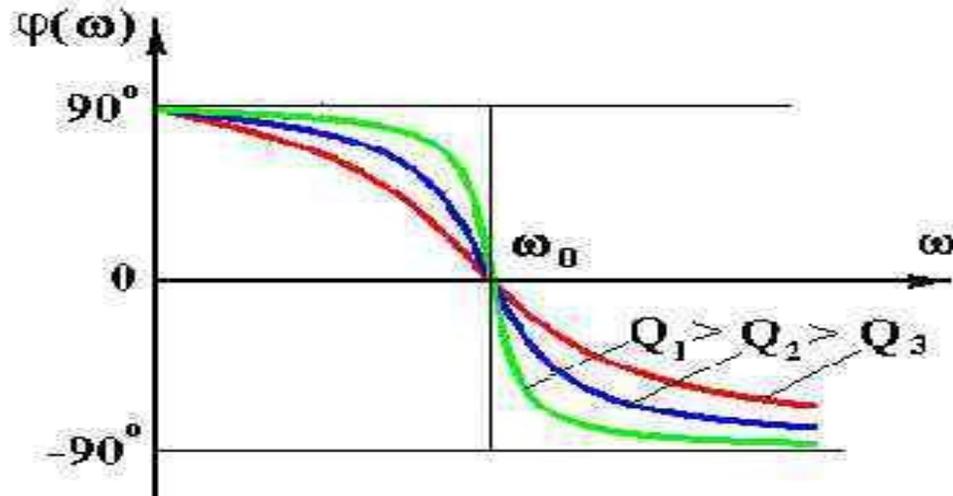
Баланс фаз : суммарный фазовый набег в усилителе и цепи ОС кратен 360 градусов (положительная ОС – ПОС)

$$\Rightarrow \phi_y + \phi_\beta = 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

Частотные характеристики колебательного контура



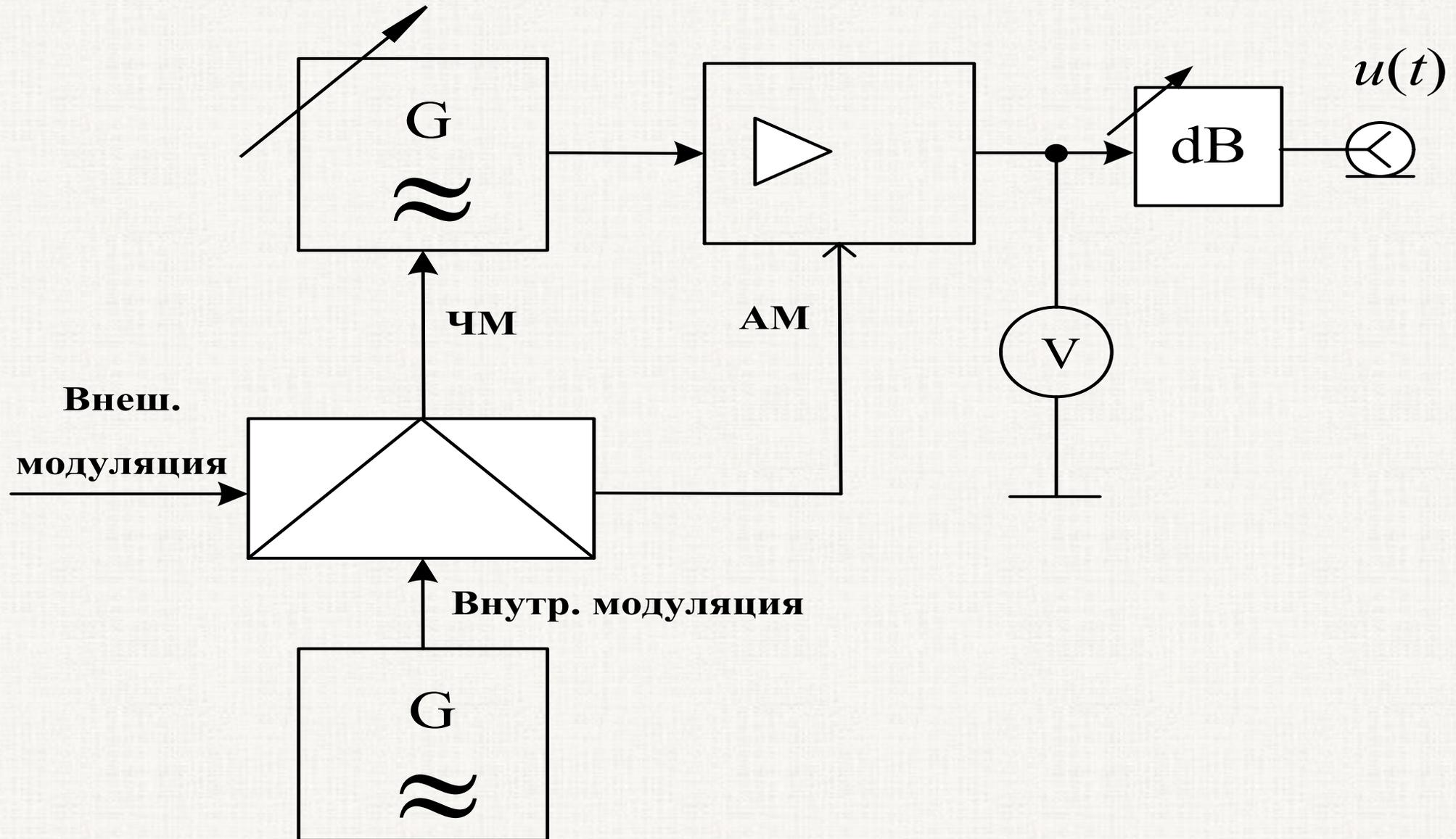
Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)



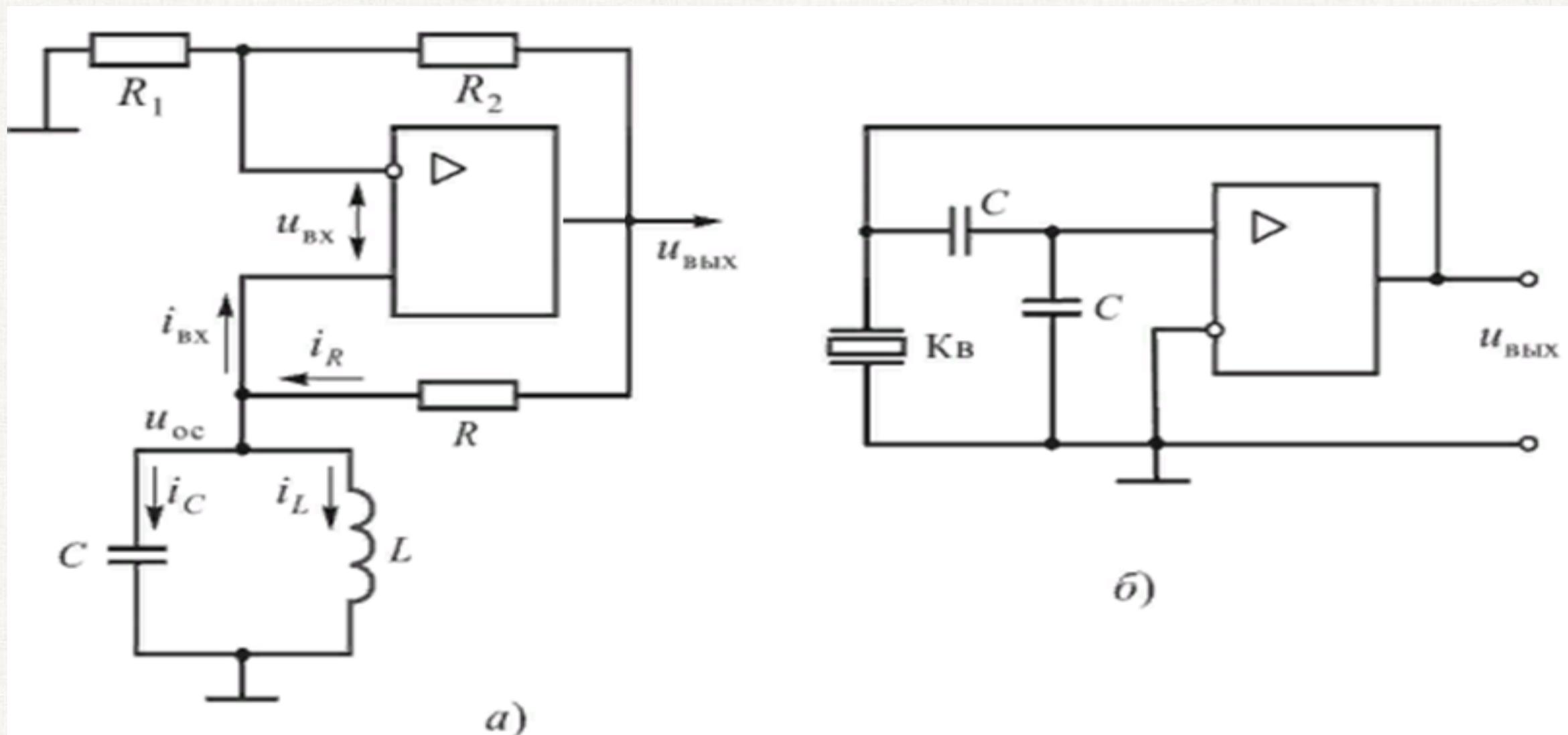
Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

Для повышения стабильности частоты генератора с резонансным контуром в цепи ПОС нужна крутая ФЧХ => т.е. нужна высокая добротность контура

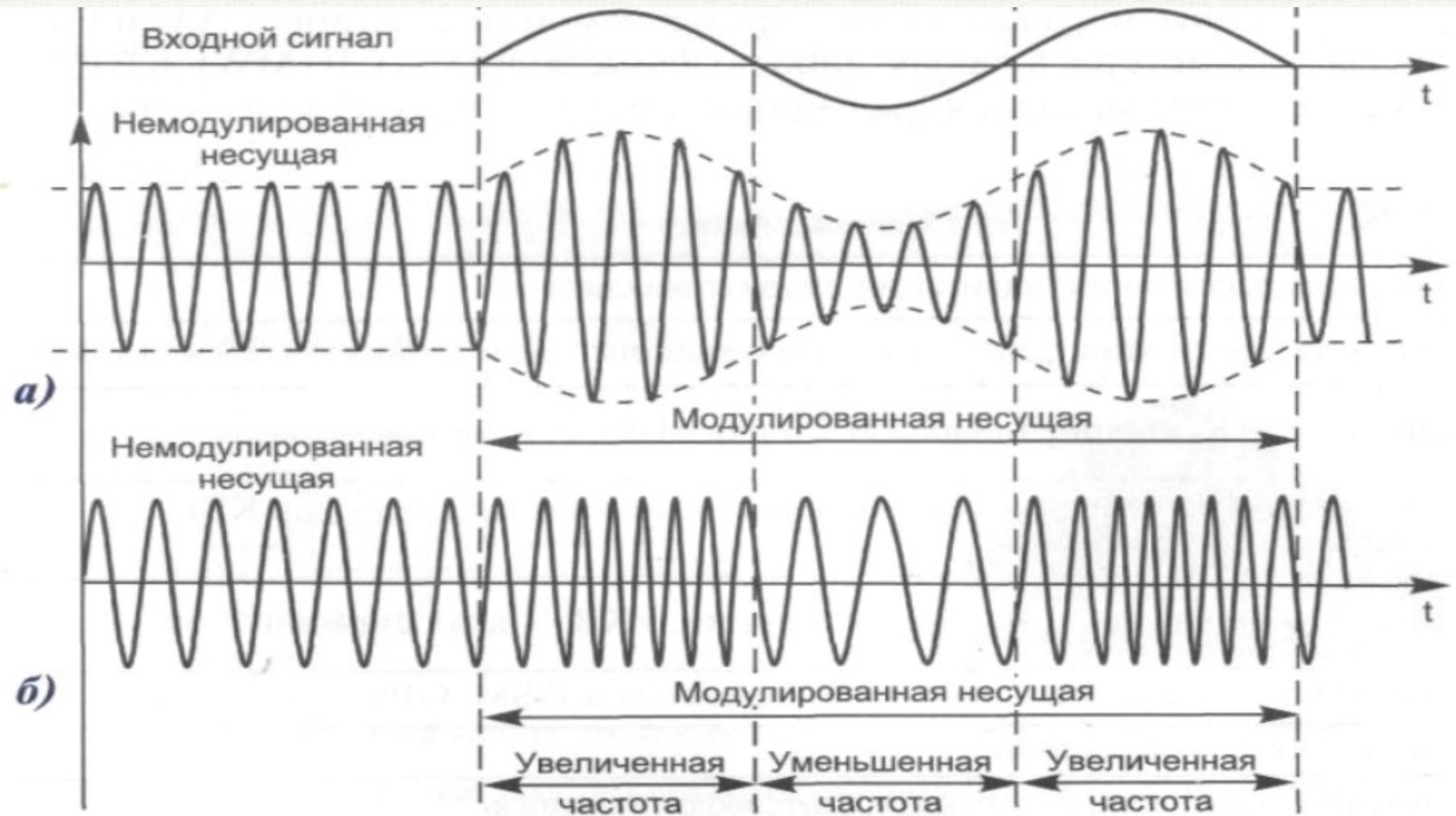
Структурная схема аналогового ВЧ генератора гармонических сигналов



Схемы автогенераторов ВЧ сигналов



Структурные схемы ВЧ автогенераторов: а - с LC резонансным контуром; б - с кварцевой стабилизацией



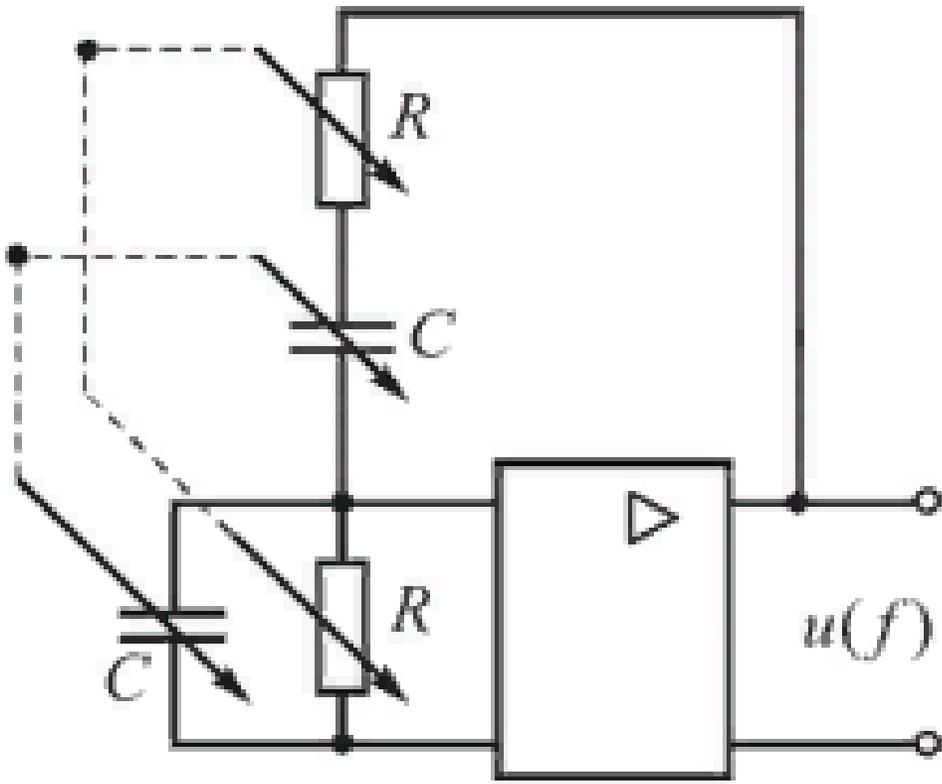
Формы сигналов генератора ВЧ: а - амплитудная модуляция (АМ): б – частотная модуляция (ЧМ).



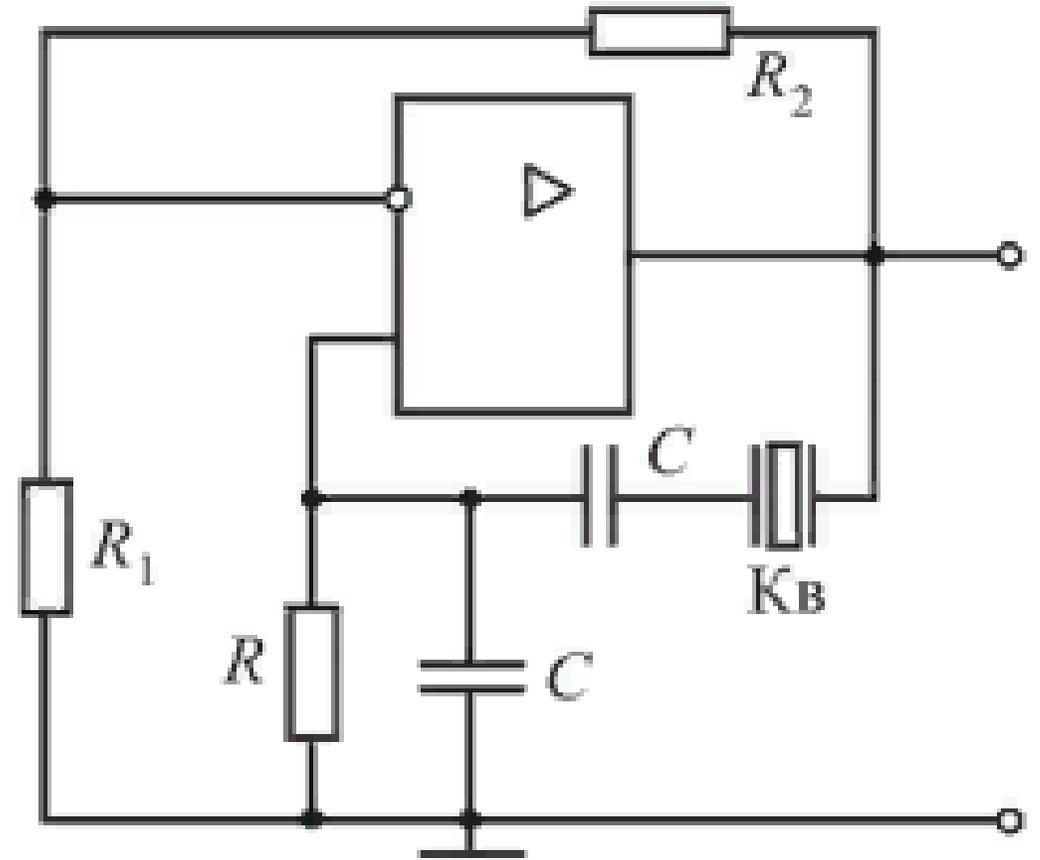
Структурная схема аналогового НЧ RC-генератора



Структурные схемы НЧ автогенераторов



а)

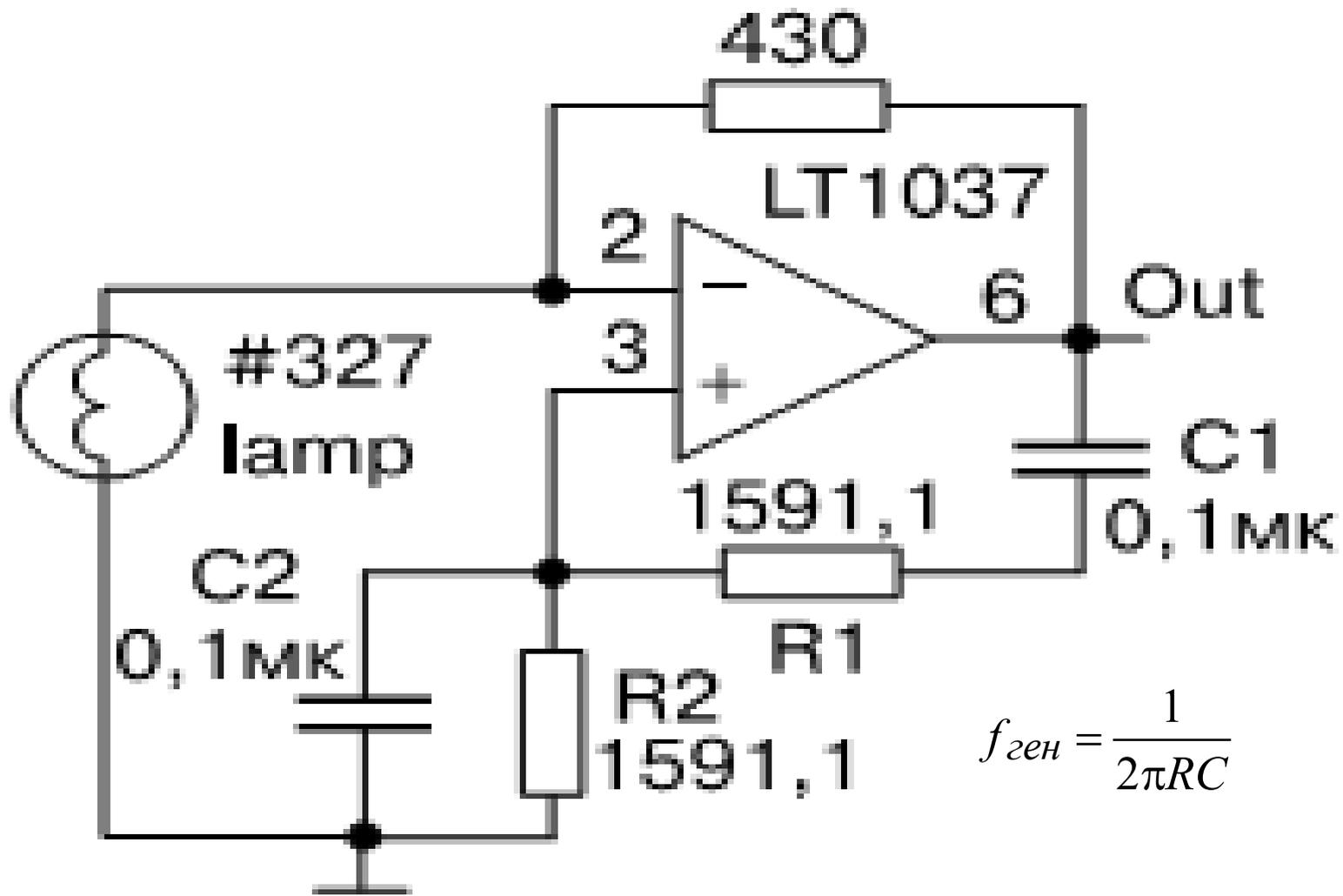


б)

Упрощенные схемы RC-генераторов с мостом Вина:

а — перестраиваемый генератор;

б — кварц включен в мост Вина вместо резистора R



Практическая схема RC-генератора на операционном усилителе с нелинейной ООС и ПОС с мостом Вина



Эксплуатационные параметры генераторов гармонических сигналов:

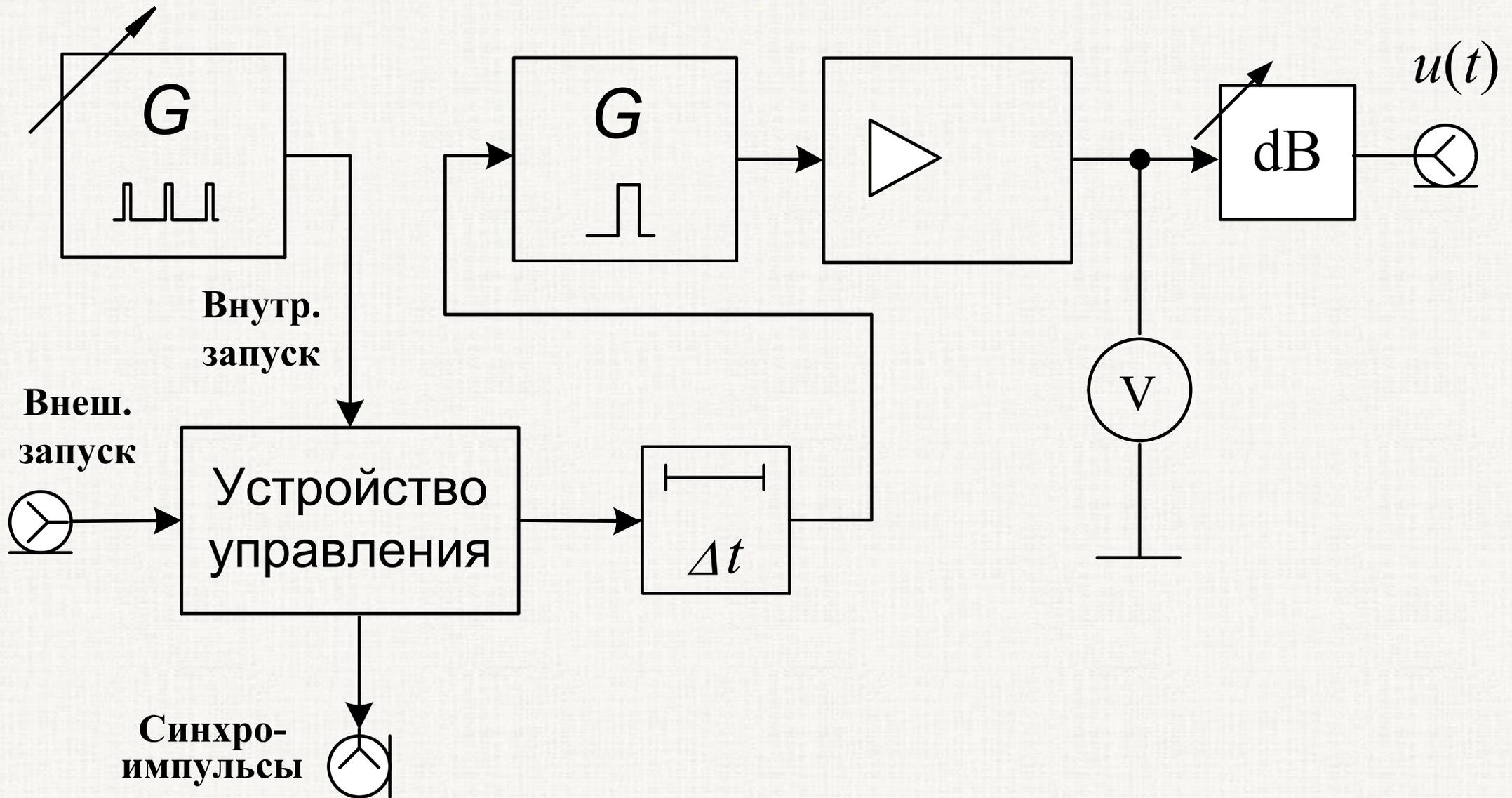
- диапазон перестройки по частоте;
- пределы регулирования уровня выходного напряжения;
- диапазон установки параметров модуляции.

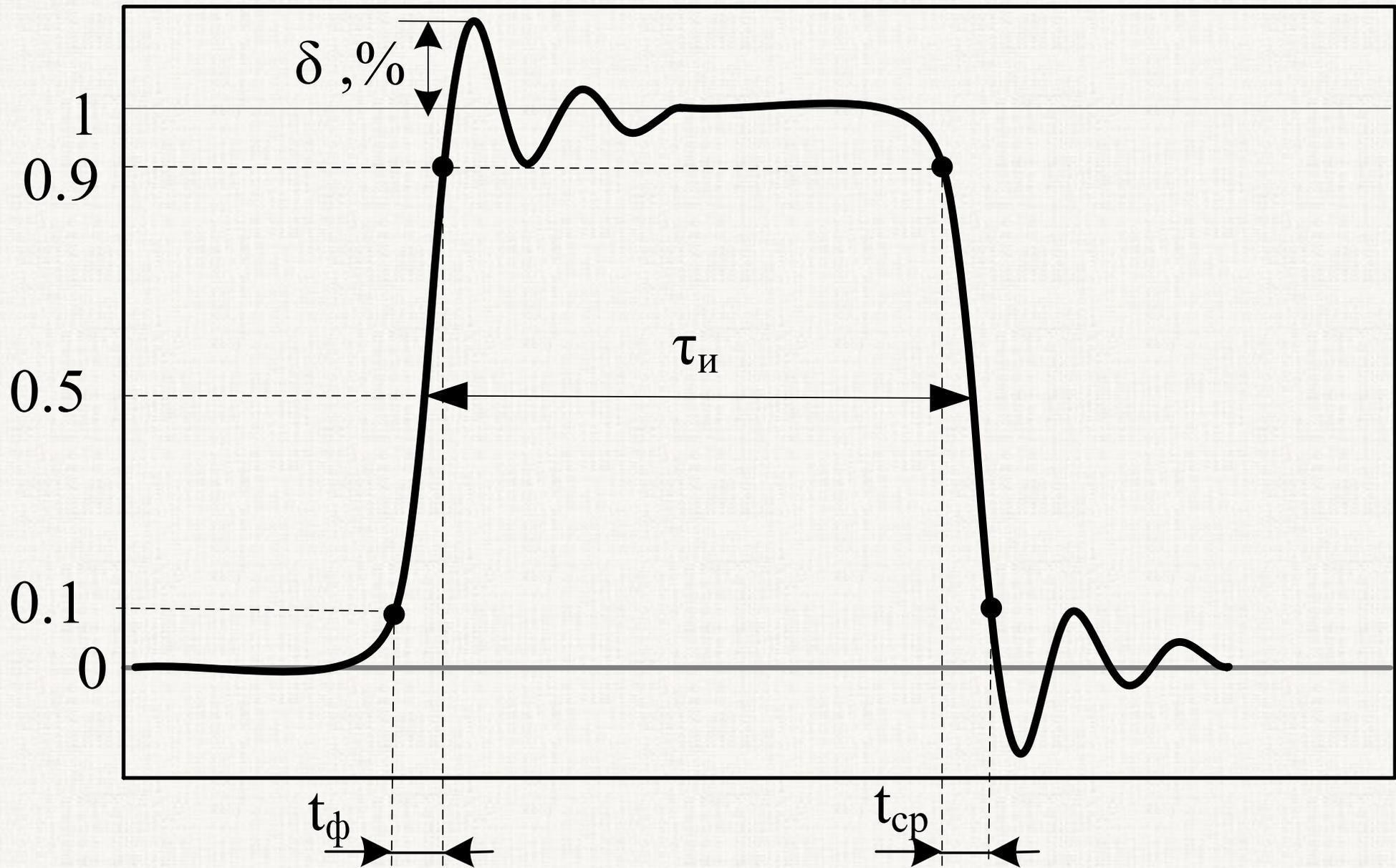
Метрологические параметры – пределы допускаемых погрешностей установки: частоты, уровня сигнала и параметров модуляции, коэффициент гармоник (чистота спектра сигнала).

Погрешность установки частоты определяется неточностью градуировки, временной нестабильностью задающего генератора, дискретностью шкалы и конструкцией отсчетного устройства. Погрешность установки выходного напряжения определяется точностью контроля опорного уровня и погрешностью градуировки аттенюатора.

Паспортная точность гарантируется **только** при работе генератора *на активную нагрузку, сопротивление которой равно заданному выходному сопротивлению генератора*

Структурная схема генератора импульсов





Вид реального импульса, близкого к прямоугольному

Эксплуатационные параметры генераторов импульсов:

- диапазон регулирования частоты повторения;
- диапазоны установки длительности и амплитуды импульсов;
- пределы регулирования времени задержки выходных импульсов относительно синхроимпульсов (временной сдвиг).

Метрологические параметры – пределы допускаемой погрешности установки параметров импульсов.

Точность воспроизведения формы импульса. Характеризует степень близости его формы к идеальной прямоугольной. Амплитуду импульса отсчитывают по усредненной вершине (без учета выброса δ), длительность импульса τ определяют по уровню 0,5 .

Длительности фронта и среза показывают качество воспроизведения формы импульса.

Эти параметры отсчитывают по уровням 0,1 и 0,9 .



АКИП-3304



АКИП-3302

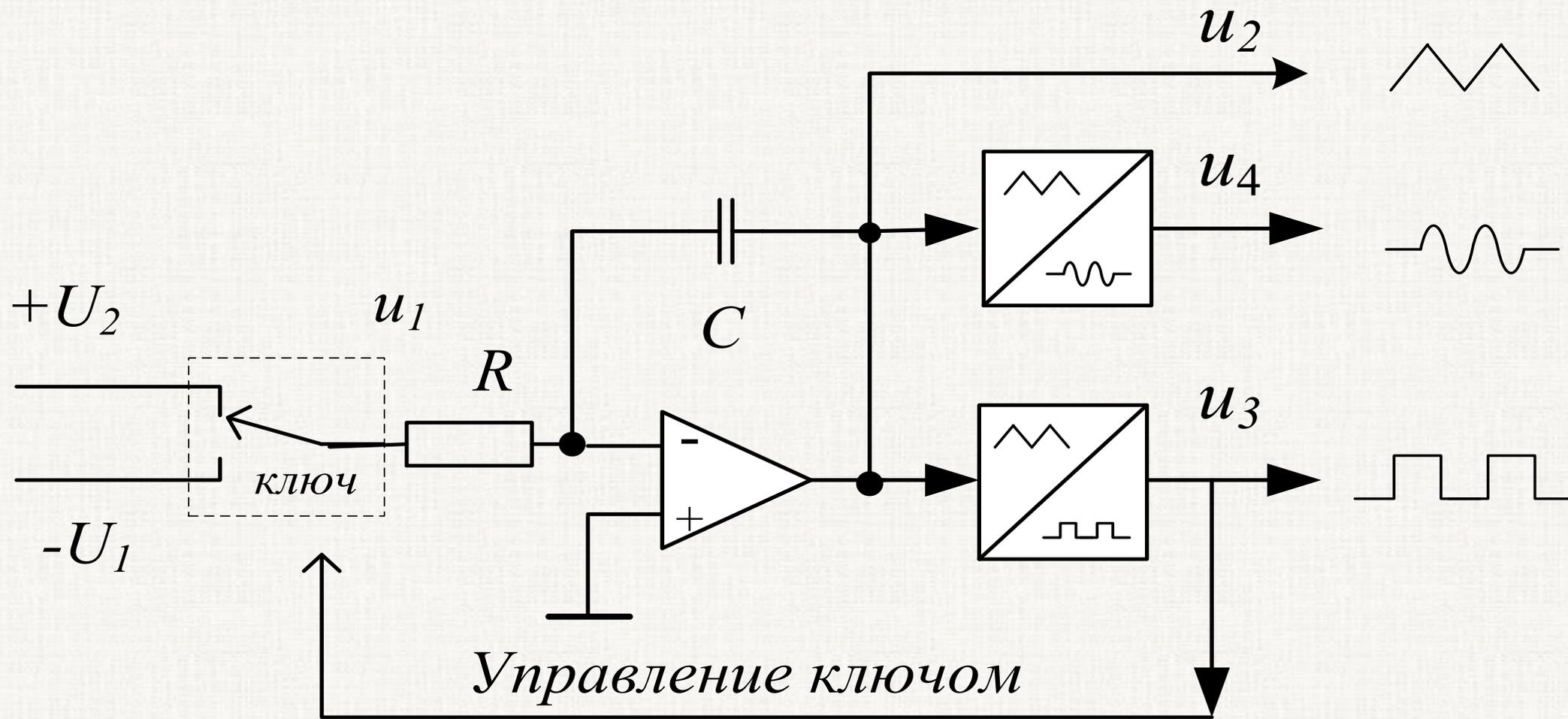


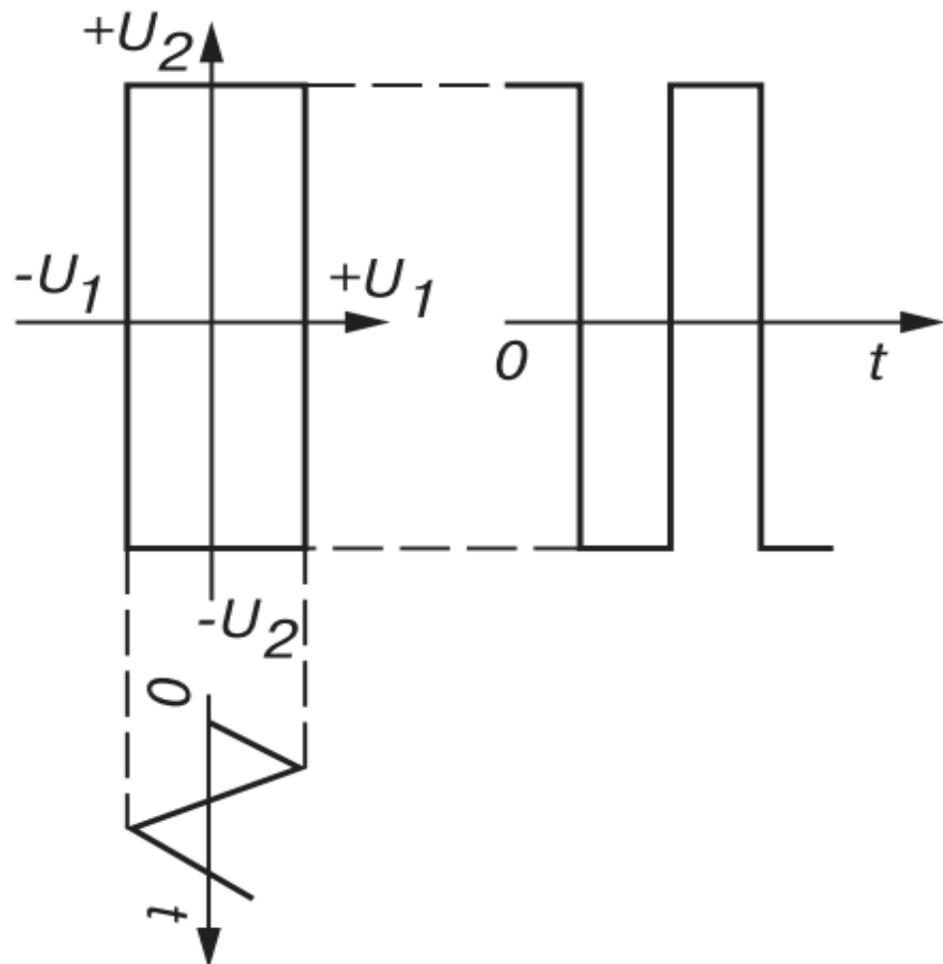
WWW.PULSTE.RU



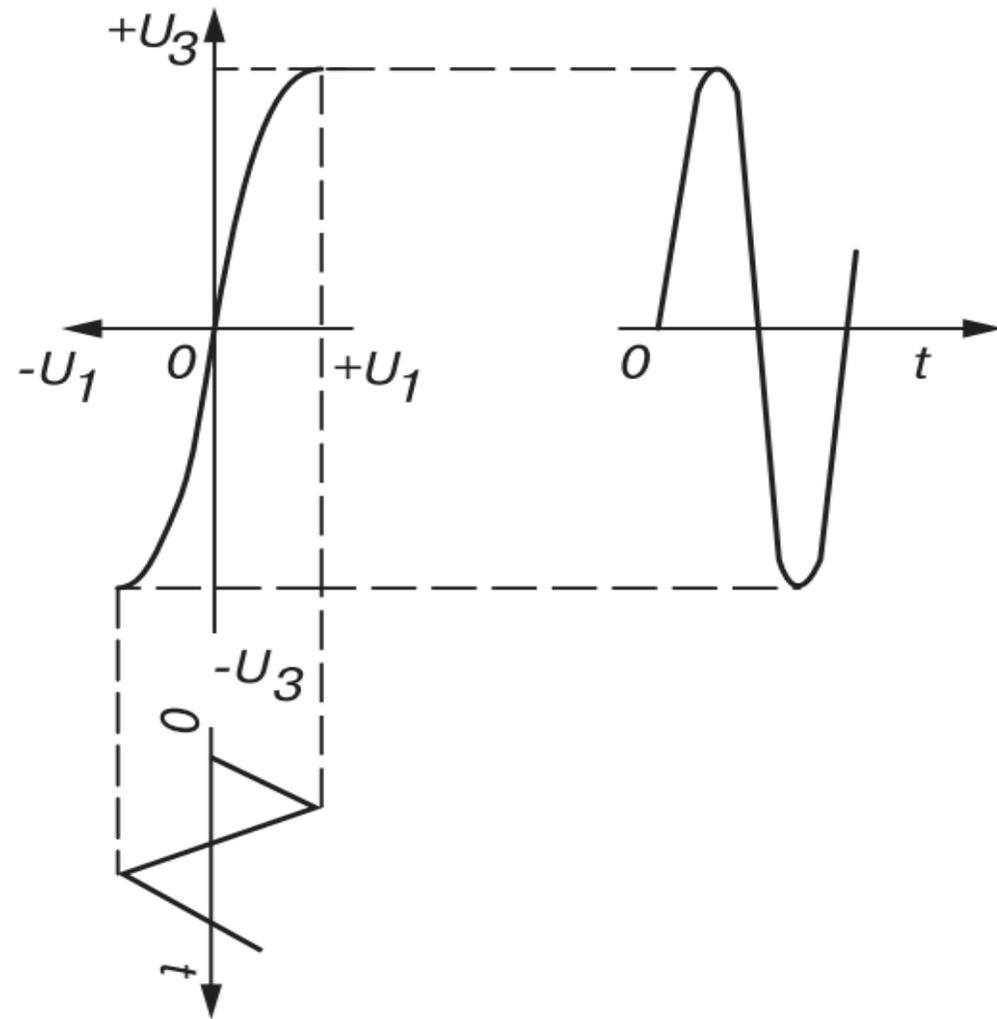
Keysight 81101A генератор импульсов

Структурная схема функционального генератора сигналов сложной формы

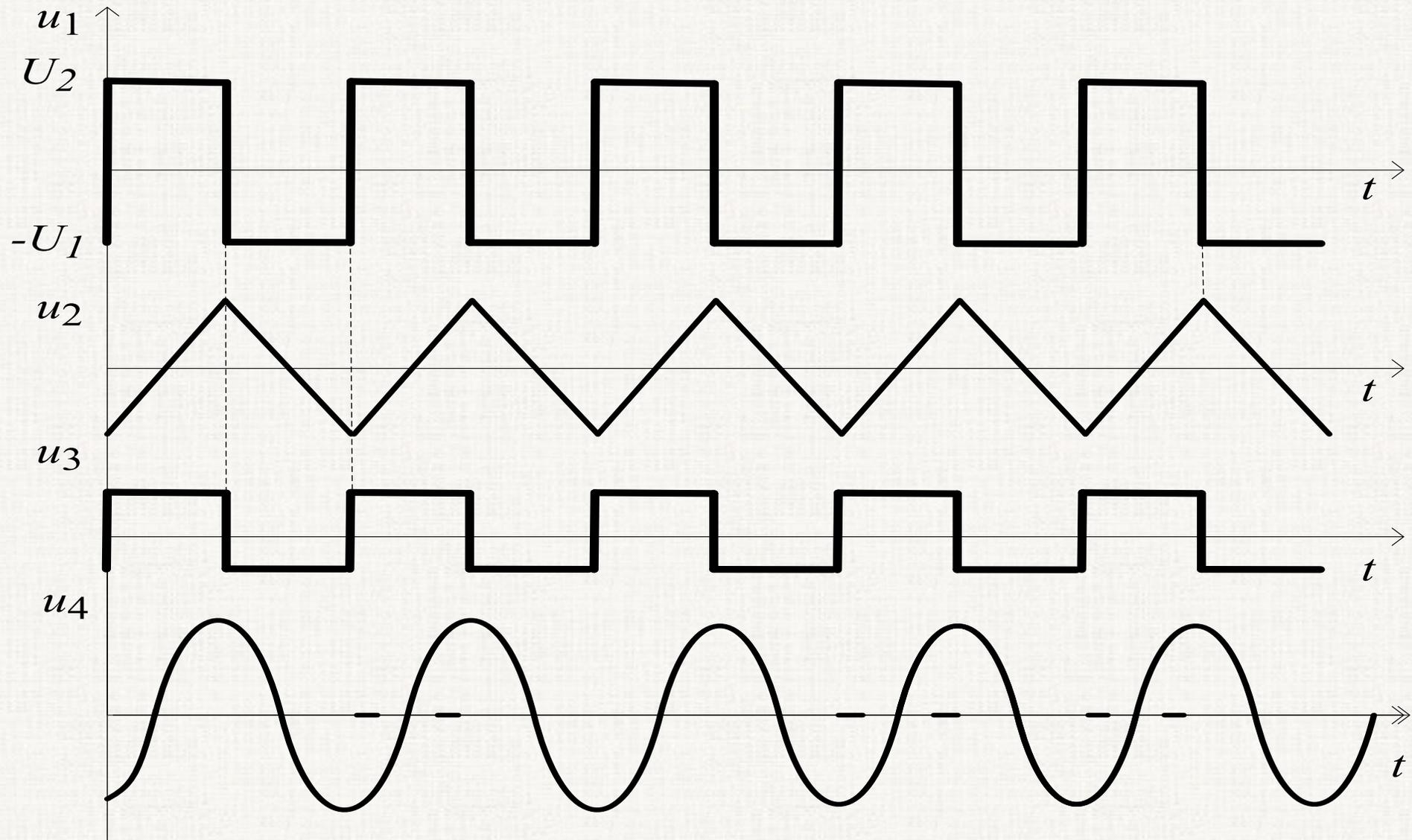




Диаграммы напряжений
релейного преобразователя
«треугольник- меандр»



Диаграммы напряжений
преобразователя
«треугольник - синус»



Диаграммы напряжений функционального генератора



Генератор сигналов
специальной
формы Г6-37



Внешний вид функционального генератора Г6-43



Функциональный генератор FG3CE с встроенным цифровым частотомером

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

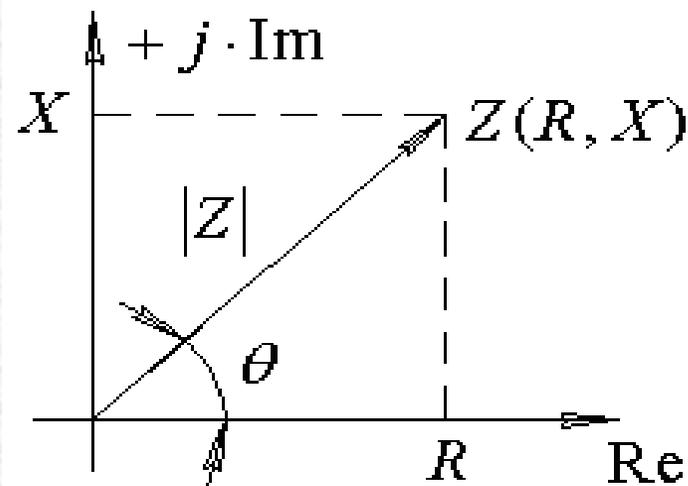
***Измерение параметров RLC
компонентов***

**Санкт-Петербург
2024 г.**

Классификация методов и средств измерения параметров RLC-двухполюсников

Свойства двухполюсников при работе с гармоническими сигналами описывают полным комплексным сопротивлением (**импедансом**) Z - отношение комплексных амплитуд напряжения и тока (законе Ома для комплексных амплитуд). Обратная величина – проводимость (**адмиттанс**)

Векторная
диаграмма
полного
импеданса

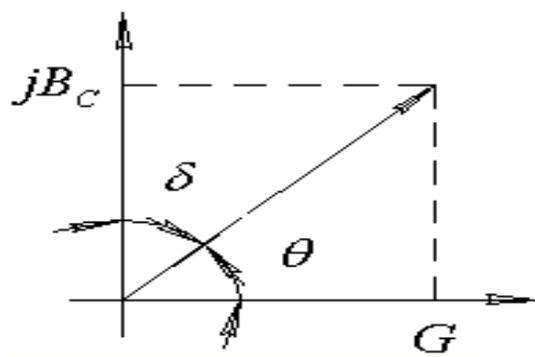
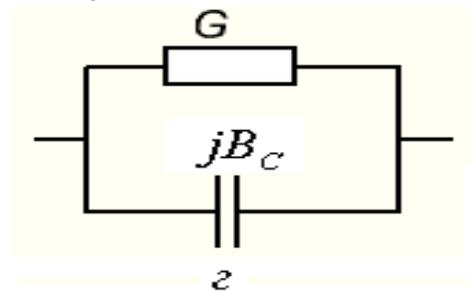
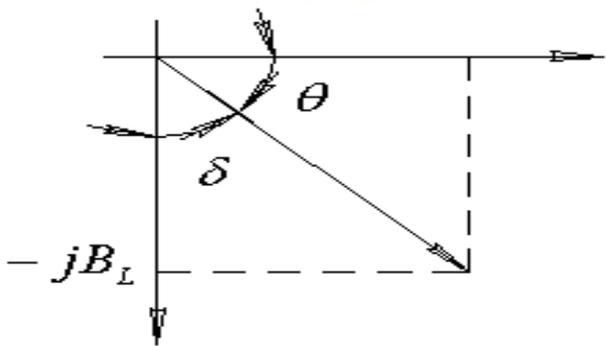
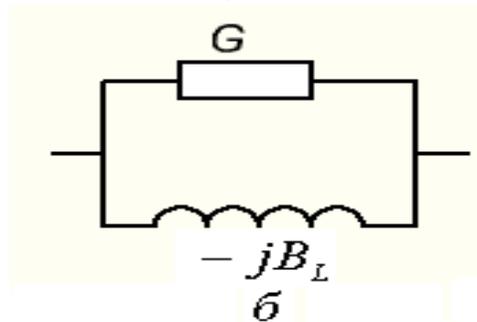
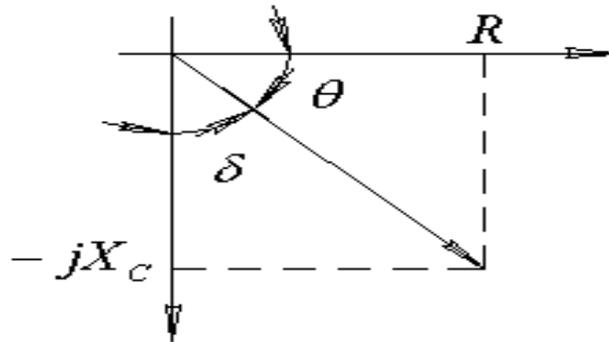
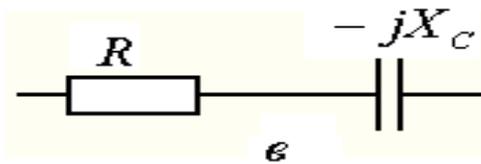
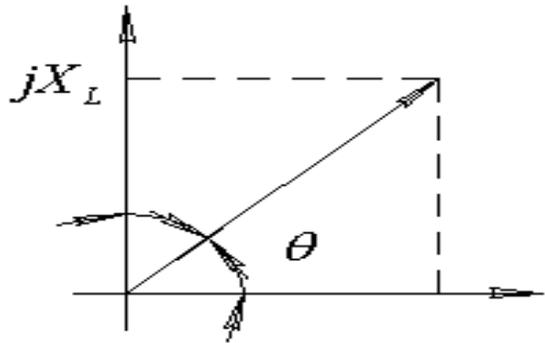
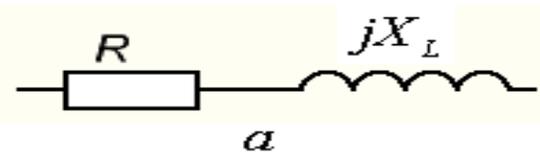


$$Z = R + jX = |Z| \cdot \exp(\theta);$$

$$\begin{cases} R = |Z| \cdot \cos(\theta); \\ X = |Z| \cdot \sin(\theta); \end{cases}$$

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}; \\ \theta = \arctan \left[\frac{X}{R} \right]; \end{cases}$$

Используют общий термин «иммитанс» для понятий "импеданс" (сопротивление) Z и "адмиттанс" (проводимость) Y . Приборы для их измерения - «измерители иммитанса» или **LCR-метры**.



Соотношение между импедансом и адмиттансом индуктивного (а,б) и емкостного (в,г) типов

$$Z = R + jX = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

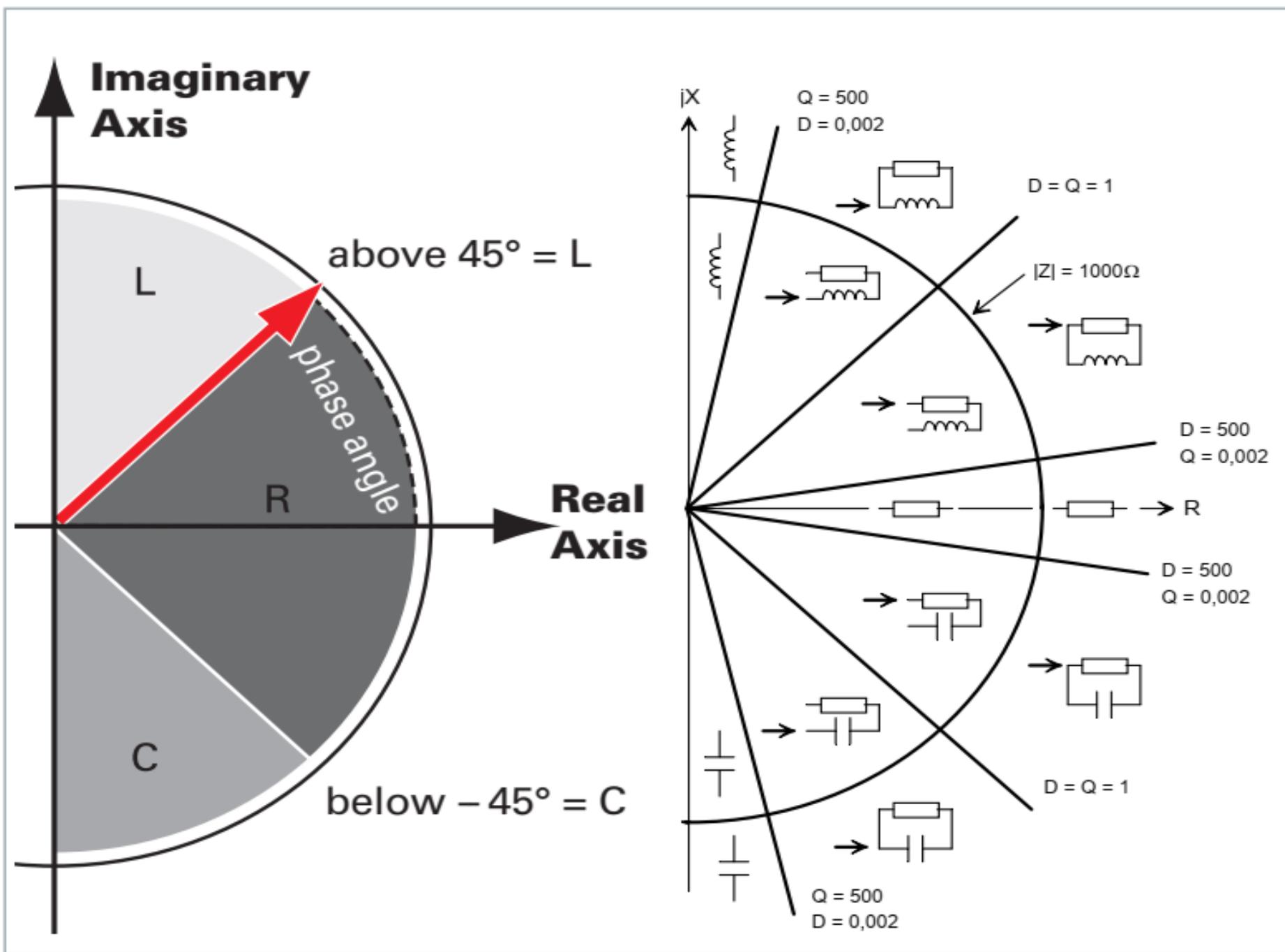
$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}$$



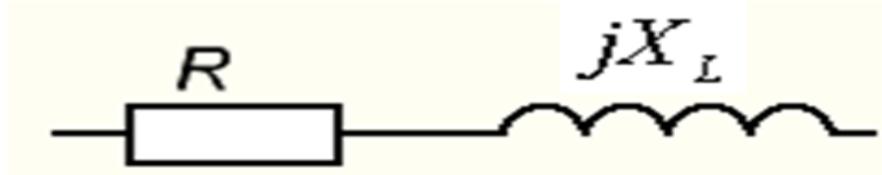
Закон Ома для комплексных амплитуд напряжения и тока

Последовательная и параллельная схемы замещения

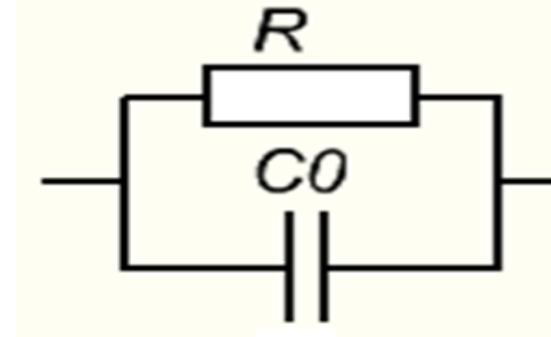
Плоскость полного
сопротивления Z и
схемы замещения
индуктивных и
емкостных
двухполюсников



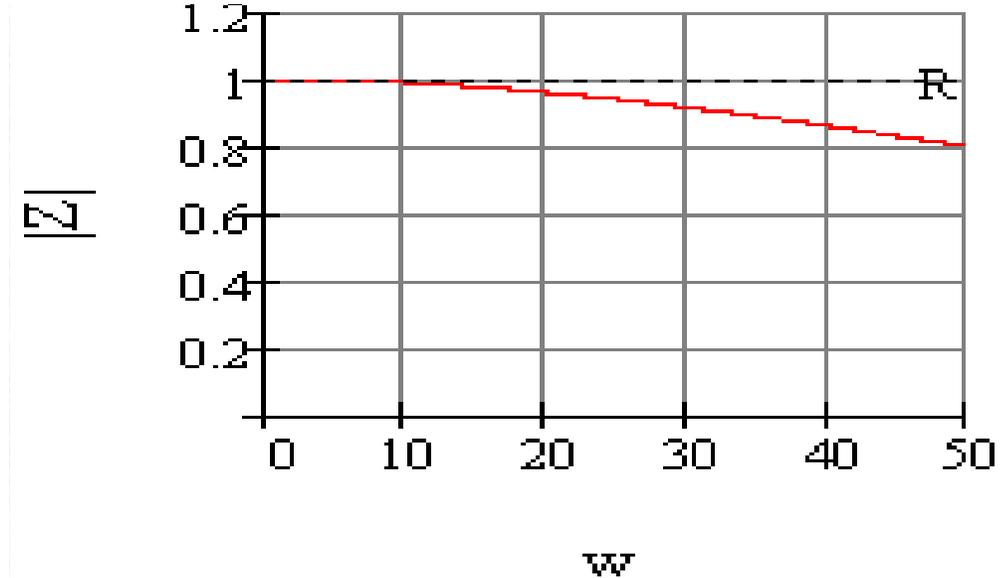
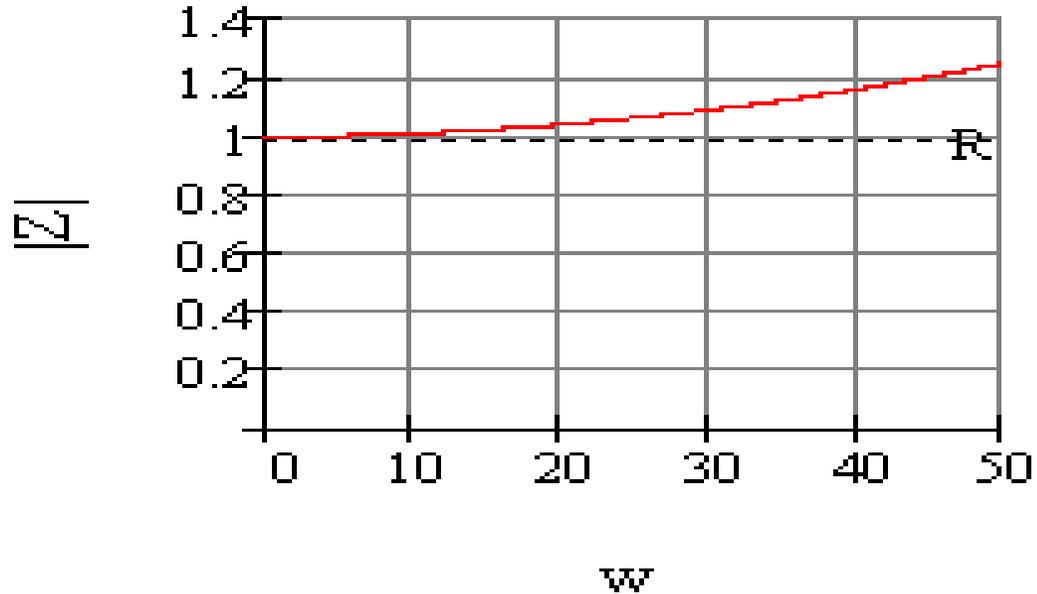
Схемы замещения реального активного резистора R



а

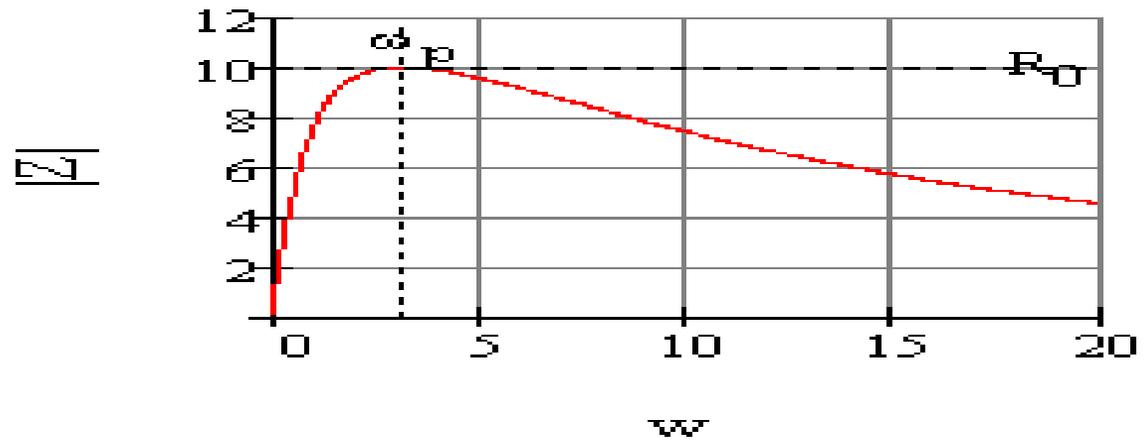
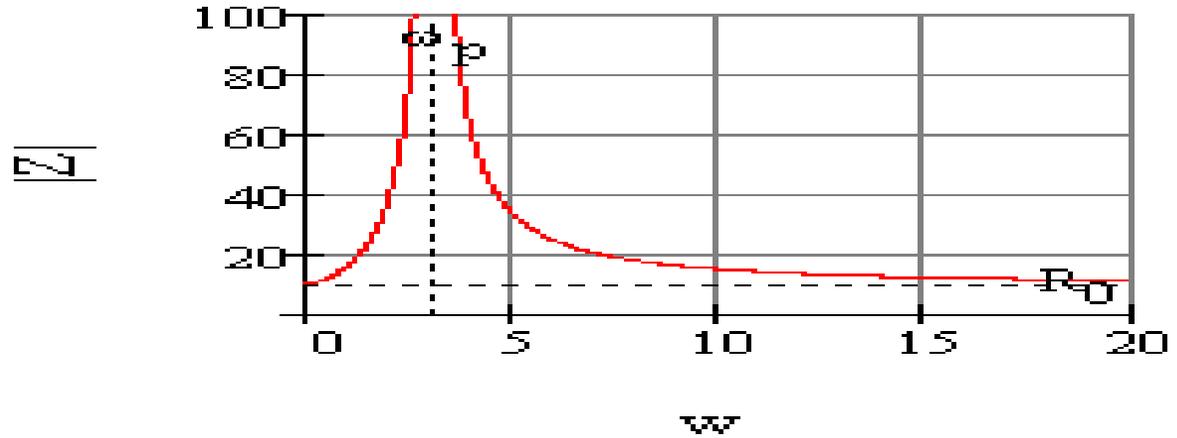
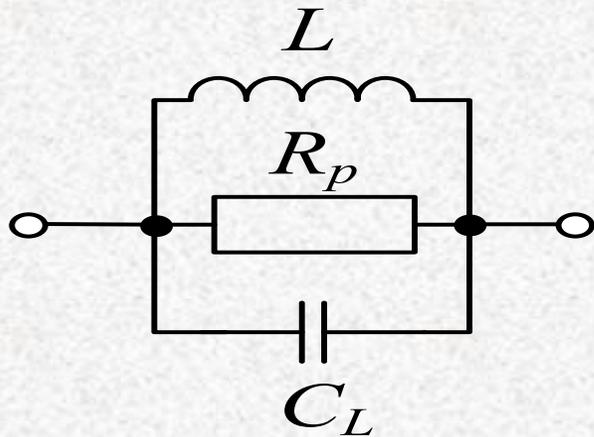
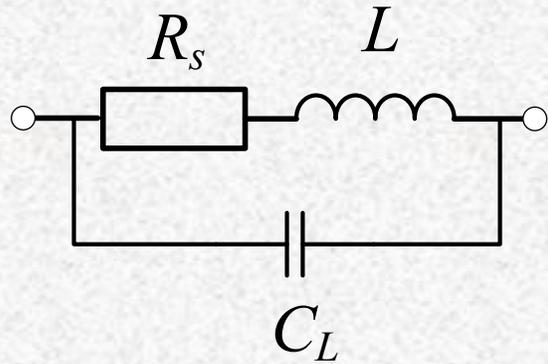


б



Для резистора, кроме активного сопротивления, необходимо учитывать его паразитные индуктивность и емкость

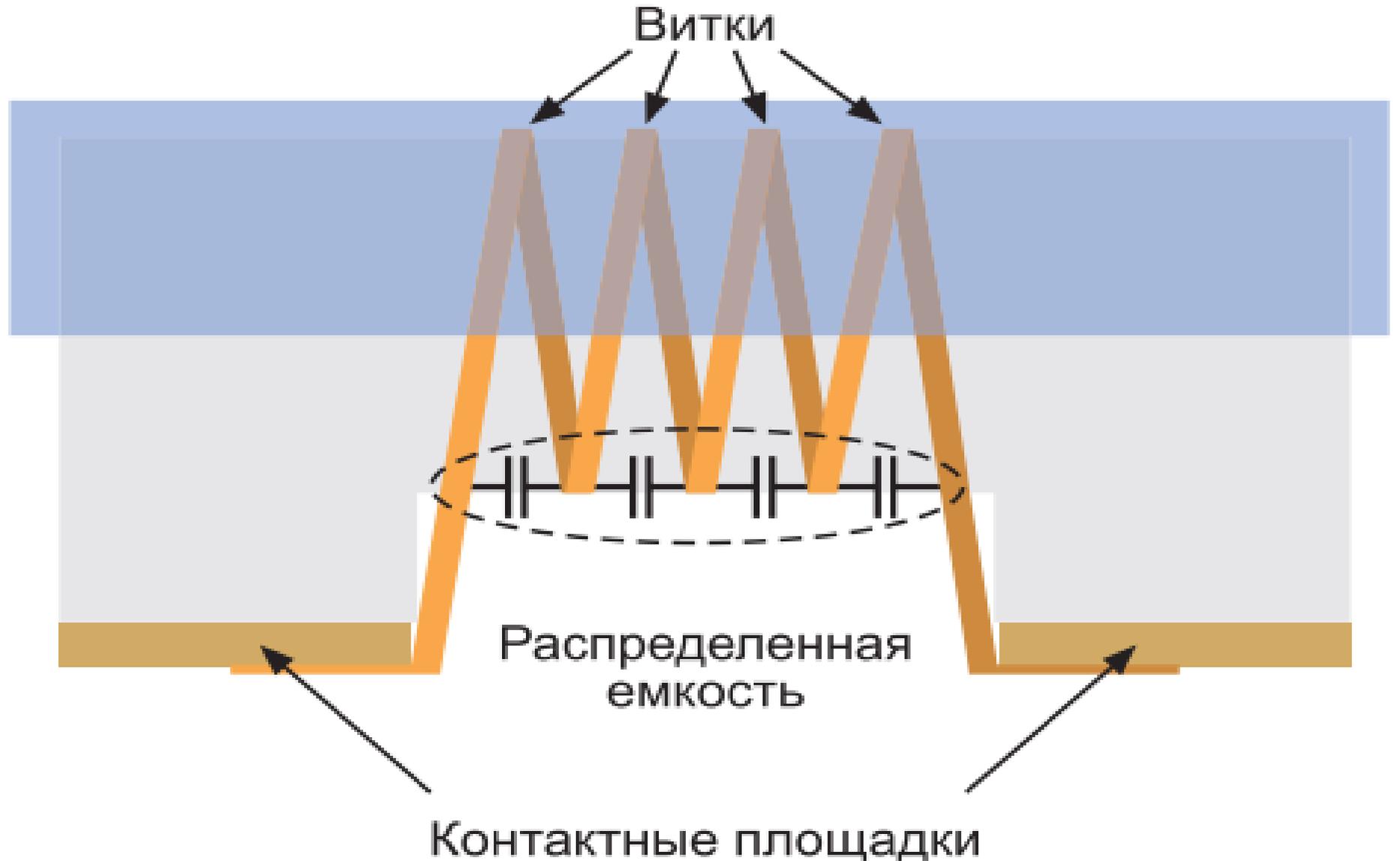
Схемы замещения катушки индуктивности (L)



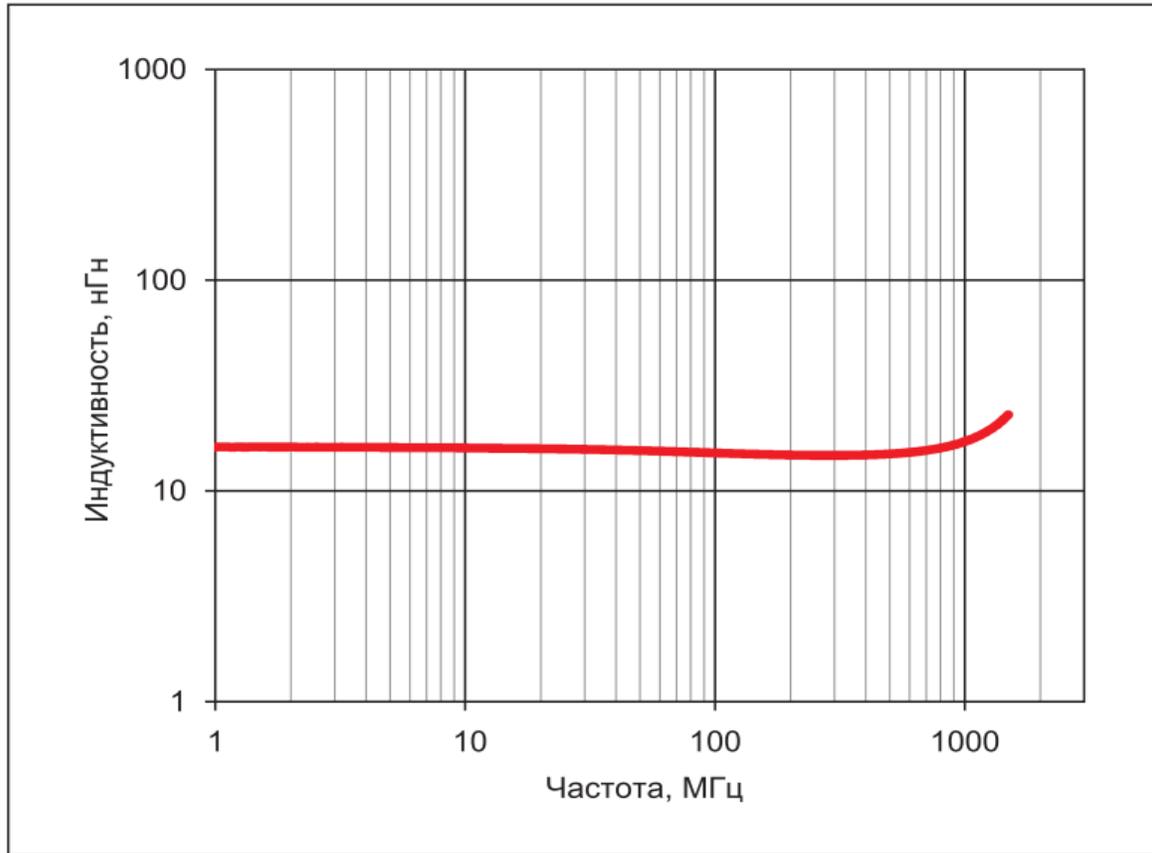
Главный параметр - индуктивность катушки L , паразитные – сопротивление R_s для последовательной схемы замещения (а), сопротивление потерь R_p для параллельной схемы (б) и межвитковая емкость катушки C_L .

Межвитковая емкость катушки индуктивности (L)

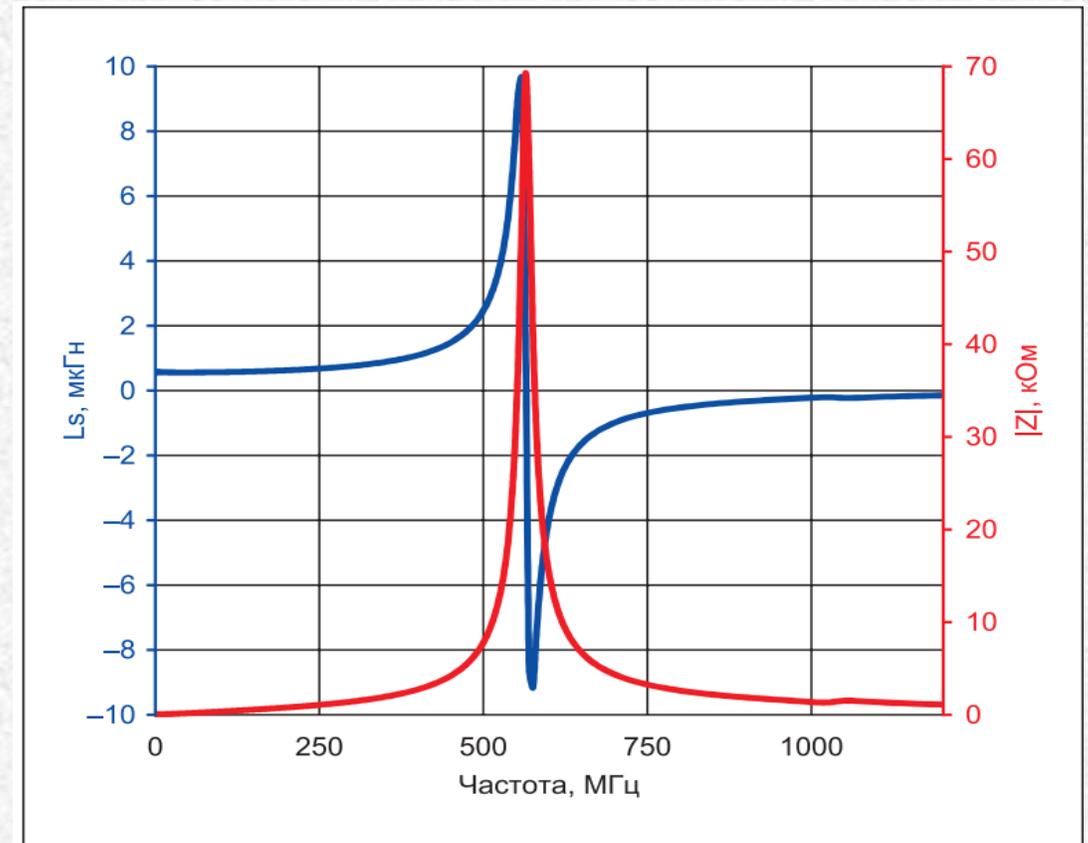
Представление
реальной ВЧ-
катушки
индуктивности
(параллельные
витки катушки
действуют как
электроды
конденсатора,
образовывая
распределенную
емкость)



Частотные зависимости катушки индуктивности (L)



Частотная зависимость действующей индуктивности для ВЧ-катушки (до резонанса)



Графики изменения индуктивности L_d (синий график) и модуля импеданса $|Z|$ (красный график) от частоты для типовой ВЧ-катушки в широком диапазоне частот

Качество катушек индуктивности характеризуют добротностью

$$Q_L = X / R = \frac{2\pi f \cdot L}{R_s} \quad \text{для последовательной}$$

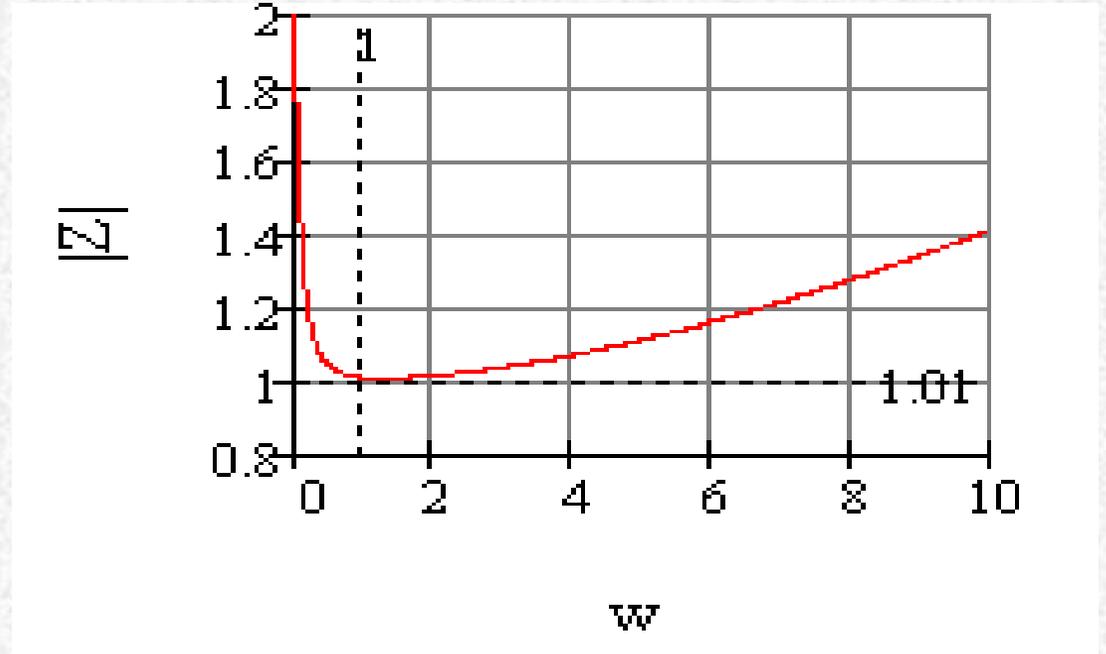
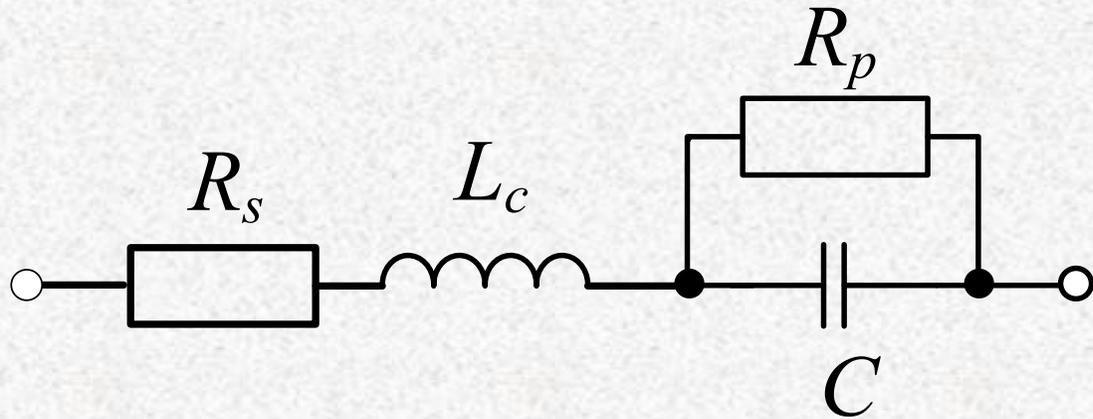
схемы замещения

Действующее значение индуктивности L_∂ (в предположении малых потерь)

$$L_\partial \approx \frac{L}{1 - (2\pi f)^2 \cdot (LC_L)} = \frac{L}{1 - (f / f_L)^2},$$

f_L - собственная частота катушки (SRF Self-Resonant Frequency) $f_L = 1 / (2\pi\sqrt{LC_L})$

Схемы замещения реального конденсатора (C)



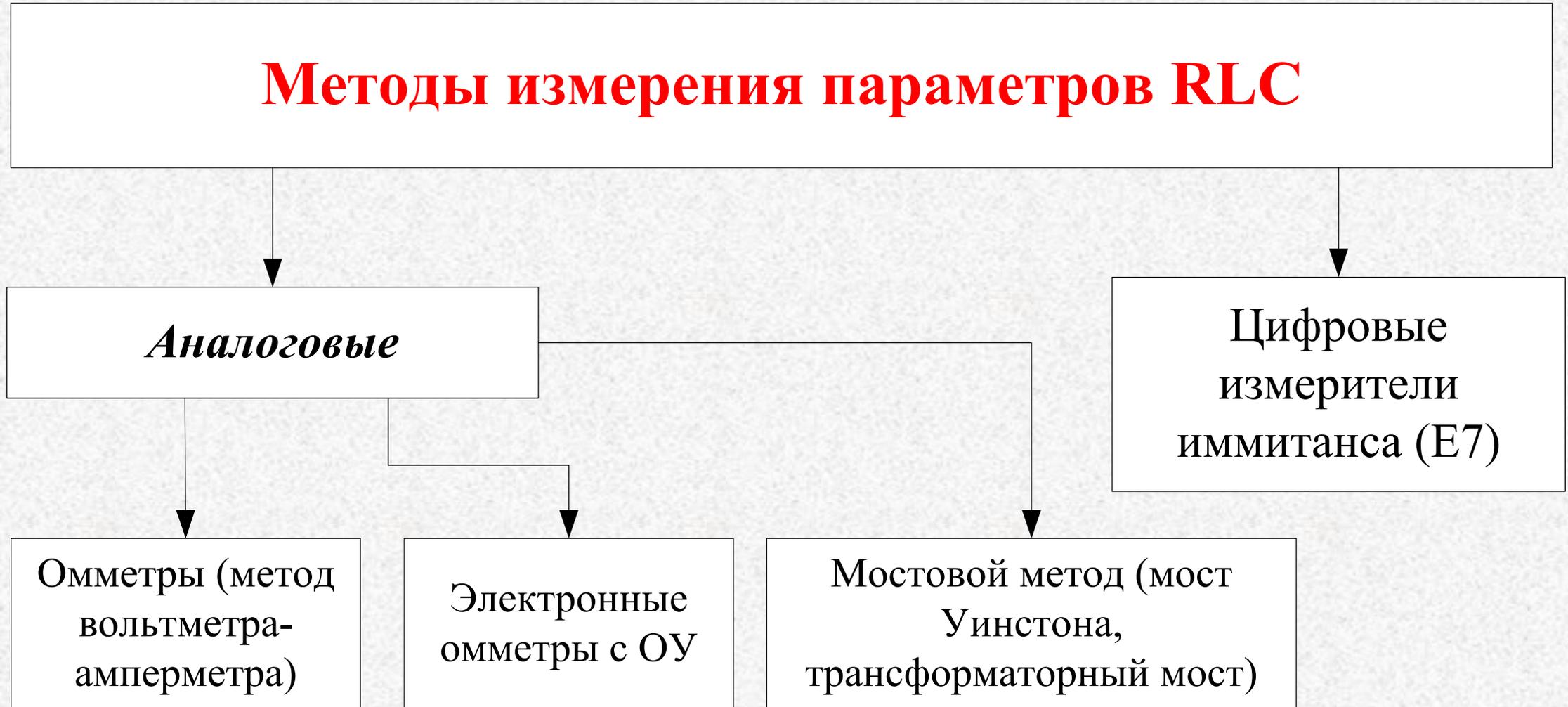
Основной параметр - емкость конденсатора C , паразитные – сопротивление утечки R_p для параллельной схемы и сопротивление потерь R_s для последовательной схемы. На высоких частотах надо учитывать индуктивность выводов конденсатора L_c .

Качество конденсаторов оценивают тангенсом угла потерь (фактором потерь) D ,

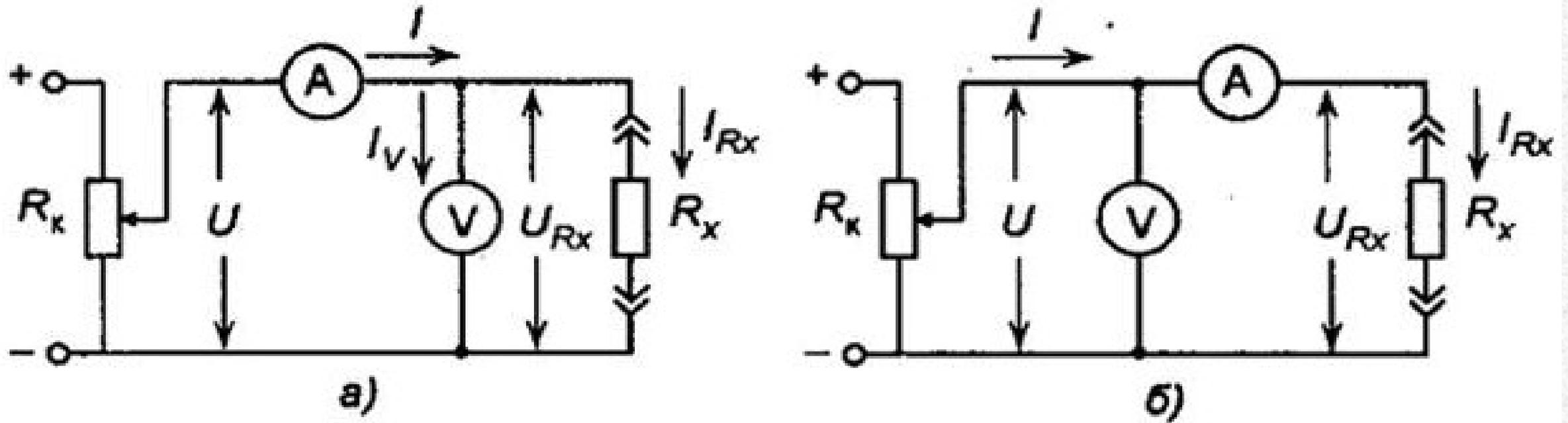
обратной добротности :

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{B} = \frac{1}{2\pi f C R_p}$$

Методы измерения параметров RLC



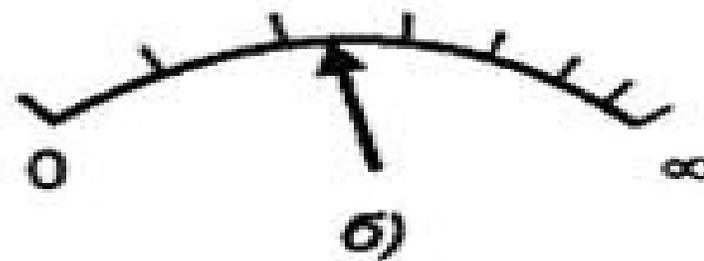
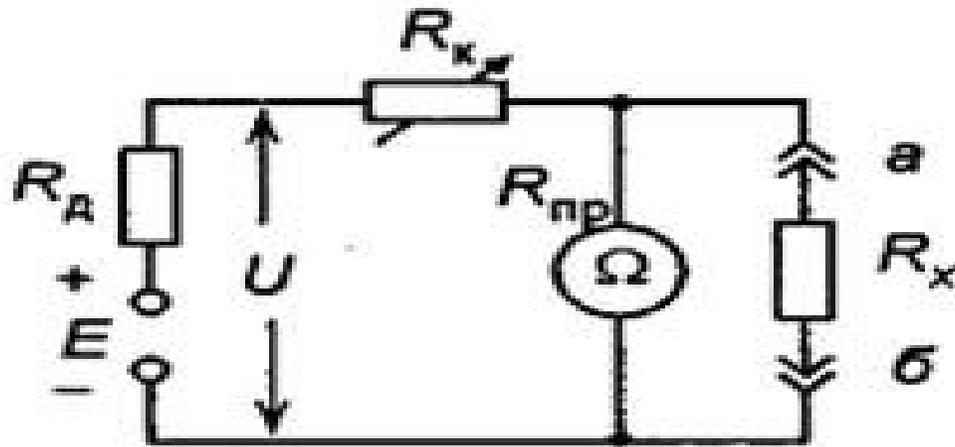
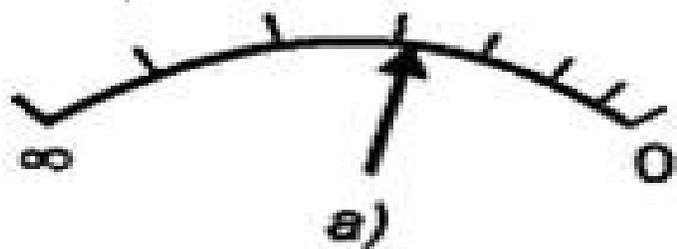
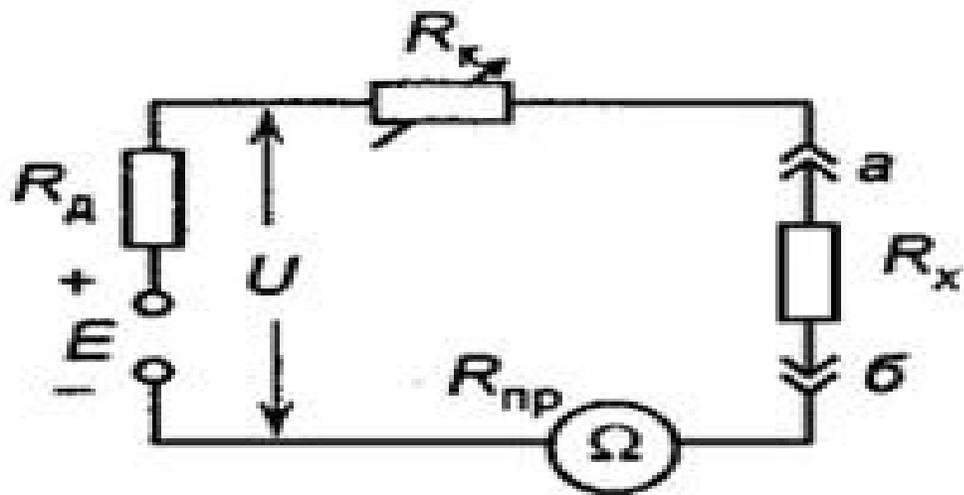
Метод вольтметра-амперметра для измерения активного сопротивления R



$$R_X = U_{RX} / I_{RX}$$

Принцип измерения - закон Ома. Сопротивление резистора равно отношению напряжения на нем к току через него. Две схемы – для минимизации влияния конечного сопротивления амперметра – для малых сопротивлений (а) и недостаточно большого входного сопротивления вольтметра- для больших сопротивлений (б)

Прямопоказывающий омметр для измерения активных сопротивлений



$$I_X = \frac{E}{R_x + R_k + R_D}$$

Использован один амперметр.
Шкала обратная, калибровка по нулевому резистору (к.з.)

$$U_X = \frac{E \cdot R_x}{R_x + R_k + R_D}$$

Использован один вольтметр. Шкала прямая, калибровка по бесконечному сопротивлению (х.х)

Омметр для измерения активных сопротивлений



Аналоговый омметр

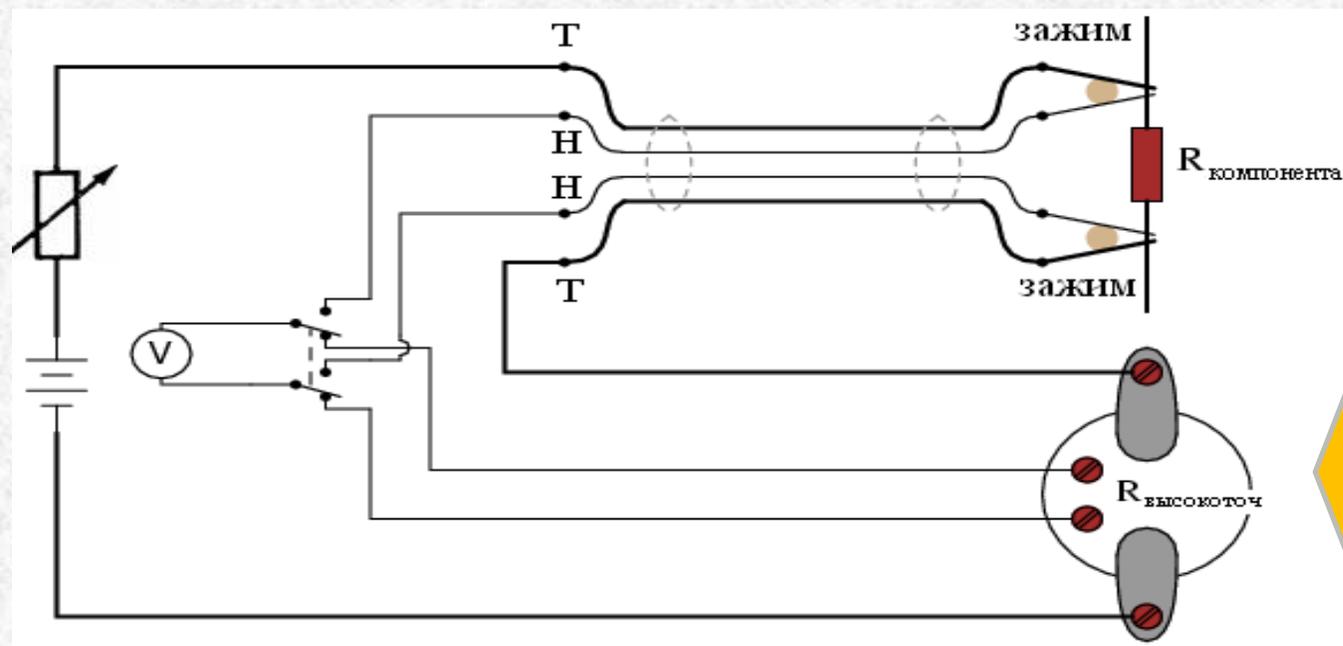


Мегаомметр для измерения сопротивления изоляции электрических цепей

Подключение вольтметра и амперметра 4-х точечным методом (метод Кельвина)

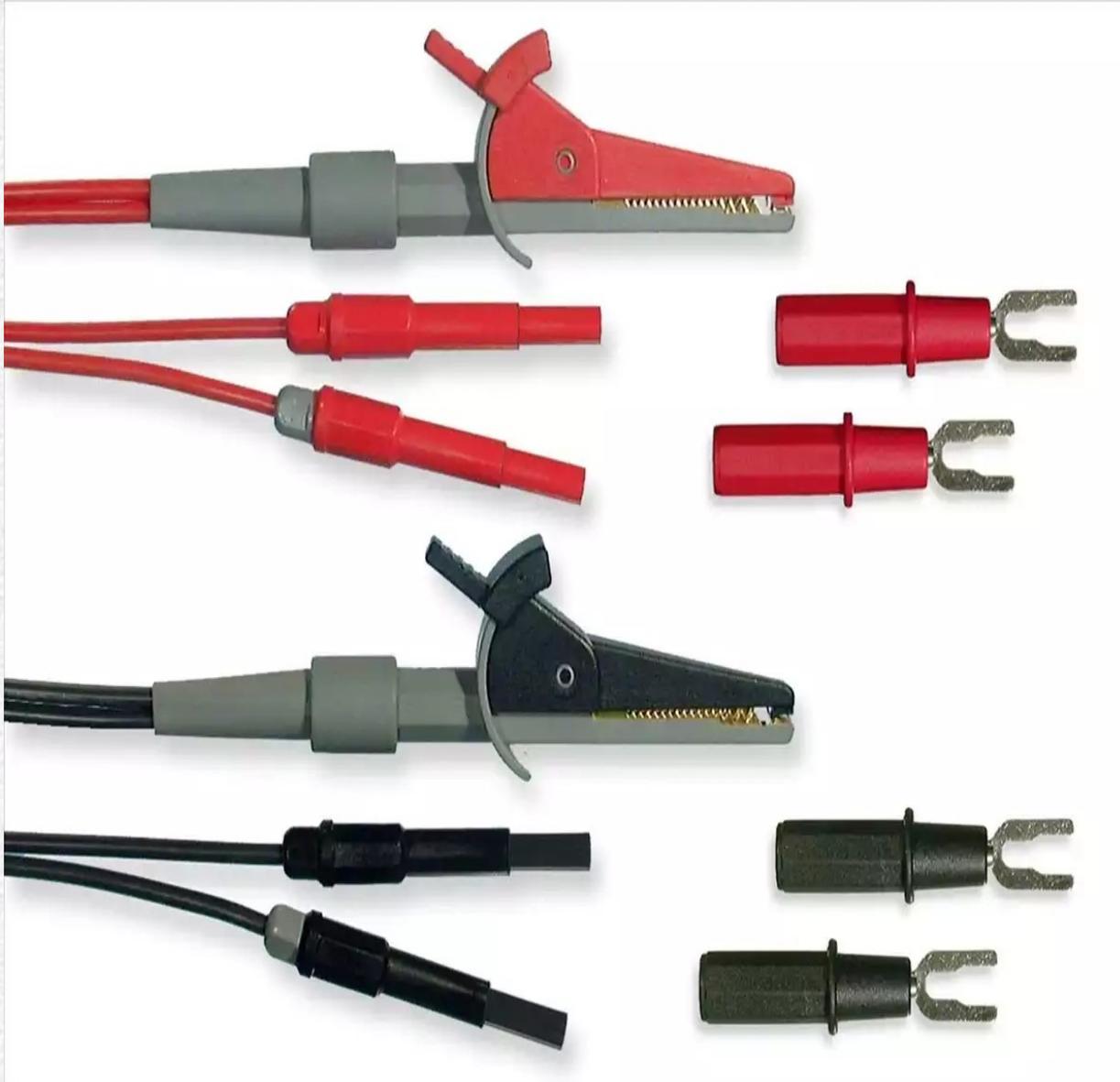


Не влияет
сопротивление
подводящих
проводов.

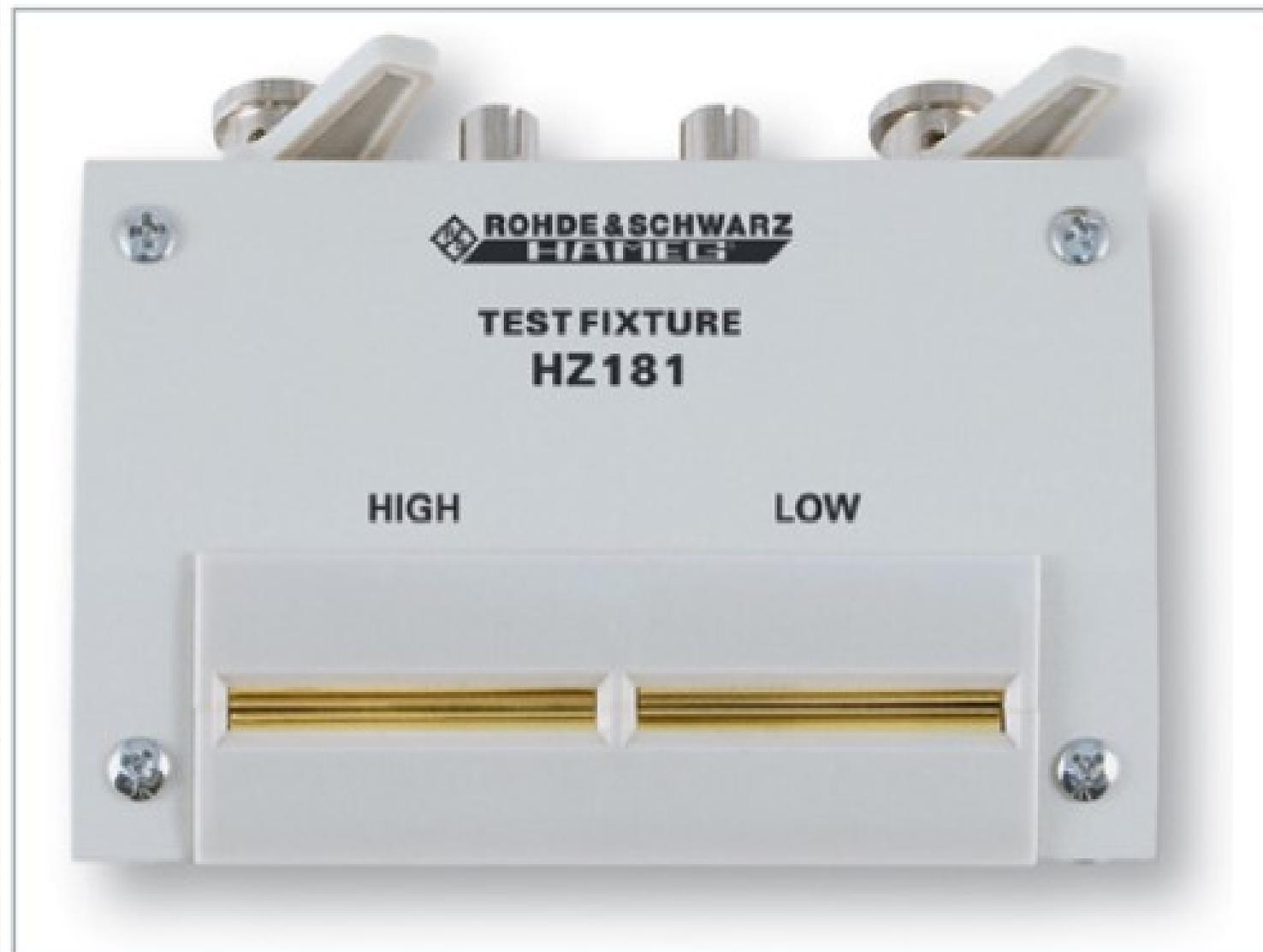


Замена амперметра на
вольтметр с доп.
резистором –
(«*токоизмерительный
шунт*»).

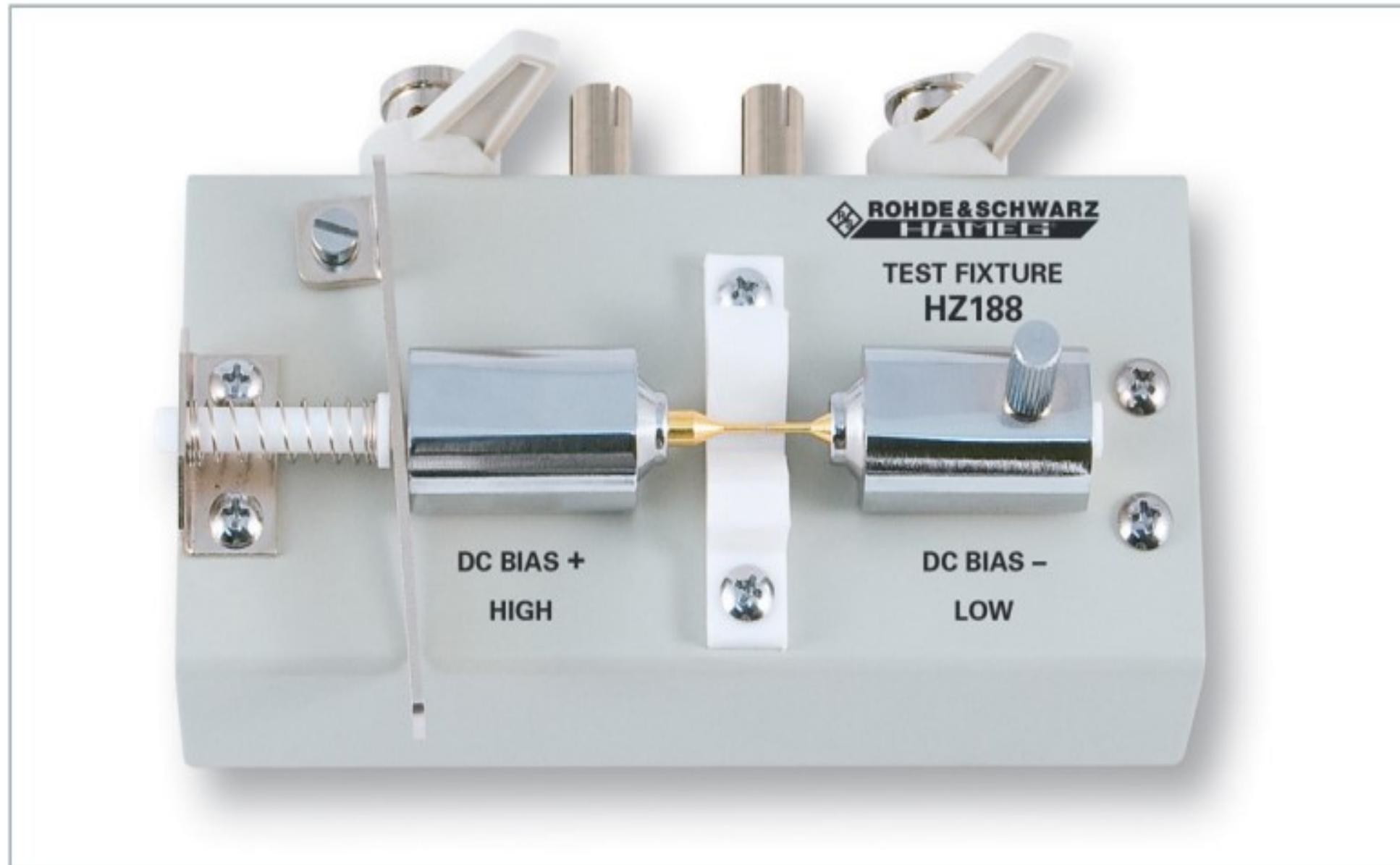
Соединительные провода для 4-проводного метода (разъемы Кельвина)



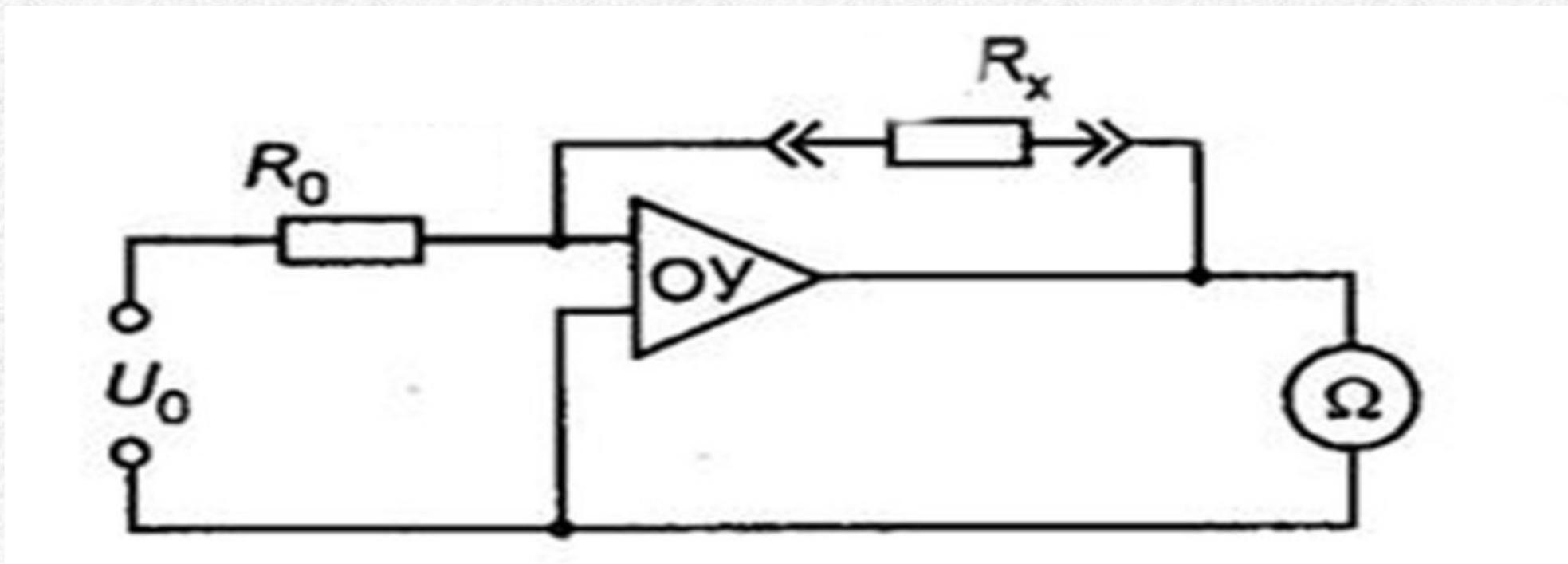
4-х проводный адаптер для подключения RLC компонентов с проволочными выводами



**Адаптер для подключения SMD компонентов -surface mounted device -
компоненты для поверхностного монтажа («чип-компоненты»)**



Электронный омметр с операционным усилителем



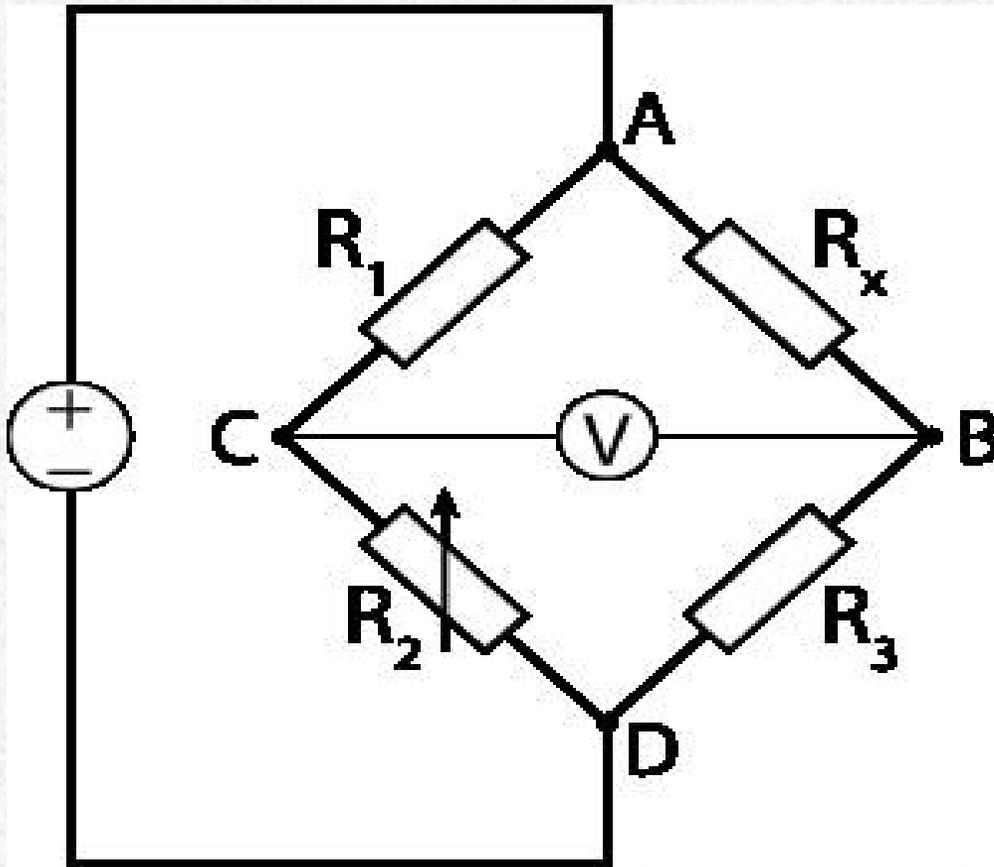
метод преобразования
сопротивления в напряжение

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{-R_X}{R_0} U_0 \text{ при } K_{\text{ОУ}} \gg 1$$

метод преобразования
проводимости в напряжение (R_0 и
 R_x меняются местами)

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{-G_X}{G_0} U_0$$

Четырехплечий мост (мост Уинстона) для комплексных сопротивлений



Условие
равновесия
моста

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

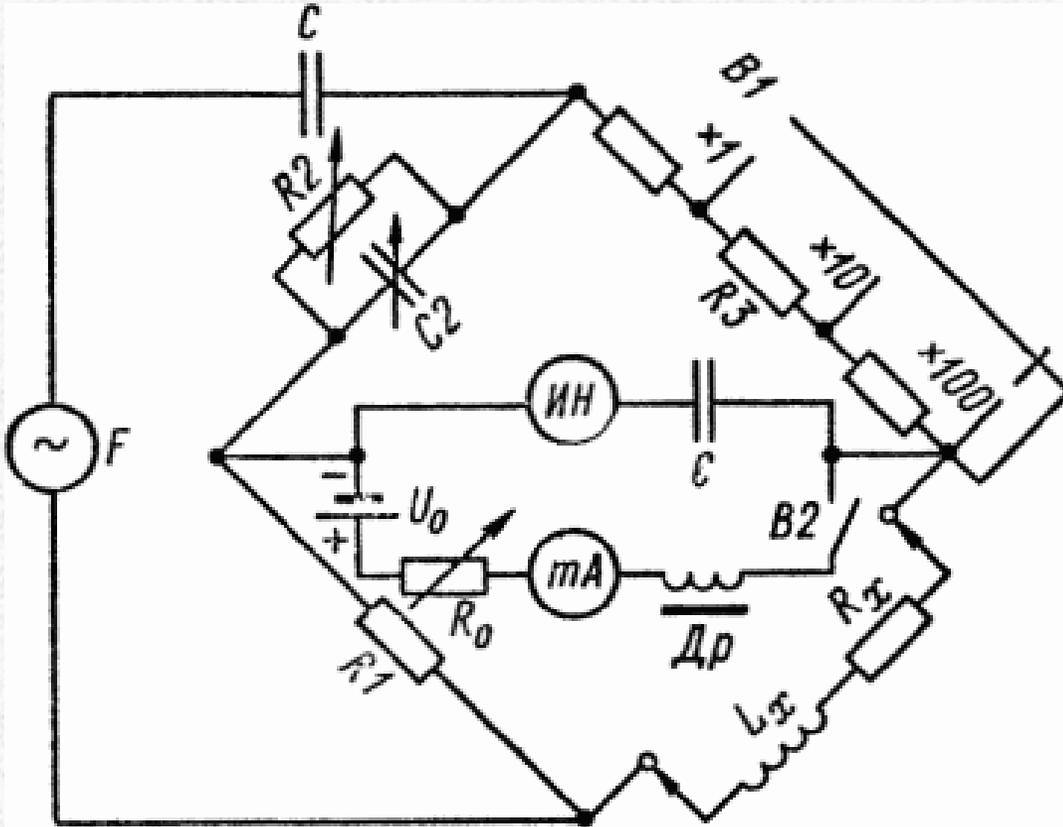
Условие равновесия
моста переменного тока
для комплексных
сопротивлений

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_x}{Z_3}$$

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_x|$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_x$$

Мостовой метод измерения индуктивностей



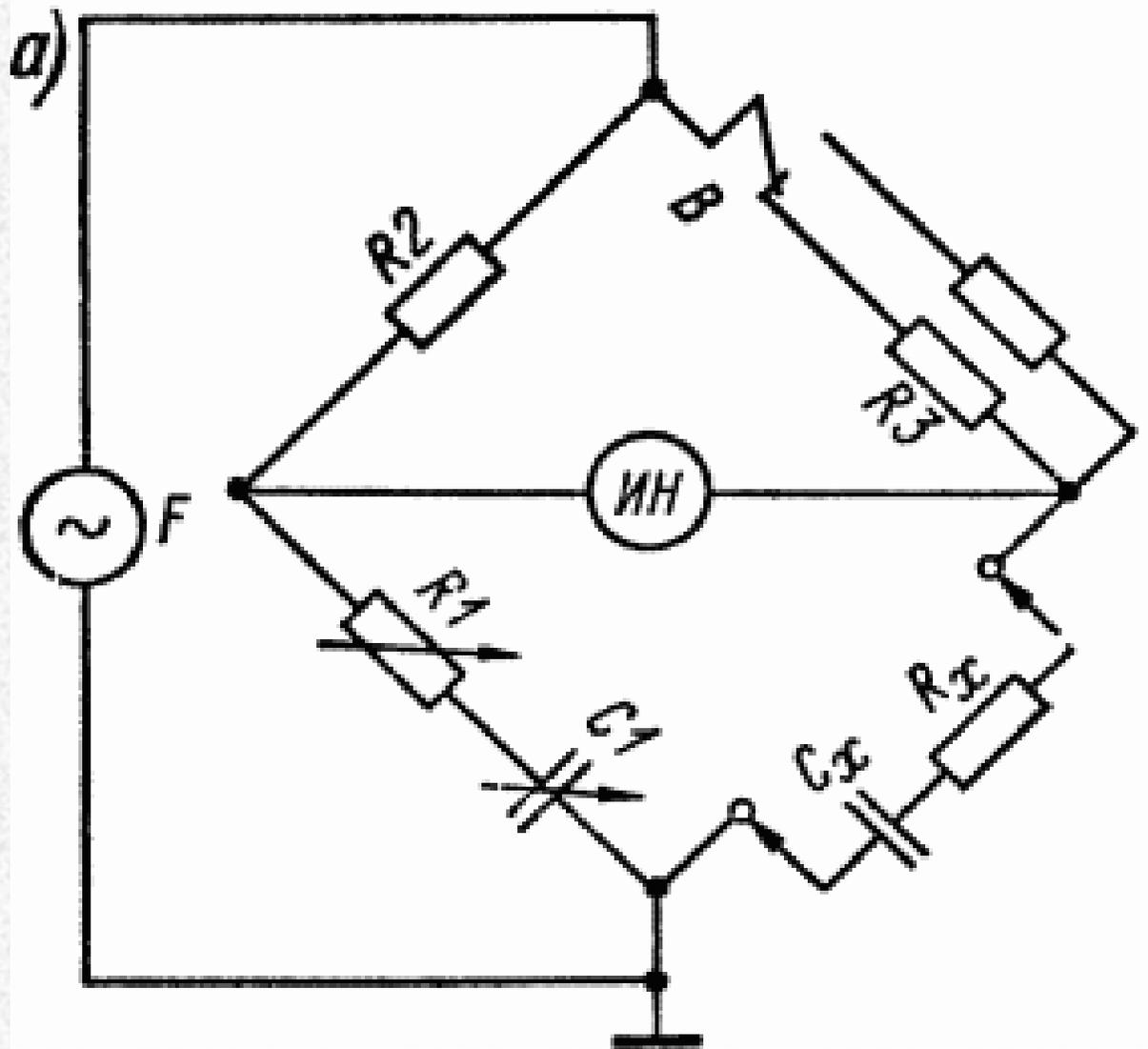
Условие равновесия моста

$$\frac{(R_x + i\omega L_x)}{\left(\frac{1}{R_2} + i\omega C_2\right)} = R_3 \cdot R_1$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

$$L_x = C_2 R_1 R_3$$

$$Q_x = \omega C_2 R_2$$



$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}$$

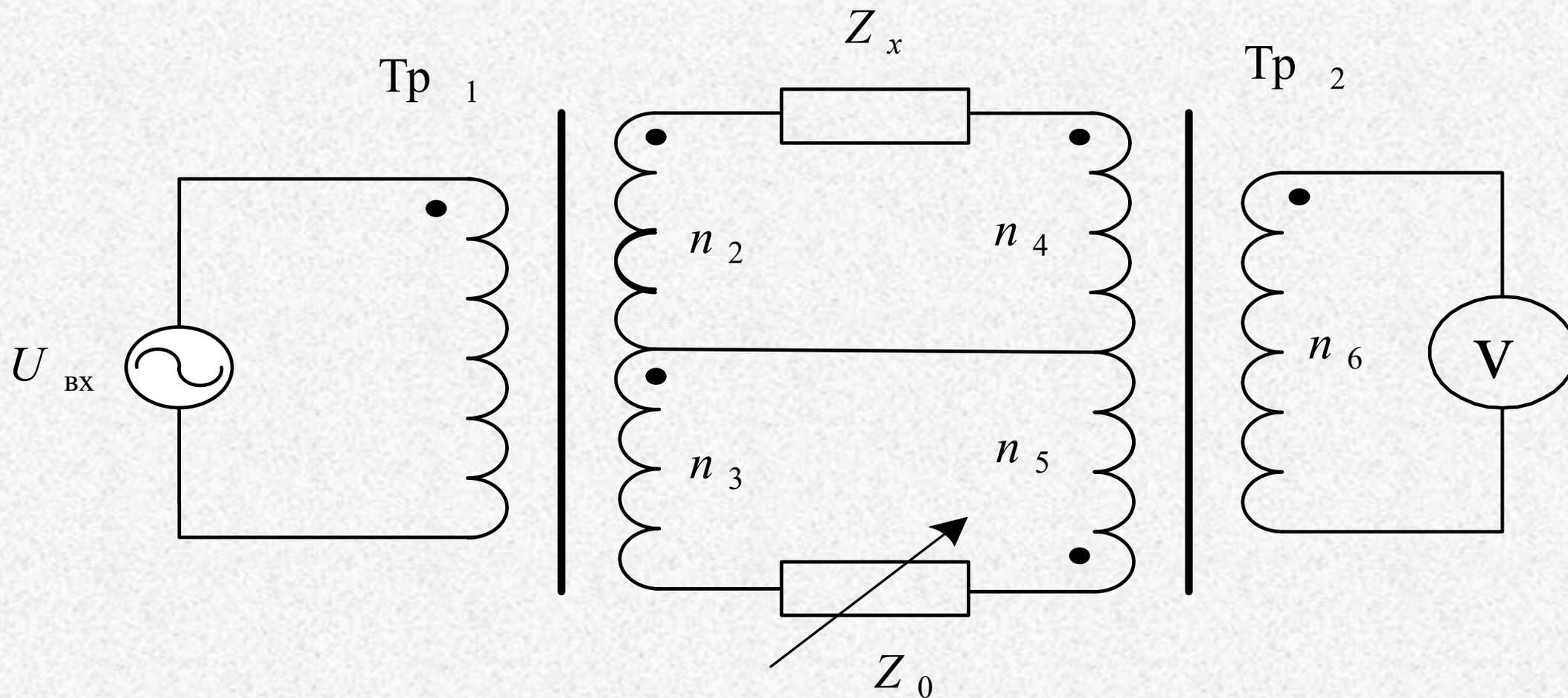
$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_1 R_1$$

Мостовой метод измерения емкости

Условие равновесия моста

$$\left(R_x + \frac{1}{i\omega C_x} \right) R_2 = \left(R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} \right) R_3$$

Трансформаторный мост для измерения RLC



Условие равновесия моста – нулевой магнитный поток в Tr_2

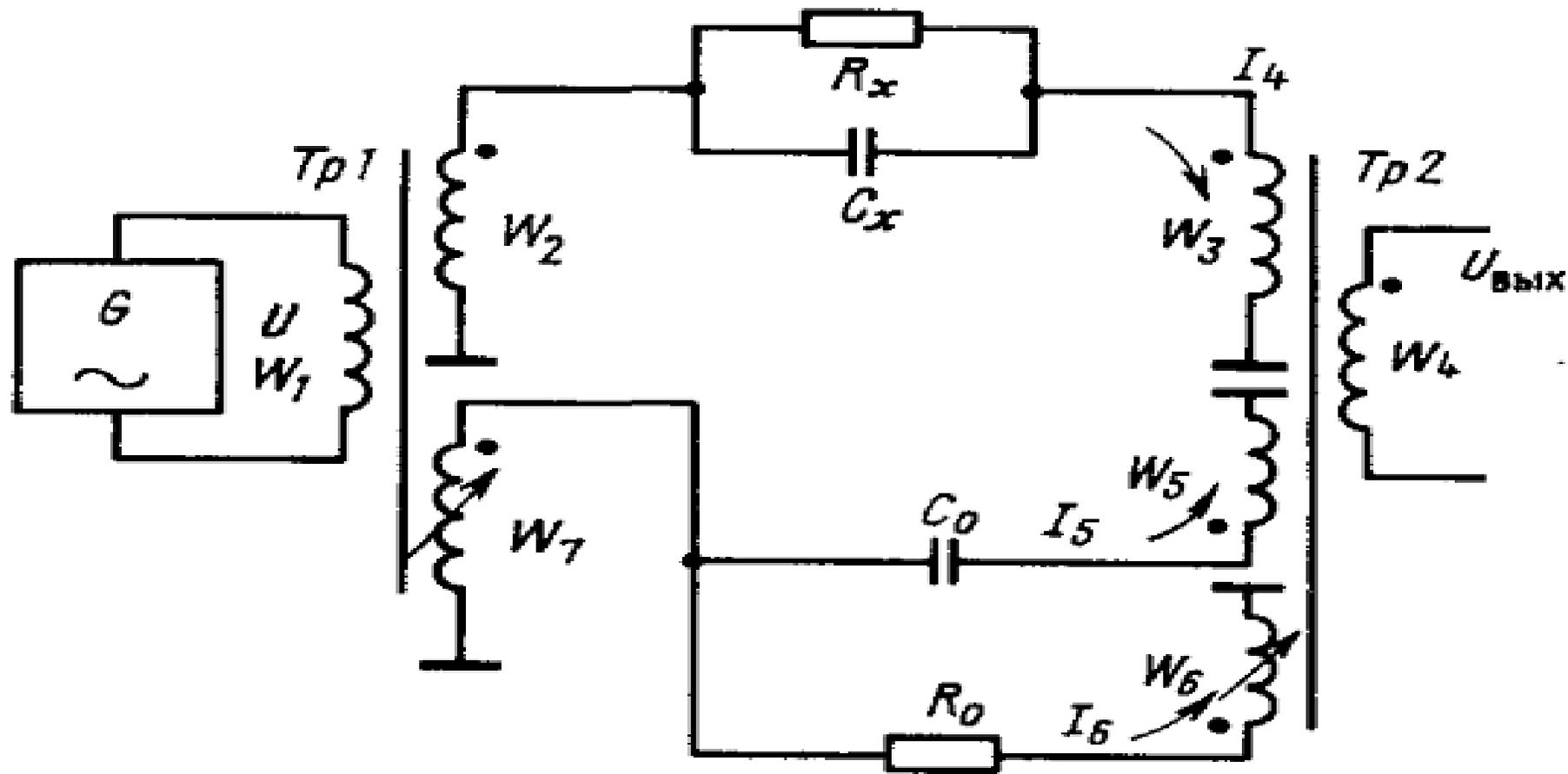


$$I_4 n_4 = I_5 n_5$$



$$Z_x = Z_0 \frac{n_2 n_4}{n_3 n_5}$$

Трансформаторный мост с фиксированными образцовыми элементами

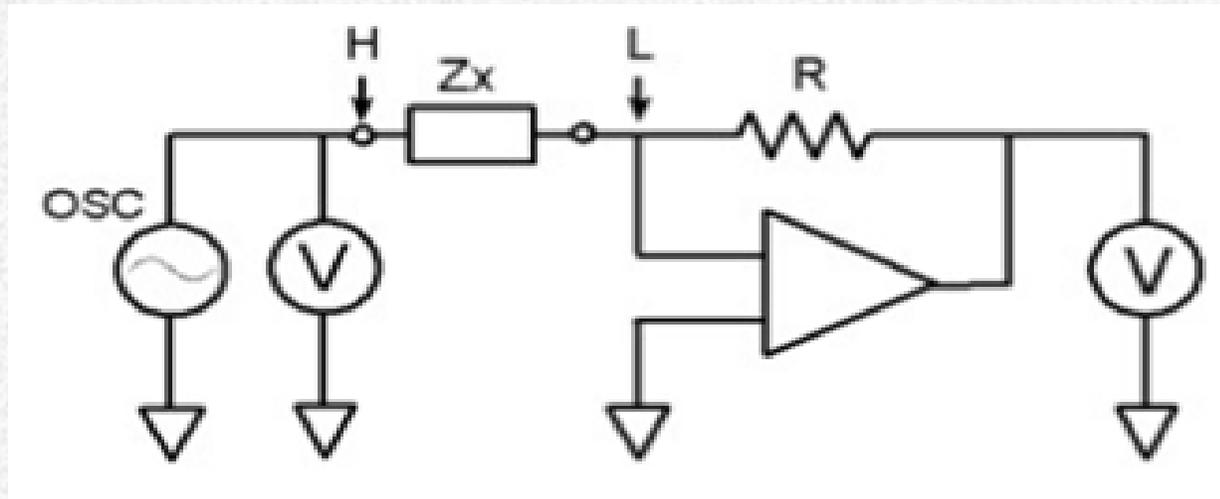


$$I_3 W_3 = I_5 W_5 + I_6 W_6 \quad \Rightarrow \quad R_x = R_0 \frac{W_2 W_3}{W_7 W_6} \quad C_x = C_0 \frac{W_7 W_5}{W_2 W_3}$$

Мостовые измерители RLC

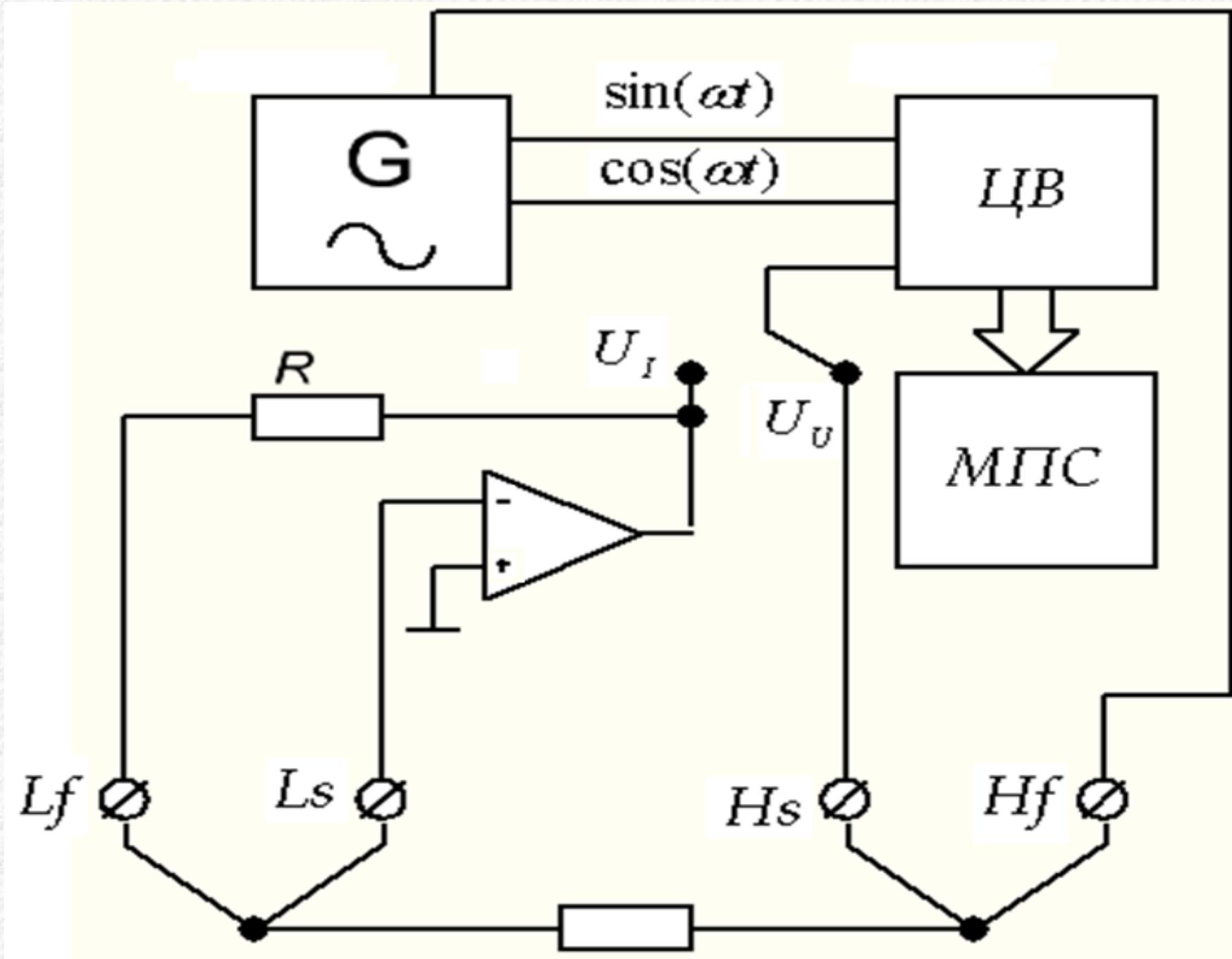


Метод преобразования импеданса в напряжение

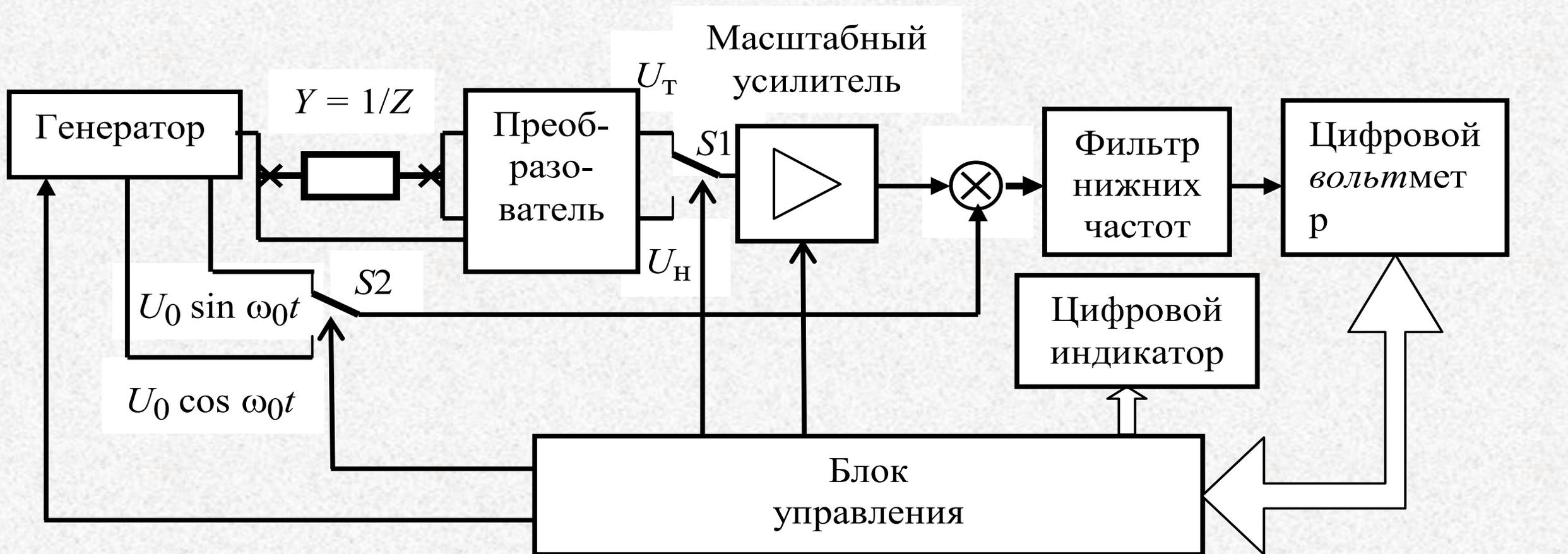


Комплексную амплитуду напряжения \dot{U}_U на входном зажиме, обозначенном H, измеряют *векторным вольтметром*. Ток через элемент поступает на вход операционного усилителя в точку низкого потенциала, обозначенную L. Выходное напряжение равно отношению сопротивлений R/Z_x и пропорционально току через исследуемый элемент. Его комплексную амплитуду \dot{U}_I измеряют вторым вольтметром. Отношение двух напряжений дает величину искомого импеданса: $\Rightarrow Z_x = R \frac{U_U}{\dot{U}_I}$

Микропроцессорный
измеритель
импеданса с 4-х
проводным
методом
подключения



Структурная схема измерителя иммитанса Е7-15



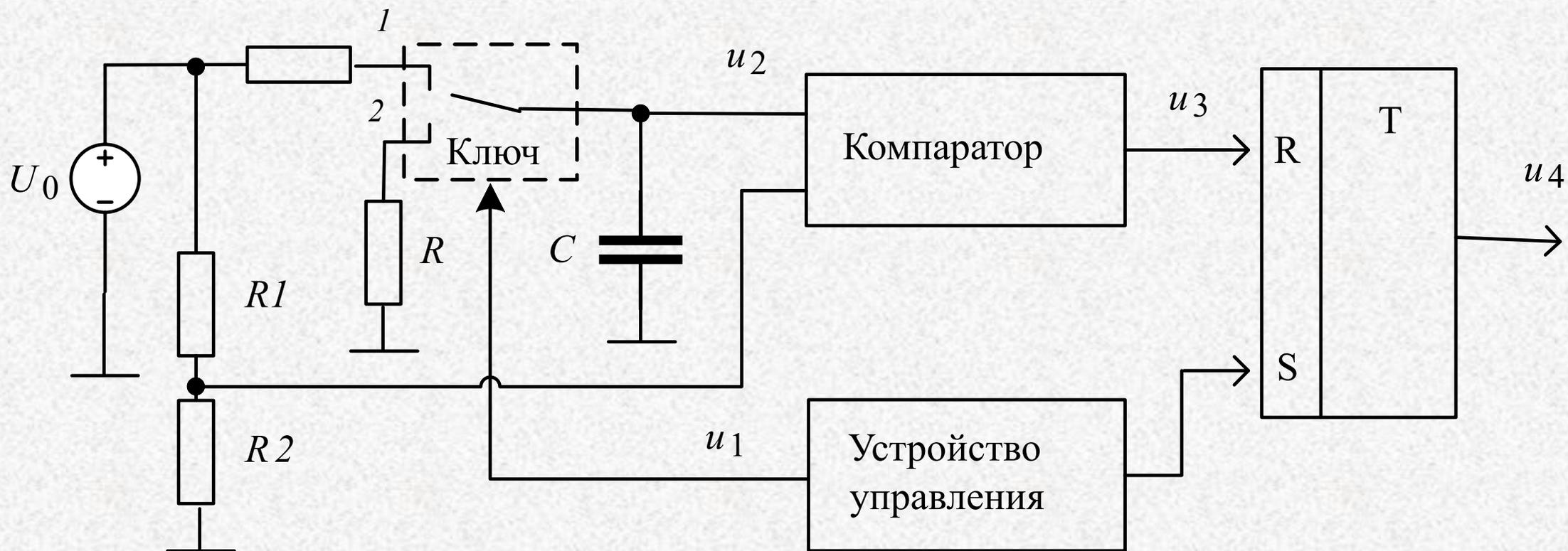
$$Y = G + jB = \frac{I}{U} = k_Y \frac{U_T}{U_H} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}$$

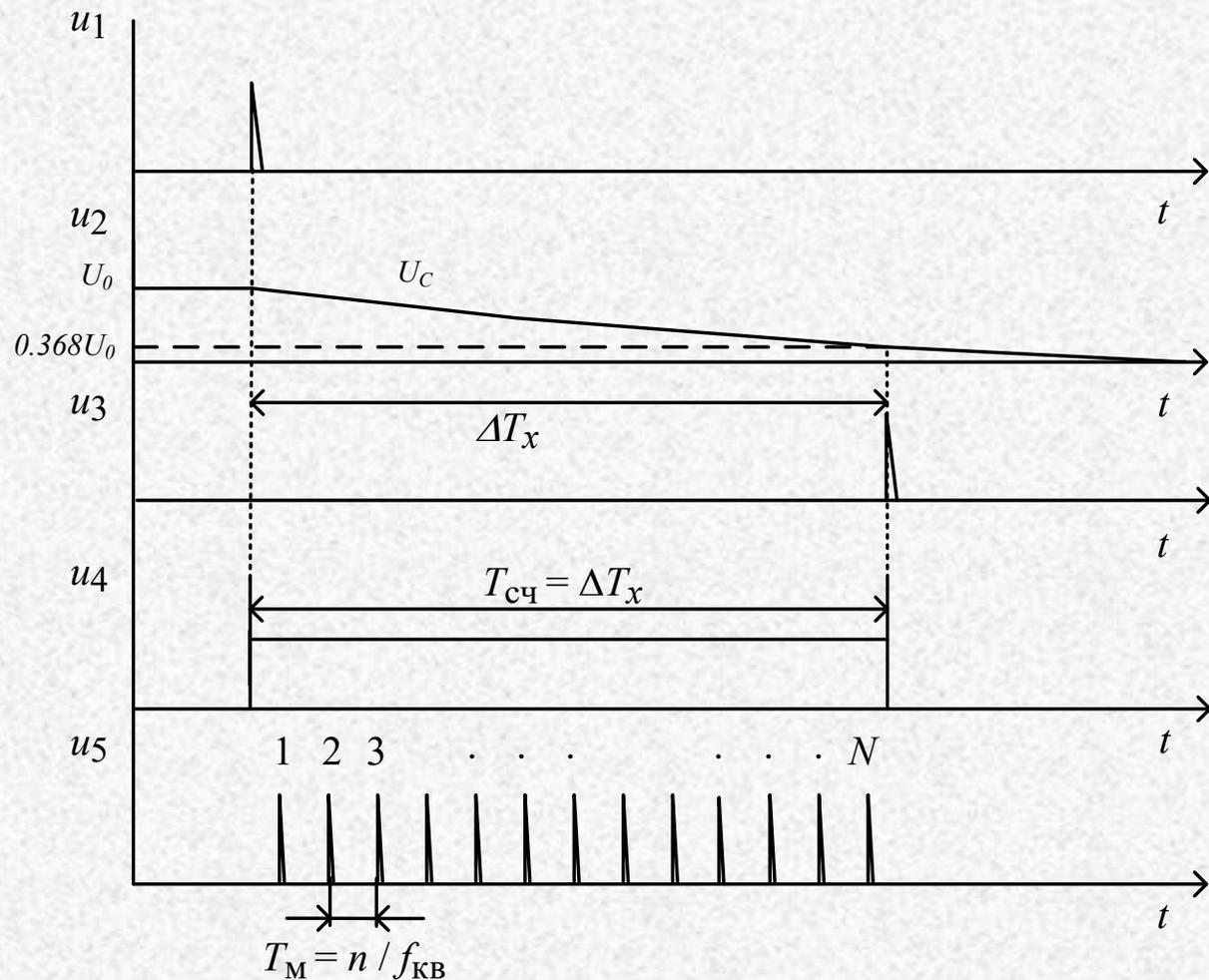
$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \cdot U_0 \cos(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \sin \varphi + \frac{U_0}{2} U_m \sin(2\omega_0 t + \varphi)$$

$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \cdot U_0 \sin(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \cos \varphi - \frac{U_0}{2} U_m \cos(2\omega_0 t + \varphi)$$

Преобразование C , R во временной интервал (метод заряда-разряда конденсатора)

В основу метода положено измерение постоянной времени цепи разряда конденсатора через резистор. При измерении емкости конденсатора вместо R включается образцовый резистор R_0 , а вместо C — конденсатор, емкость которого необходимо измерить. Для измерения сопротивления - наоборот





$$u_c(t) = U_0 \exp\left(\frac{-t}{RC_x}\right)$$

$$\Delta T_x = RC_x \approx N \cdot T_M \quad C_x = \frac{N \cdot T_M}{R}$$

В исходном положении ключ находится в положении 1 и конденсатор С заряжается до напряжения U_0 .

Импульсом u_1 управляющего устройства ключ переходит в положение 2 и начинается разряд С через R, одновременно триггер устанавливается в единицу (u_4)

На вход электронного счетчика начинают поступать импульсы меток времени от кварцевого генератора. На входы компаратора подают напряжение с конденсатора U_c , убывающее с постоянной времени RC и напряжение $U'2$ с делителя R1R2.

При их равенстве компаратор выдает импульс u_3 , которым триггер сбрасывается и счет импульсов прекратится на N-ном импульсе..

Погрешности обусловлены неточностью меток времени T_M , нестабильностью образцового резистора R, колебаниями порогового уровня запуска компаратора и погрешностью дискретности.



NTSO.RU





Цифровой
измеритель
иммитанса
E7-14



Микропроцессорный
измеритель
иммитанса R&S
HMS118



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

<http://kepstr.eltech.ru/tor/mri>

А.А. Данилин

«Основы метрологии и радиоизмерений»
(электронный конспект лекций)

Измерение АЧХ

Санкт-Петербург
2024 г.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**



*Кафедра Теоретических
основ радиотехники*



Частотные характеристики цепей и устройств

Комплексный коэффициент передачи связывает комплексные амплитуды гармонического воздействия на входе и реакцию цепи на выходе.

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \exp(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) - зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты.

Ослабление (потери), дБ,

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}} \right) = -20 \lg (|K(j\omega)|)$$

Коэффициент усиления по мощности, дБ

$$K_p = 10 \lg (P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}) = -A$$

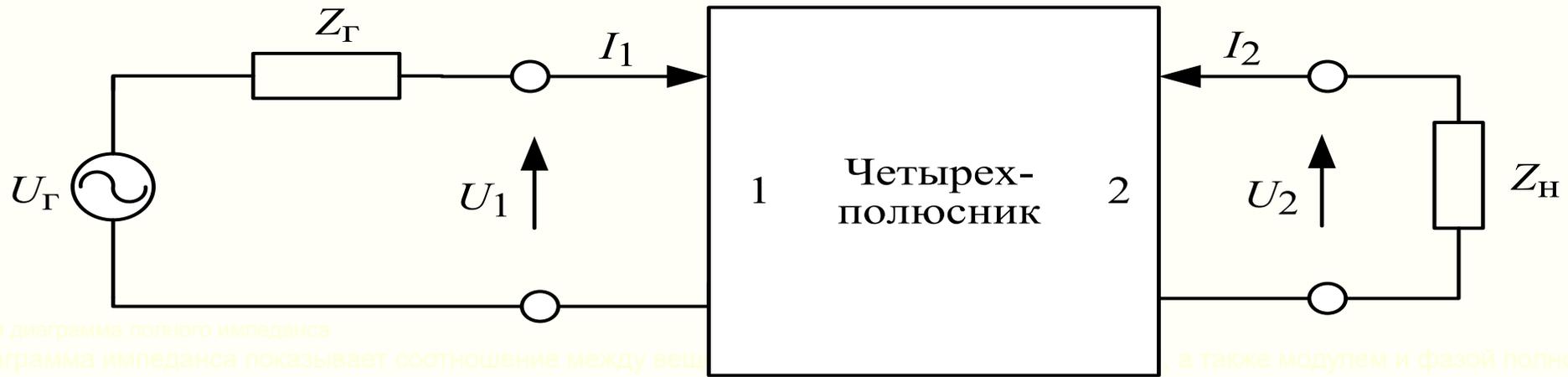
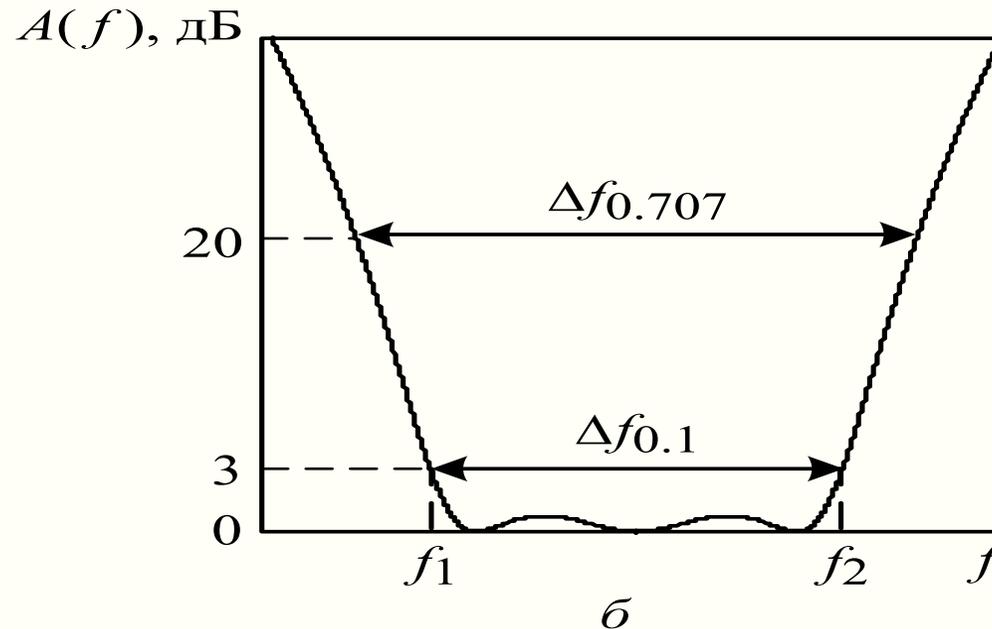
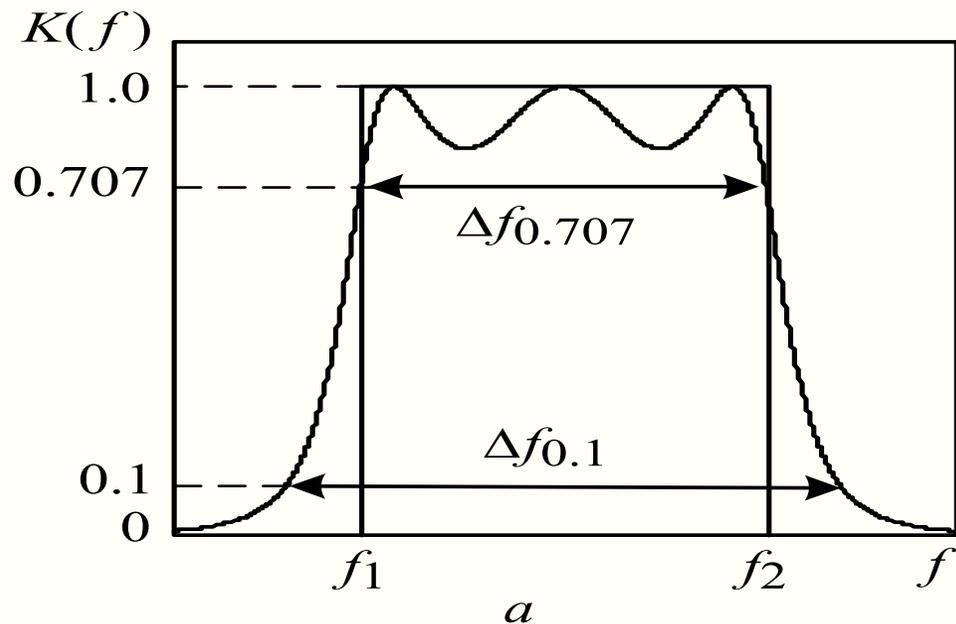


Рис. 1. Векторная диаграмма полного импеданса. Векторная диаграмма импеданса показывает соотношение между вещественной и мнимой частями импеданса, а также модулем и фазой полного сопротивления.

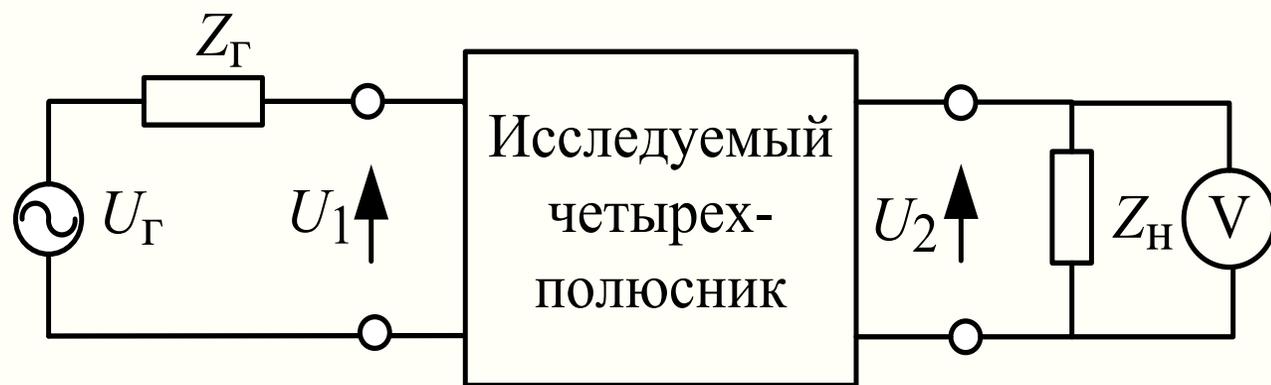
Схема включения четырехполюсника в схему измерения АЧХ



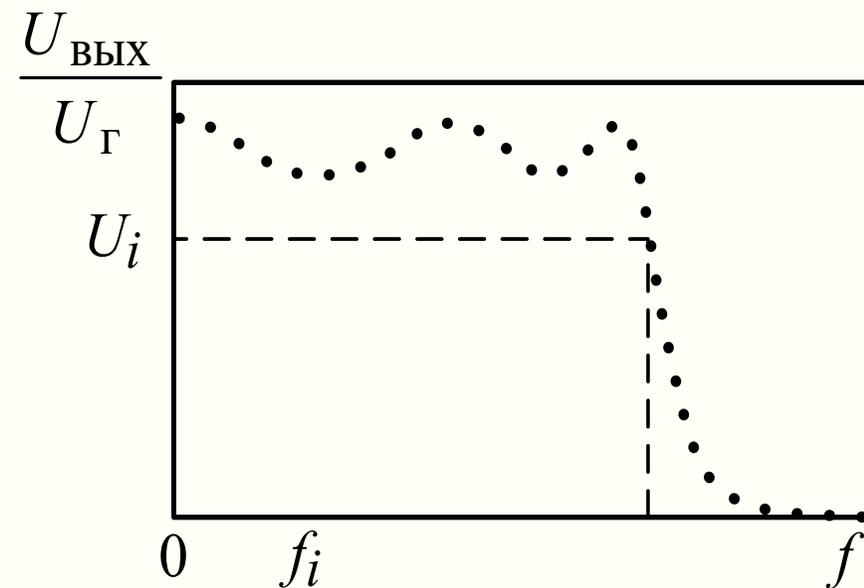
Типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра

Измерение АЧХ в дискретных точках

Генератор последовательно настраивают на ряд выбранных частот, амплитуду $U_2 = U_{\text{ВЫХ}}$ измеряют на заданном сопротивлении нагрузки $Z_{\text{Н}}$. Амплитуду генератора $U_{\text{Г}}$ поддерживают постоянной. Зависимость отношения амплитуд от частоты $U_{\text{ВЫХ}}(f) / U_{\text{Г}}$, построенная по результатам измерений с *интерполяцией* промежуточных точек, представляет собой АЧХ исследуемой цепи



a

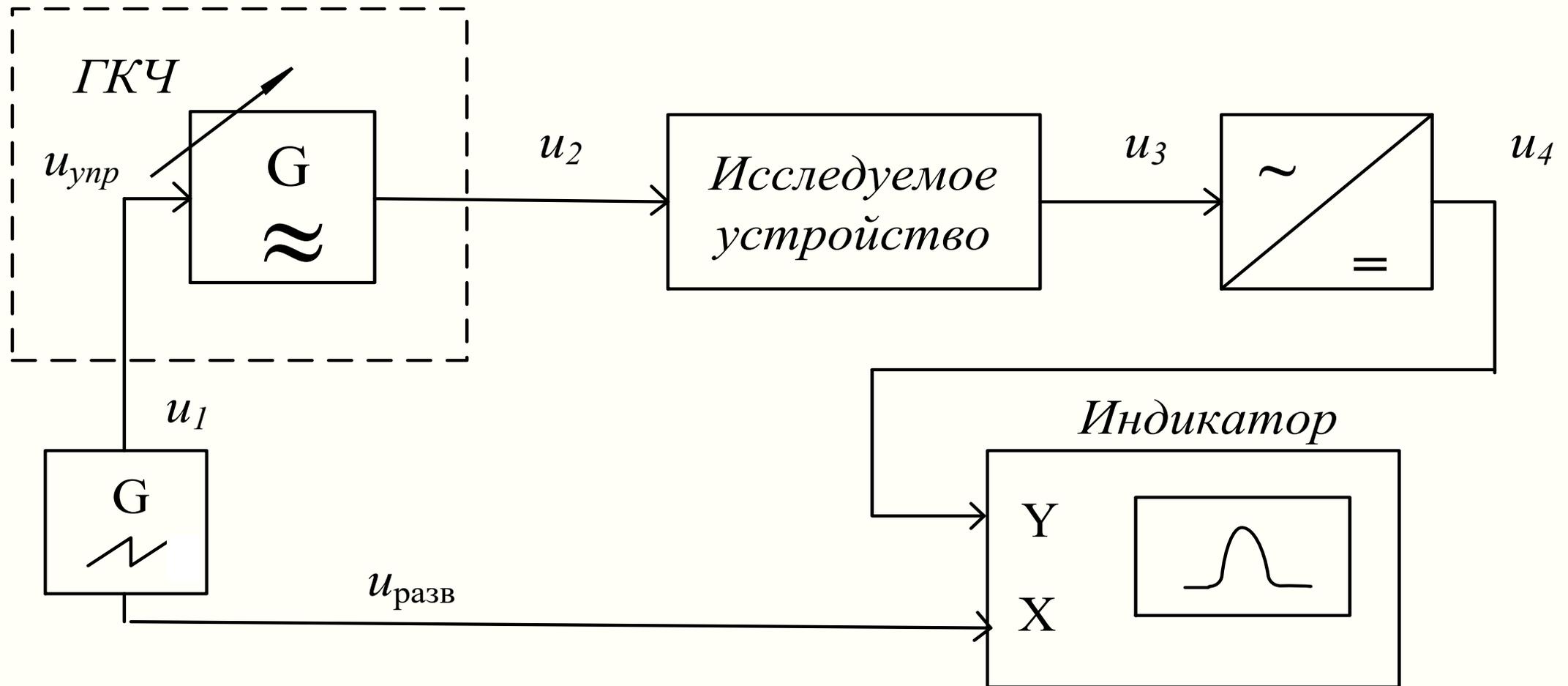


б

Погрешности измерения АЧХ «по точкам»

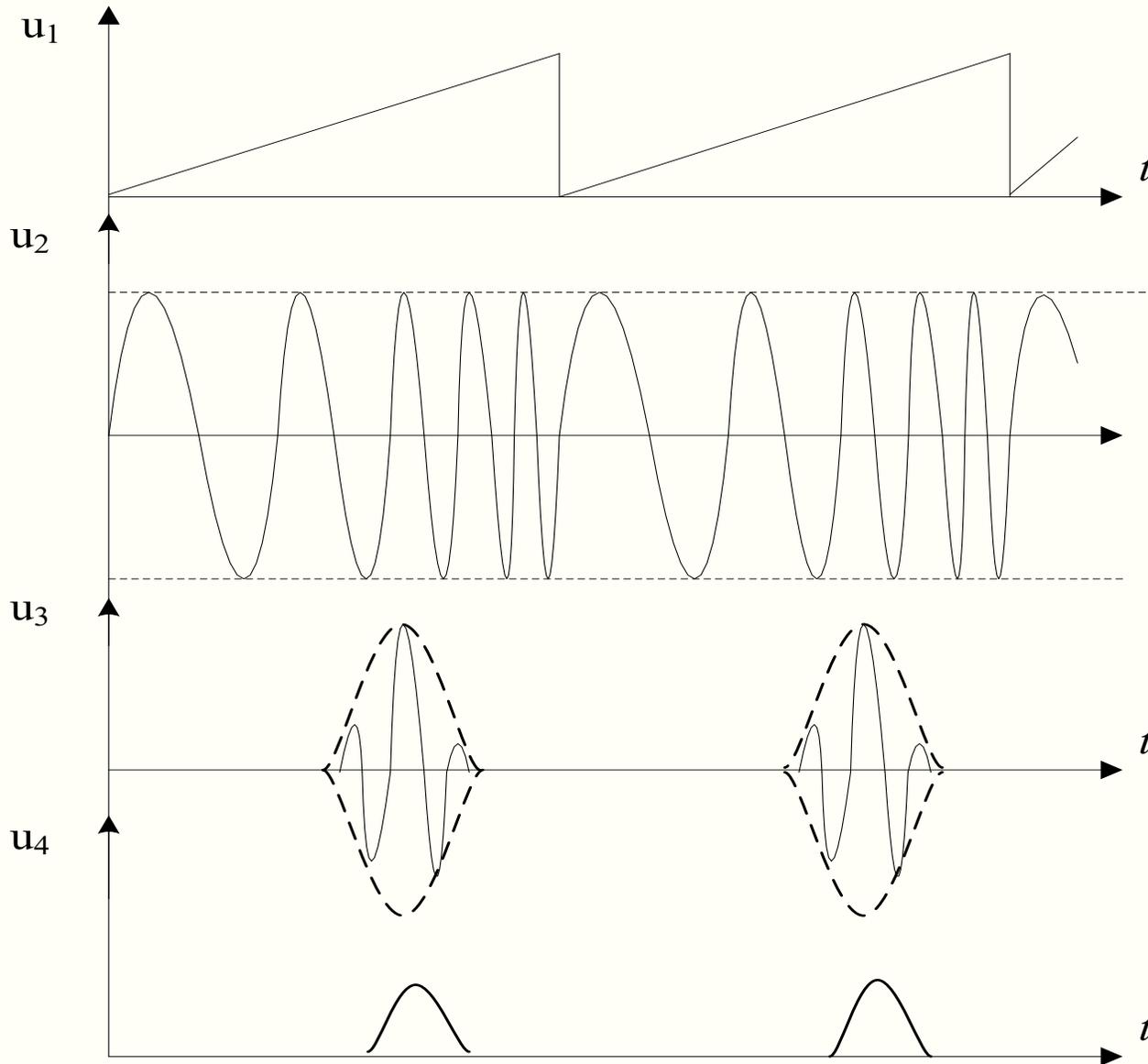
- погрешность установки частоты генератора;
- погрешность установки (или измерения) амплитуды напряжения на выходе генератора и ее нестабильность в процессе измерения АЧХ;
- погрешность вольтметра, измеряющего напряжение на выходе цепи;
- влияние входного импеданса вольтметра на выходное напряжение цепи;
- погрешность интерполяции кривой АЧХ между измеренными точками.
- Погрешность установки заданного внутреннего сопротивления генератора (при измерениях с одним вольтметром).

Панорамный метод измерения АЧХ



Приборы, реализующие панорамный метод, называют **измерителями АЧХ** (группа Х1 по ГОСТ).

Осциллограммы сигналов в панорамном измерителе АЧХ



напряжение развертки



ЛЧМ сигнал на выходе ГКЧ



- осциллограмма выходного сигнала



- огибающая (сигнал с выхода детектора)

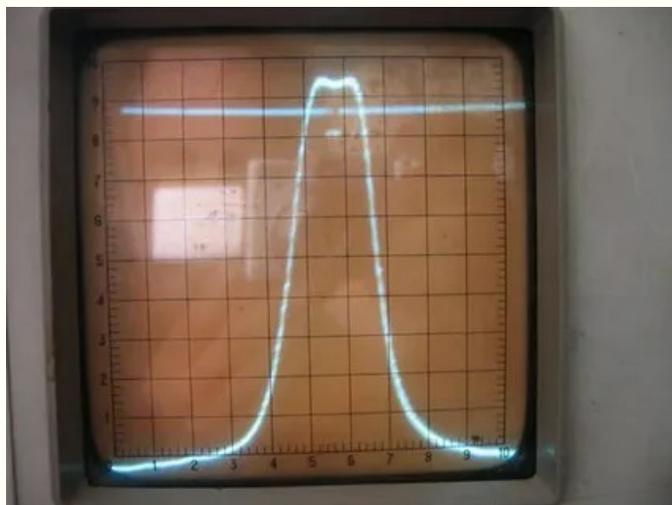
Условия неискаженного воспроизведения формы АЧХ на экране измерителя:

- Линейность закона частотной модуляции (зависимости частоты от управляющего напряжения) определяет равномерность оси частот на индикаторе.
- Линейность детектора. Она обеспечивает постоянство коэффициента отклонения луча по вертикали экрана.
- Постоянство амплитуды ГКЧ в диапазоне качания частоты. Зависимость выходной амплитуды ГКЧ от частоты называют *собственной АЧХ* измерителя. Ее определяют при прямом соединении выхода ГКЧ с входом индикаторного блока при калибровке прибора..
- Минимальные динамические искажения изображения АЧХ.

Аналоговые измерители АЧХ панорамного типа



X1-42



X1-47



АКПП-4601

*СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!*

