СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

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

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Часть 1

Санкт-Петербург
2026 г.

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/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Введение

Санкт-Петербург
2025 г.

" Приборы и техника радиоизмерений "

Дисциплина для студентов ФРТ, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров:

- **11.03.01 "Радиотехника";**
- **11.03.02 - "Инфокоммуникационные технологии и системы связи";**

и специалистов:

11.05.01 (210601.65) - "Радиоэлектронные системы и комплексы«.

Читается на 4 курсе (7 семестр) и включат в себя:

- **36 лекционных часов (1 лекция в неделю, экзамен) ;**
- **36 часов лабораторных работ (1 лаборатория в неделю, зачет -допуск к экзамену) ;**
- **экзамен.**

Ведущие преподаватели:

доцент каф. ТОР, к.т.н., Данилин Александр Алексеевич

ст. преподаватель каф. ТОР, Москалец Дмитрий Олегович.

Список лабораторных работ по ПТРИ:

1. **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА**
2. **ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ С ЦИФРОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ БЛОКОМ:**
3. **ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА КОЛЕБНИЙ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА:**
4. **ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ**
5. **ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ:**
6. **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК RLC-КОМПОНЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ:**
7. **ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ:**
8. **ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА Rohde & Schwarz FPC100 :**
9. **ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ АКИП -4106 :**
10. **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ:**
11. **ПРИБОРНЫЙ ИНТЕРФЕЙС GPIB**

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

Основная литература-1



Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике/Учеб пособие. – СПб.: Издательство Лань, 2017. - 408с.



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)

Основная литература-2



Приборы и техника радиоизмерений : лаб. практикум / С. А. Баруздин, А. А. Данилин, Д. О. Москалец ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ". - СПб. : Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. - 103 с. (шифр библиотеки ЛЭТИ З 22/Б26)



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)

Основная литература-3



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



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



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

Дополнительная литература

1.Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб.пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с
2.Измерения в электронике. Справочник /Под ред. В.А. Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512с.
3.Афонский А. А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: СОЛОН_ПРЕСС, 2007.- 544с.
4.Афонский А. А., Дьяконов В.П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике/Под ред. Проф. В.П.Дьяконова. М.: ДМК Пресс, 2011.-688с.
5.Афонский А. А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. – М.: СОЛОН_ПРЕСС, 2009- 248с.
6.Дьяконов В.П. Современные измерительные генераторы сигналов – М.: ДМК Пресс, 2011.-384с.
7.Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений : Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.
8.Приборно-модульные универсальные автоматизированные измерительные системы: Справочник/ Под ред. В.А.Кузнецова. - М.: Радио и связь, 1993. - 304с.

Интернет-ресурсы

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

http://www.tor.eltech.ru:8000/edu/bachelor/ptri

Экзаменационные вопросы по ПТРИ 2024-25 уч. г.

1. Микропроцессорные средства измерения

1. Микропроцессорные измерительные приборы, их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными аналоговыми и цифровыми средствами измерения.
2. Основные направления использования микропроцессоров в измерительной технике. Компьютерные измерительные устройства, область их применения. Виртуальные измерительные приборы,их программирование

2. Осциллографические измерения

3. Структурная схема аналогового универсального осциллографа. (Канал Y). Двухканальные и двухлучевые ЭЛО.
4. Структурная схема аналогового универсального осциллографа. (Канал X). Режимы работы развертки и синхронизации.
5. Метод калиброванных шкал и компенсационный метод измерения напряжения с помощью осциллографа.
6. Двойная развертка осциллографа, ее использование для измерения временных интервалов компенсационным методом .
7. Осциллографический метод измерения напряжения и временных интервалов путем сравнения с эталоном (метод электронных меток). Аналоговый осциллограф с цифровым измерительным блоком

Экзаменационные вопросы -2

8. Цифровой осциллограф , принцип действия, структурная схема, режимы построения осциллограмм.
9. Режимы развертки и синхронизации (запуска) цифрового осциллографа
10. Особенности оперативной памяти цифрового осциллографа, режимы запоминания, предзапуска и послезапуска.

3. Анализаторы спектра

11. Общие вопросы анализа спектров. Классификация методов спектрального анализа. Параллельный анализатор спектра. Вычислительный анализатор спектра.
12. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа.
13. Условия неискаженного воспроизведения спектрограммы анализатором последовательного типа, причины искажения спектрограмм.
14. Методы измерения амплитуд и частот гармоник на экране анализатора спектра последовательного типа. Области использования стандартных анализаторов спектра.
15. Основные параметры анализатора спектра последовательного типа. Разрешающая способность анализатора спектра. Динамическая разрешающая способность
16. Цифровой анализатор спектра, структурная схема, режимы его работы
17. Измерение коэффициента гармоник и коэффициента нелинейных искажений. Аналоговые и цифровые ИНИ.

Экзаменационные вопросы -3

4. **Измерение параметров радиосигналов**

18. Классификация методов измерения параметров радиосигналов. Методы измерения коэффициента амплитудной модуляции и девиации частоты. Модулометры и девиометры.
19. Цифровые вольтметры, структурная схема и параметры, основные узлы и принципы их работы.
20. Цифровой вольтметр время – импульсного преобразования.
21. Цифровой вольтметр с двойным интегрированием.
22. Вольтметр уравновешивающего преобразования (поразрядного уравновешивания). АЦП последовательного счета.
23. Метод измерения фазового сдвига преобразованием в напряжение и во временной интервал.
24. Цифровой фазометр с усреднением (интегрирующий фазометр)
25. Измерение частоты методом дискретного счета (метод прямого счета). Электронно-счетный частотомер.
26. Измерение периода и временных интервалов методом дискретного счета с помощью ЭСЧ. Измерение отношения частот.
27. Погрешности метода дискретного счета и пути их уменьшения. Комбинированный способ измерения частоты и периода.

Экзаменационные вопросы - 4

5. Измерение АЧХ

28. Методы измерения АЧХ. Измерение АЧХ в дискретных точках, погрешности метода.
29. Структурная схема панорамного измерителя АЧХ. Параметры измерителя. Динамические искажения при измерении АЧХ.
30. Измерение уровня и частоты отдельных точек АЧХ на экране панорамного измерителя АЧХ. Погрешности панорамного метода измерения АЧХ.
31. Микропроцессорные измерители АЧХ. Структурная схема, алгоритм калибровки и измерений.

6. Информационно - измерительные системы

32. Измерительные системы. Классификация, структурные схемы.
33. Основные типы интерфейсов, используемых в измерительных системах, их сравнительный анализ и особенности применения.
34. Приборный интерфейс GPIB, его свойства и параметры. Назначение линий интерфейса GPIB.
35. Назначение сигналов шин приборного интерфейса. Алгоритм передачи байта данных по интерфейсу GPIB .
36. Команда интерфейса GPIB, процесс передачи команд по интерфейсу. Интерфейсные функции, адресация приборов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

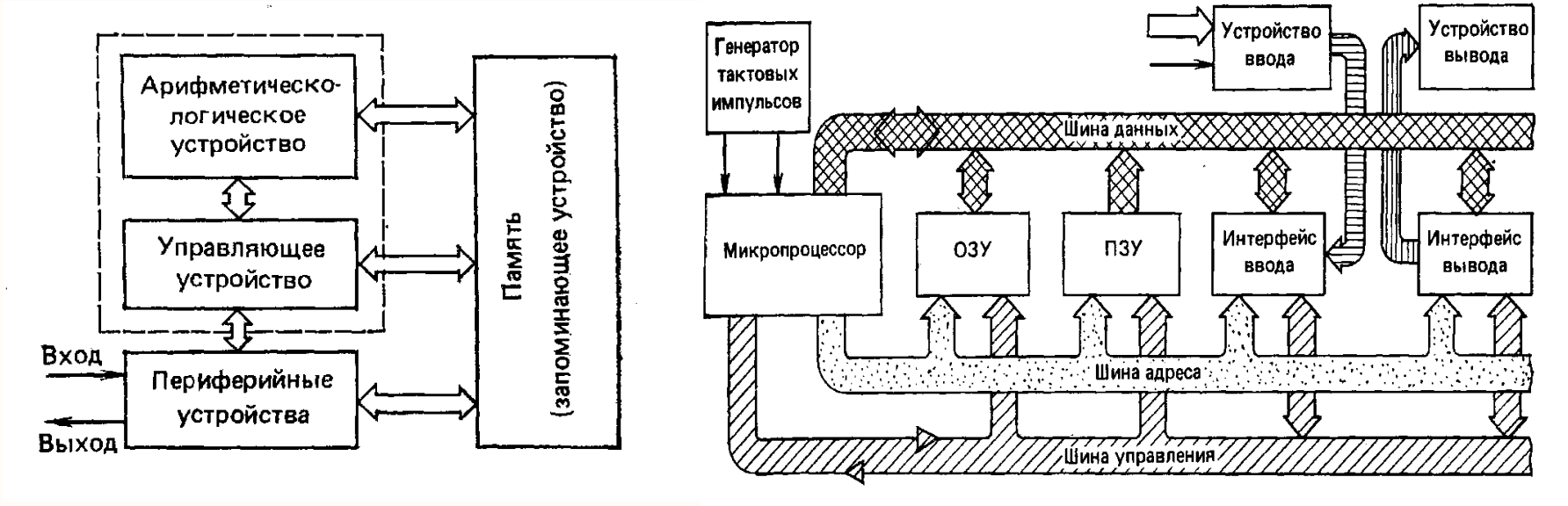
(электронный конспект лекций)

Микропроцессорные измерительные приборы

Санкт-Петербург
2025 г.

Основные термины и определения

Микропроцессором (МП) обычно называют вычислительное устройство (микроЭВМ), выполненное в виде одной (реже нескольких) интегральных схем (чипов). Микропроцессорная система (МПС) включает МП, ОЗУ, ПЗУ, интерфесы ввода и вывода.



Основные этапы измерения

1. Цель измерения (постановка измерительной задачи).

Задание условий, средств и сроков проведения измерения, трудозатрат и стоимости.

2. Планирование измерения.

- Выбор модели объекта измерения.
- Выбор модели средства измерения.
- Выбор метода измерения, вида уравнения, количества точек, диапазона измерения и пр.
- Априорная оценка погрешности.

3. Проведение эксперимента и получение опытных данных.

- Калибровка средств измерения.
- Выполнение алгоритма (метода).
- Сохранение опытных данных.
- Компенсация помех.

4. Обработка опытных данных.

- Вычисление результатов косвенного измерения.
- Апостериорная оценка погрешностей измерения.
- Удаление грубых погрешностей.
- Исключение систематических погрешностей.

Микропроцессорные приборы

«Микропроцессорный» или «вычислительный» прибор –микроЭВМ с дополнительными измерительными блоками традиционных цифровых приборов - АЦП, ЦАП, датчики, усилители, преобразователи и пр.).

Какие **возможности** микропроцессора используют для решения **измерительных** задач?

- реализация алгоритма измерения
- управление работой прибора, автоматизация процесса измерения;
- управление аналого-цифровым преобразованием и обработкой цифровой информации;
- вычислительные операции над результатами измерения, статистическая обработка и пр.;
- хранение и передача информации

Применение микропроцессоров в измерительных приборах

Достоинства микропроцессорных приборов:

Многофункциональность. Замена измерительного комплекса (совокупности различных измерительных приборов) одним, позволяющим измерять разные физические величины путем смены программного обеспечения.

Повышение точности. Уменьшение погрешностей по сравнению с обычными цифровыми приборами при прочих равных условиях за счет:

- исключения систематических погрешностей в процессе самокалибровки: коррекция смещения нуля, учет собственной АЧХ прибора, учет нелинейности преобразователей. *Самокалибровка* – это измерение поправок или поправочных множителей и запоминание их в ОЗУ.
- Уменьшение влияния случайных погрешностей путем проведения многократных измерений с последующей обработкой выборки – усреднением, вычислением мат. ожидания и пр...

- Выявление и устранение грубых погрешностей (промахов);
- Вычисление и индикация оценки погрешности прямо в процессе измерения

Компенсация внутренних шумов и внешних помех для повышения чувствительности средства измерения. Один из вариантов– проведение многократных измерений и усреднение результатов с целью компенсации случайной составляющей измерительного сигнала. Другой вариант – цифровая фильтрация временной последовательности мгновенных значений сигнала.

Расширение измерительных возможностей путем широкого использования *косвенных, совместных и совокупных* измерений, воспринимаемых оператором в этом случае как прямые - результат обработки появляется на индикаторе сразу после измерения

Упрощение и облегчение управления прибором. Управление производится путем переключения блоков программ с кнопочной панели. Автоматизация установок прибора приводит к упрощению его использования (выбор пределов измерения, автоматическая калибровка, контроль за ошибочными действиями оператора с индикацией его неверных действий на табло или экране).

Математические операции с результатом измерений – умножение на константу, вычисление отклонения от эталона, смещение (вычитание константы), вывод в процентах, представление в логарифмических величинах, ввод характеристик датчиков и пр.

Статистическая обработка данных - расчет математического ожидания, дисперсии, коэффициента корреляции и пр.

Запоминание большого объема данных. В приборах предусматривают расширенную память ОЗУ и жесткие диски

Малые габариты, высокая надежность, небольшая потребляемая мощность по сравнению с приборами с жесткой логикой. При прочих равных условиях МП приборы содержат меньше элементов. *Самотестирование* - программное выявление неисправностей и сбоев в работе - повышает надежность.

Упрощение организации измерительных систем*.* Микропроцессор позволяет программно реализовать интерфейсные протоколы измерительных систем.

Сокращение времени разработки приборов за счет унификации конструкции аппаратной части. Разработка нового прибора сводится к программированию МПС, что позволяет использовать общую аппаратную платформу.

Недостатки микропроцессорных приборов:

Ограниченное быстродействие МПС не позволяет им обрабатывать высокочастотные сигналы прямым способом.

Пример: цифровой микропроцессорный вольтметр имеет относительно небольшую скорость преобразования и применяется для постоянных и медленно меняющихся.сигналов за низких частотах. Мультиметр с аналоговым широкополосным детектором имеет низкую точность за счет погрешностей преобразования;

Сложность управления при малом уровне автоматизации, отсутствие единых принципов управления работой, необходимость обучения олператоров.

Трудности программирования – программное обеспечение на языках низкого уровня, которое должно работать в реальном времени

Трудности диагностики неисправностей и ремонта

Дороговизна по сравнению с простейшими аналоговыми приборами

Где целесообразно применять МП измерительные приборы?

- В многофункциональных приборах (мультиметрах) с возможностью наращивания измерительных функций;
- Для приборов с большим количеством входных устройств (датчиков) и выходных устройств (регистраторы, принтеры, цифровые табло)
- Там, где требуется запоминание большого объема данных.
- Где используются косвенные измерения
- Требуется самокалибровка и самотестирование.
- Требуется повышенная точность, не реализуемая аппаратными способами.
- Необходимо автоматизировать статистическую обработку результатов.
- Требуется расчет и индикация оценок погрешности в процессе измерений.
- Необходимо провести математические преобразования результатов измерений.
- Велик объем измерений и требуется высокая производительность измерений.

Области применения МП приборов:

- Многопредельные цифровые мультиметры
- Измерительные мосты с автоматическим уравновешиванием;
- Запоминающие приборы (осциллографы, анализаторы спектра, измерители характеристик устройств)
- Приборы с обработкой большого объема данных (цифровые осциллографы, характериографы, анализаторы спектра)
- Автоматические приборы.
- Приборы для косвенных измерений

Особенности программного обеспечения микропроцессорных измерительных приборов

Программное обеспечение МП приборов включает в себя:

- Программы обслуживания измерительных преобразователей (АЦП и др.), программы реализации метода измерения
- Программы калибровки и коррекции погрешностей – дрейфа и смещения нуля и пр.;
- Цифровые методы фильтрации измерительных сигналов – усреднение по выборке, сглаживание шумов.
- Программы автоматизации процесса измерения (выбор пределов измерения, оптимальных параметров преобразователей и др.)
- Сравнение результатов с номиналом, масштабное преобразование результата. Математическая обработка результатов измерений.
- Программное управление измерениями (программируемые приборы).

Особенности программирования для МП приборов

- Ограниченный ***объем ПЗУ***. Необходимо писать компактные задачи, с использованием языков низкого уровня (Ассемблер).
- Требование ***модульного*** построения программ, что позволяет использовать в различных приборах одинаковые программные фрагменты.
- Повышенная ***надежность*** программ – при наличии ошибок прибор становится неработоспособным. Корректировка программ пользователем невозможна.
- Программы работают в ***реальном*** времени. Необходима синхронность между поступлением измерительной информации и проведением ее обработки.
- ***Сложность ввода/вывода*** для управления программами. Только кнопки управления и цифровое табло – отсутствует возможность командной строки. Вывод – обычно на цифровом табло без текстовой информации. Для экранных устройств – ограниченные возможности вывода текстов

Пример: микропроцессорный мультиметр фирмы Hewlett Packard типа HP 34401A.



6 ½ разрядный дисплей (табло). Разрешающая способность - 22-битовое АЦП

Основная погрешность измерения напряжения 0.0015% (постоянный ток) и 0.06% - переменный ток (полоса частот от 3 Гц до 300 кГц).

Прибор измеряет напряжение, ток, сопротивление, частоту и период, позволяет провести тестирование p-n переходов диодов и транзисторов, проверить контакты в электрических цепях («прозвонить» схему).

Программное обеспечение прибора позволяет фиксировать минимальное, максимальное и среднее значения данных, проводить измерения в дБм и дБ.

Прибор позволяет запомнить 512 результатов измерений во внутренней памяти.

Для передачи во внешние устройства предусмотрено два интерфейса (параллельный GPIB и последовательный RS -232C) .

Прибор может управляться полностью дистанционно системой команд SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) .

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Факультет радиотехники и телекоммуникаций,
Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Аналоговые электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО) и осциллографические измерения

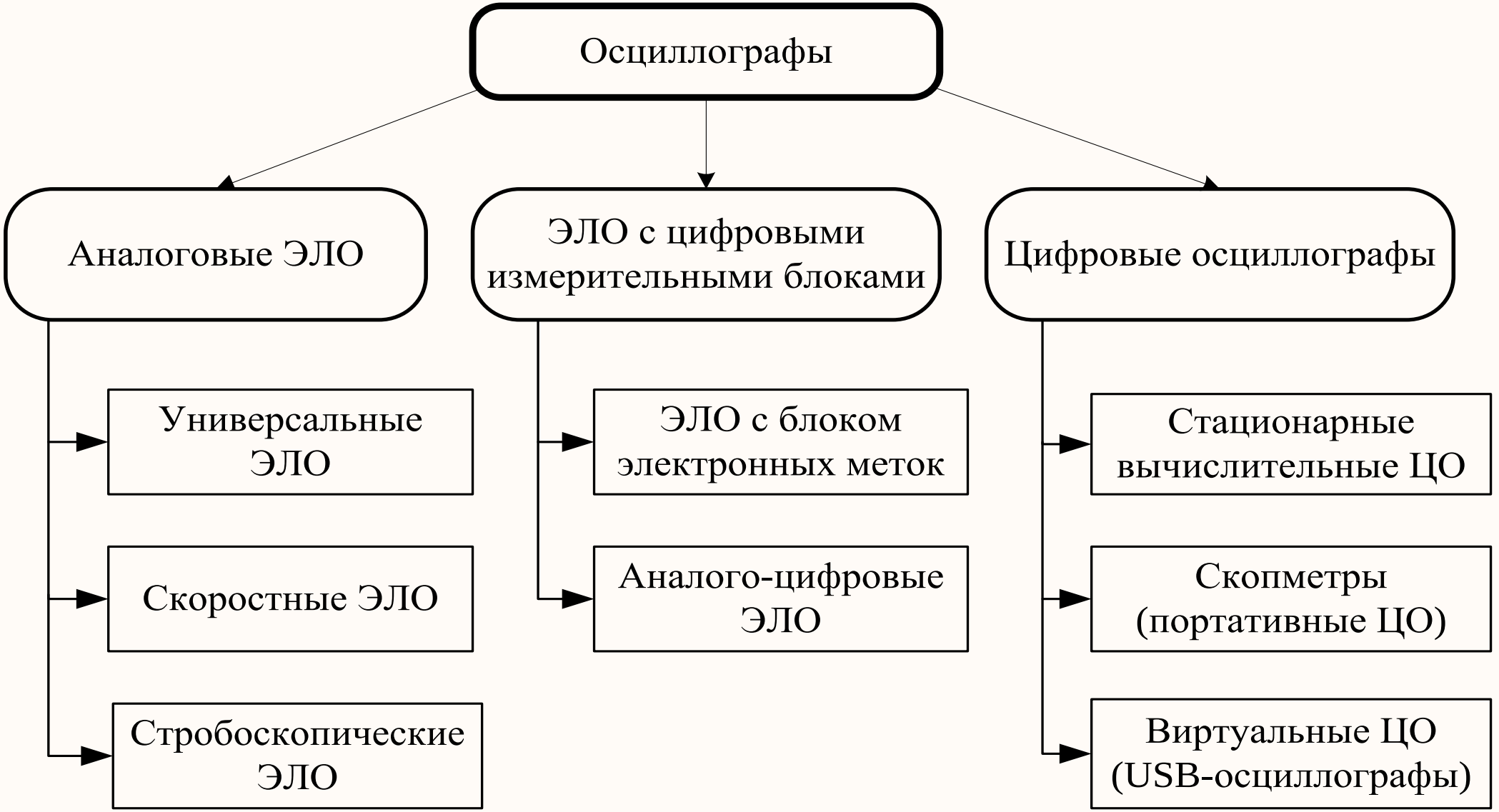
Санкт-Петербург
2025 г.

Классификация осциллографов

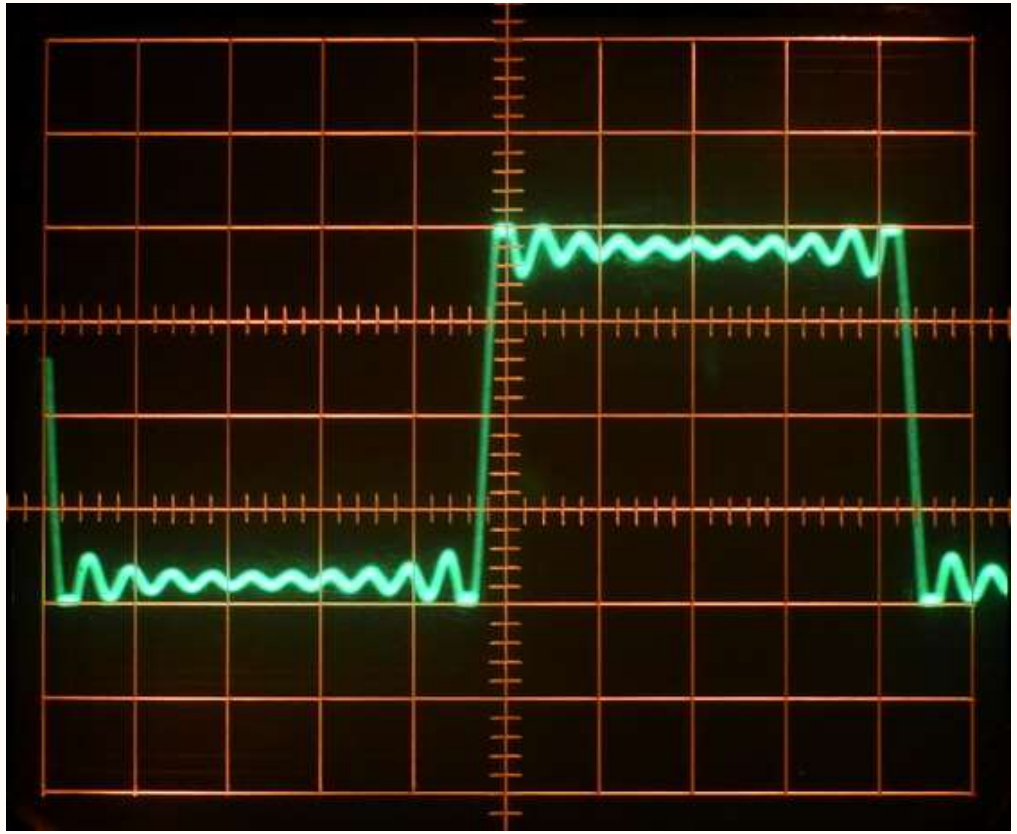
Осциллограф – радиоизмерительный прибор, предназначенный для отображения временных зависимостей сложных сигналов и измерения их параметров – напряжения и временных интервалов.

Название– ***Осциллограф*** произошло от двух слов (лат. *Oscillo* «осцилло» — *качаюсь* + греч. «графо»- — *пишу*). Исторически название связано с приборами, фиксирующими форму колебаний на светочувствительную пленку (световые самописцы). В отечественной литературе это определение перешло на электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО), а затем – и на цифровые. В англоязычной литературе для этих приборов используют более точный термин - (***oscilloscope***, *осциллоскоп* - «осцилло» + греч. «скопео» - *смотреть*).

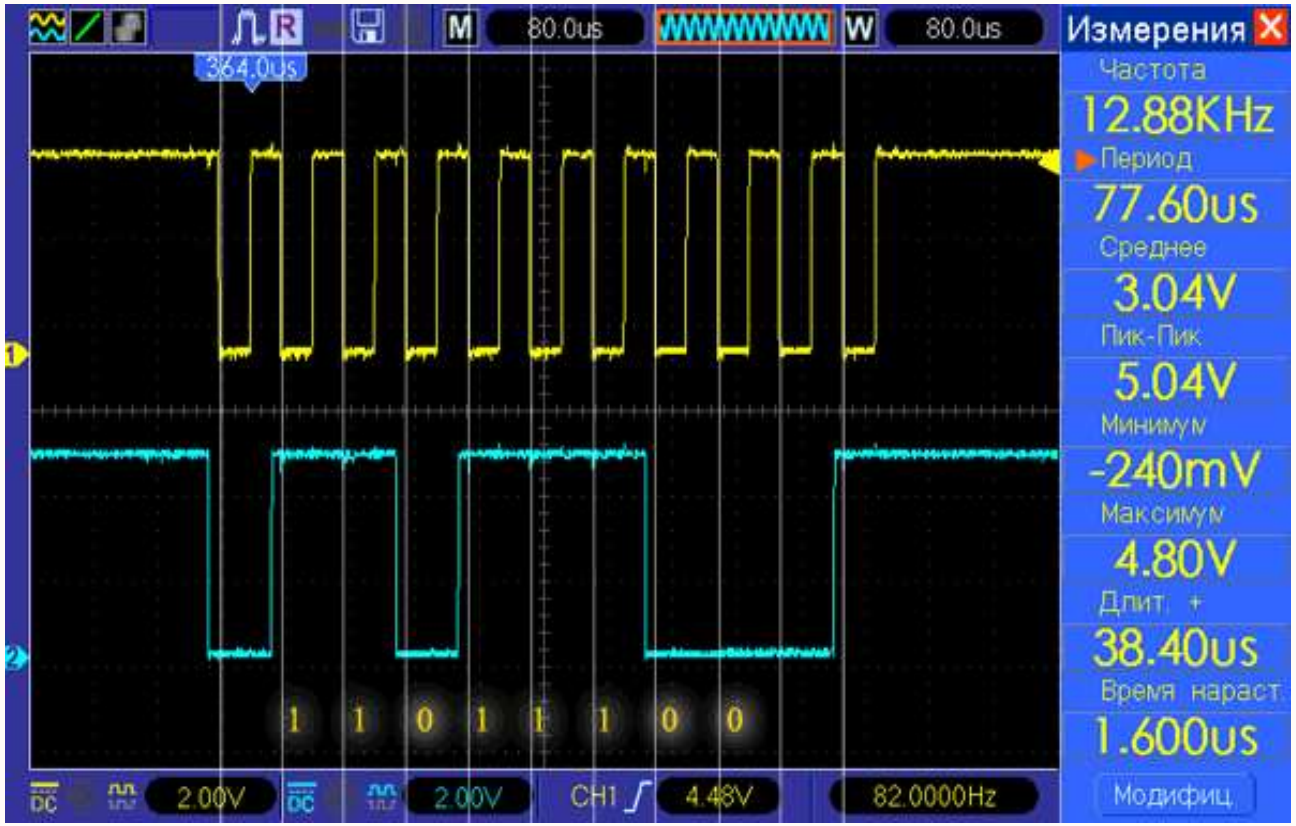
Классификация осциллографов



Вид осциллограмм на экране

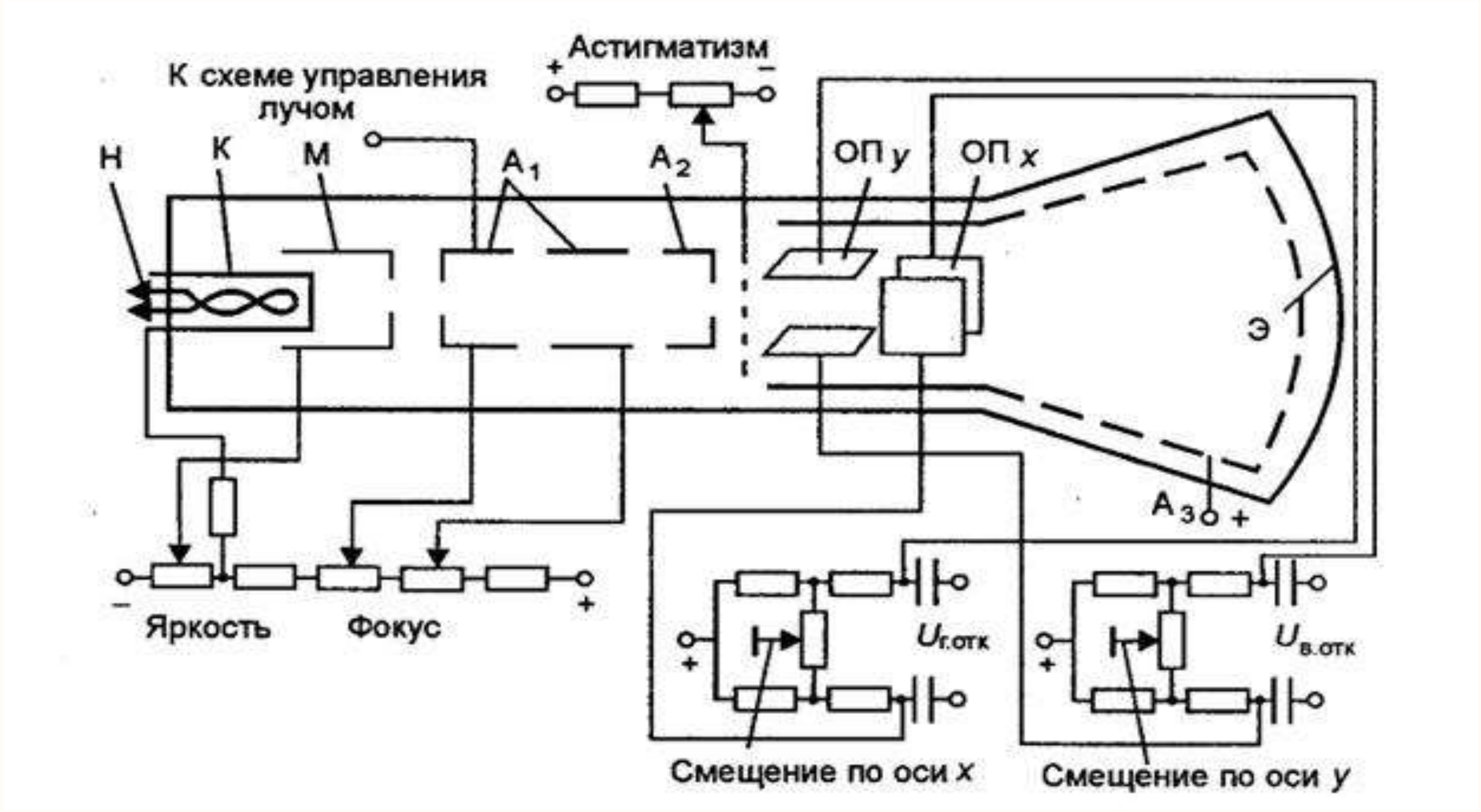


Аналоговый осциллограф (ЭЛО)

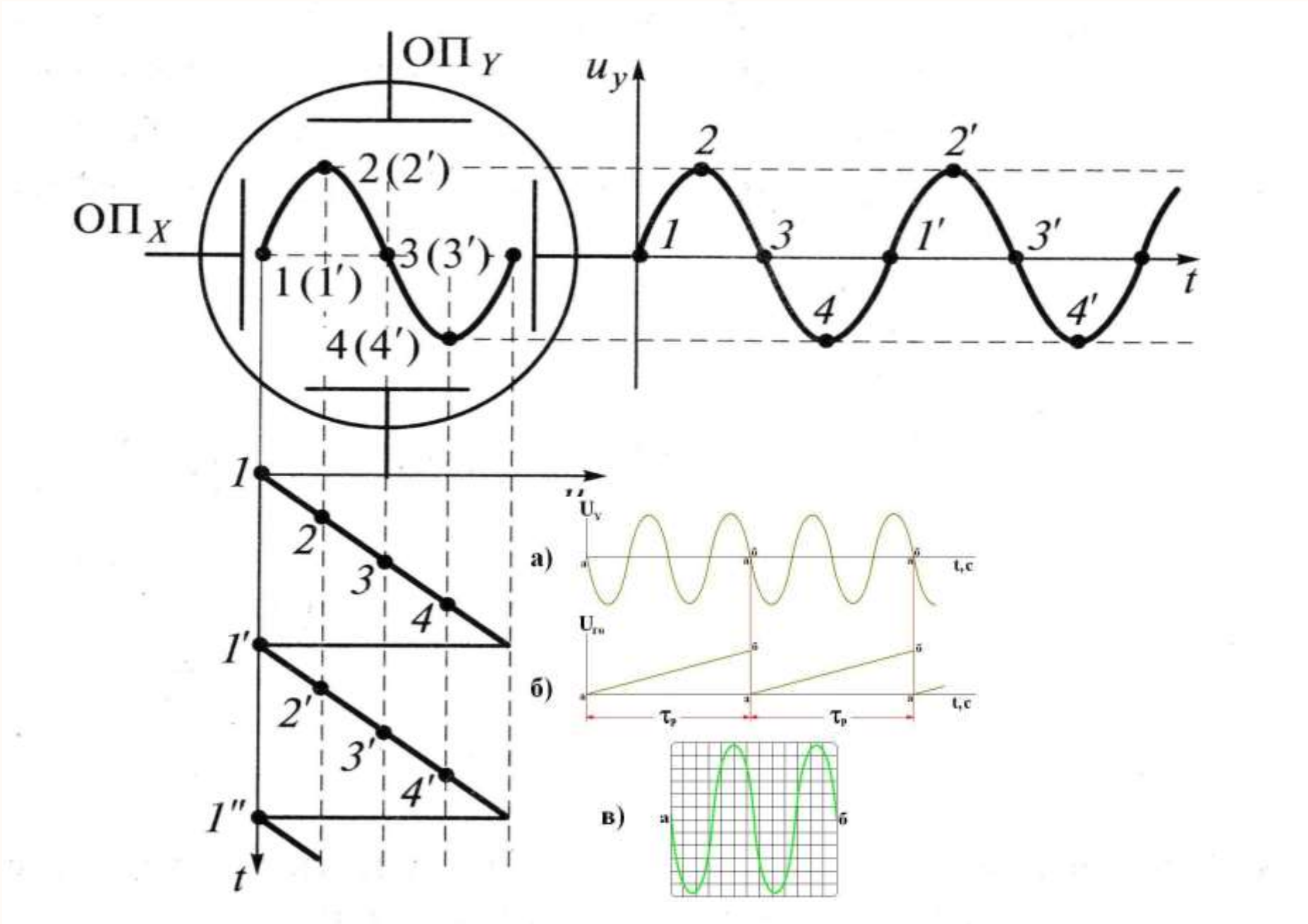


Цифровой осциллограф (ЦО)

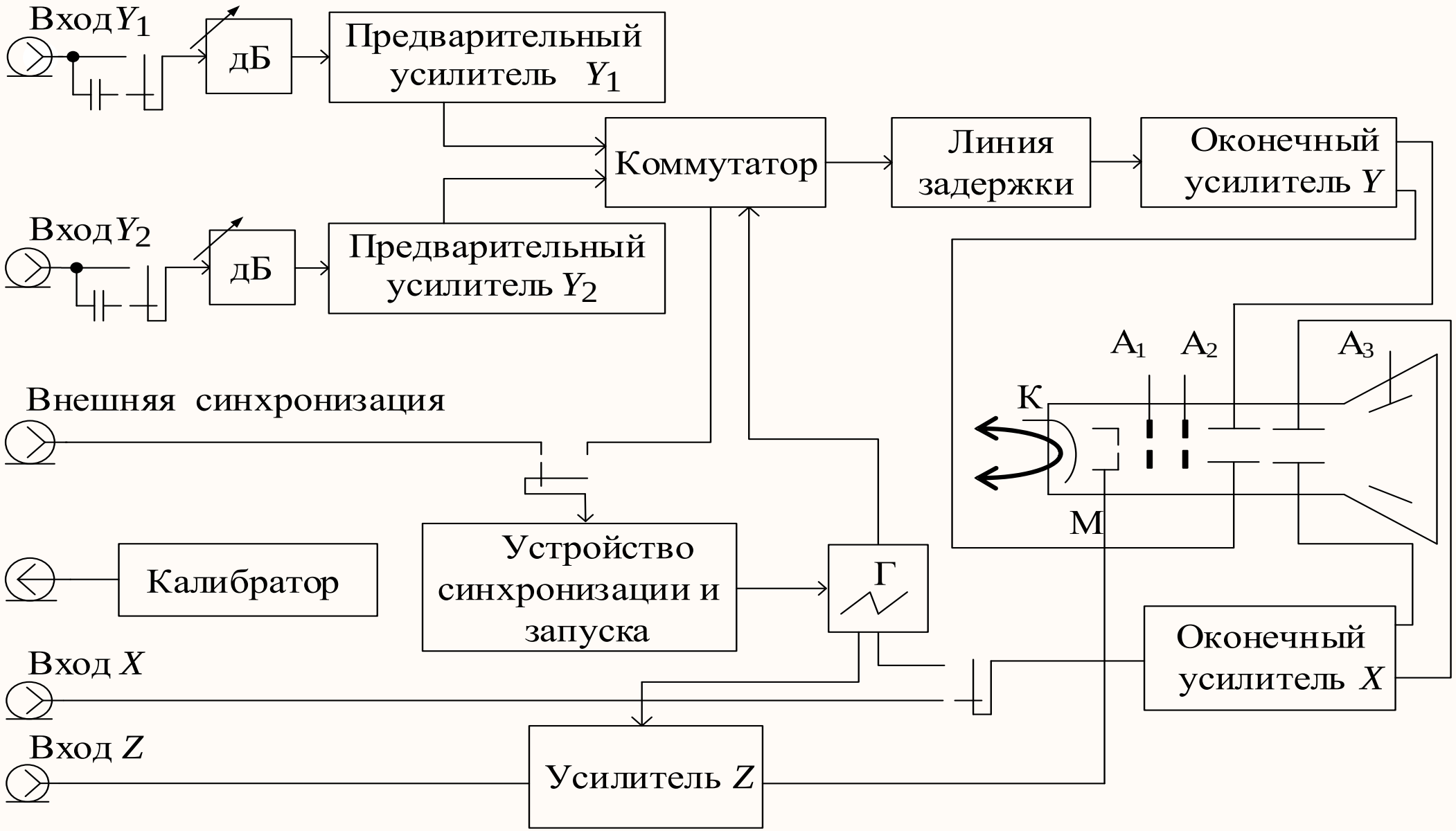
Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)- схема управления лучем



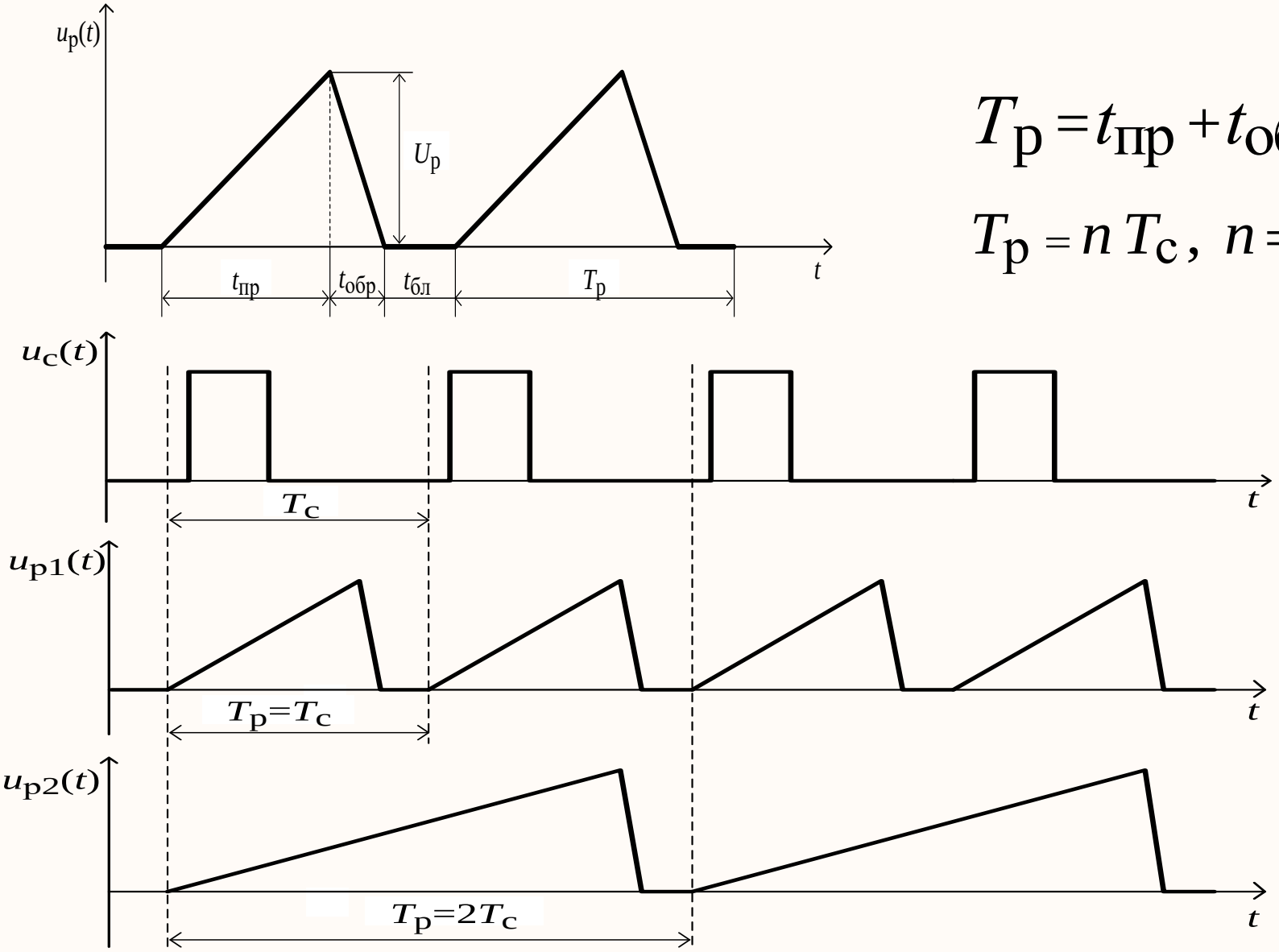
Принцип создания осциллограммы на экране ЭЛТ



Структурная схема аналогового двухканального осциллографа

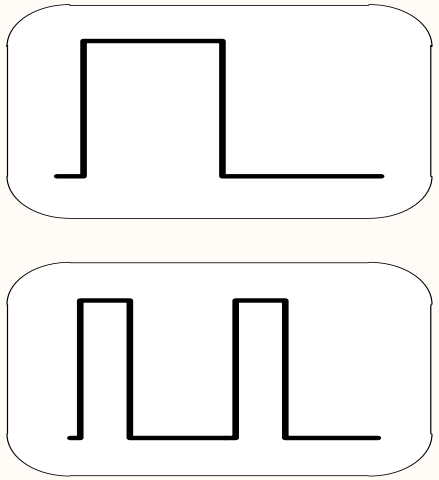


Напряжения непрерывной развертки ЭЛО



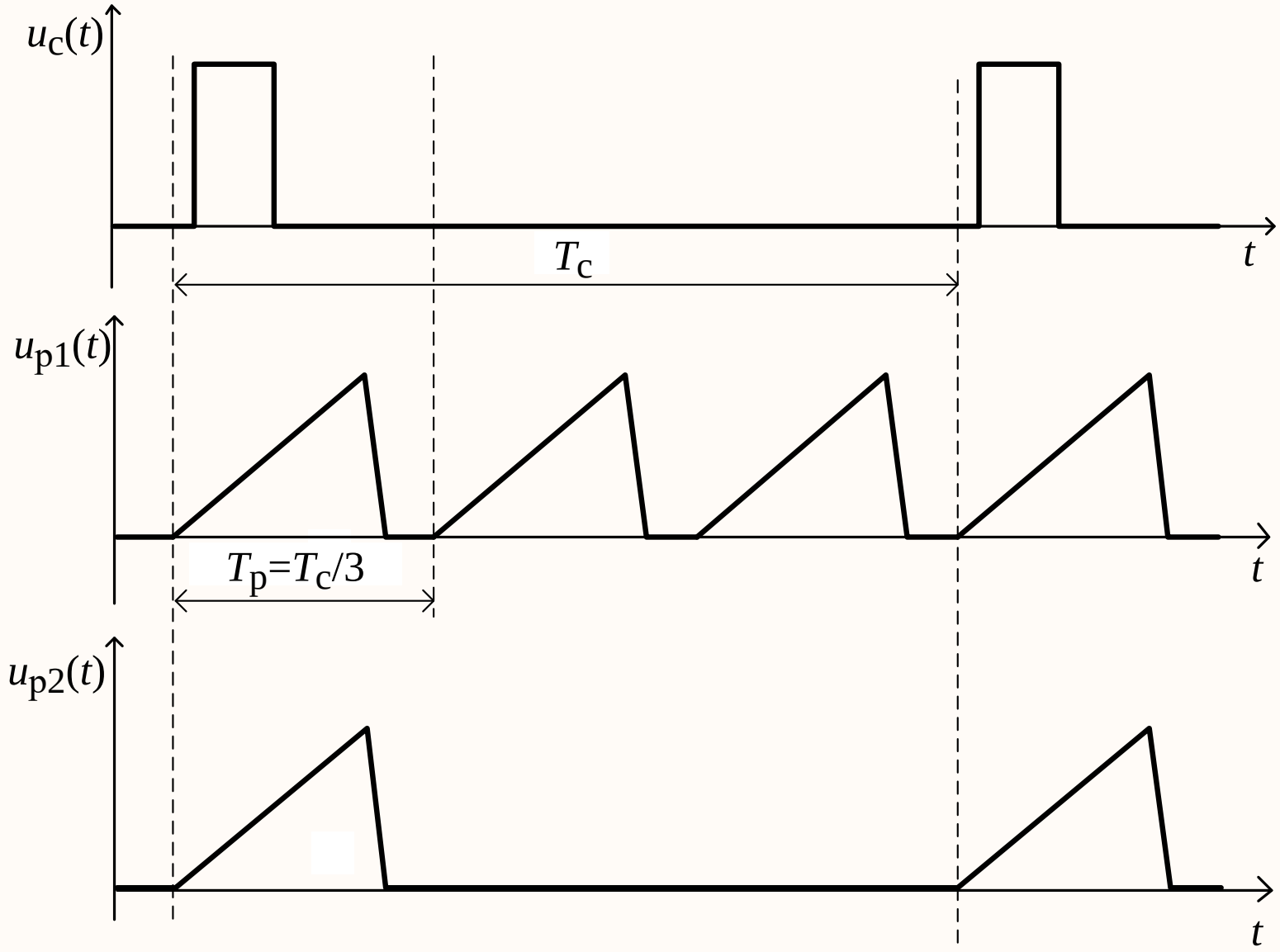
$$T_р = t_{пр} + t_{обр} + t_{бл}$$

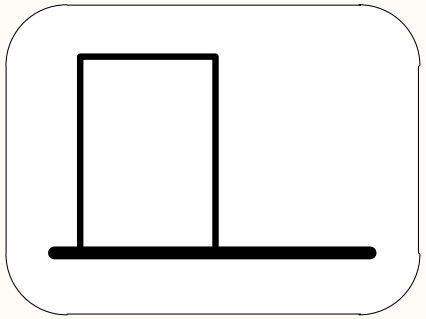
$$T_р = n\,T_с,\ n = 1, 2, 3, \ldots$$



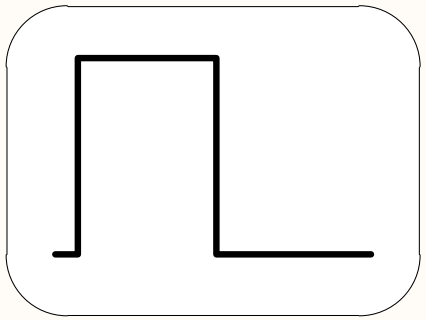
а *б*

Напряжения ждущей развертки ЭЛО





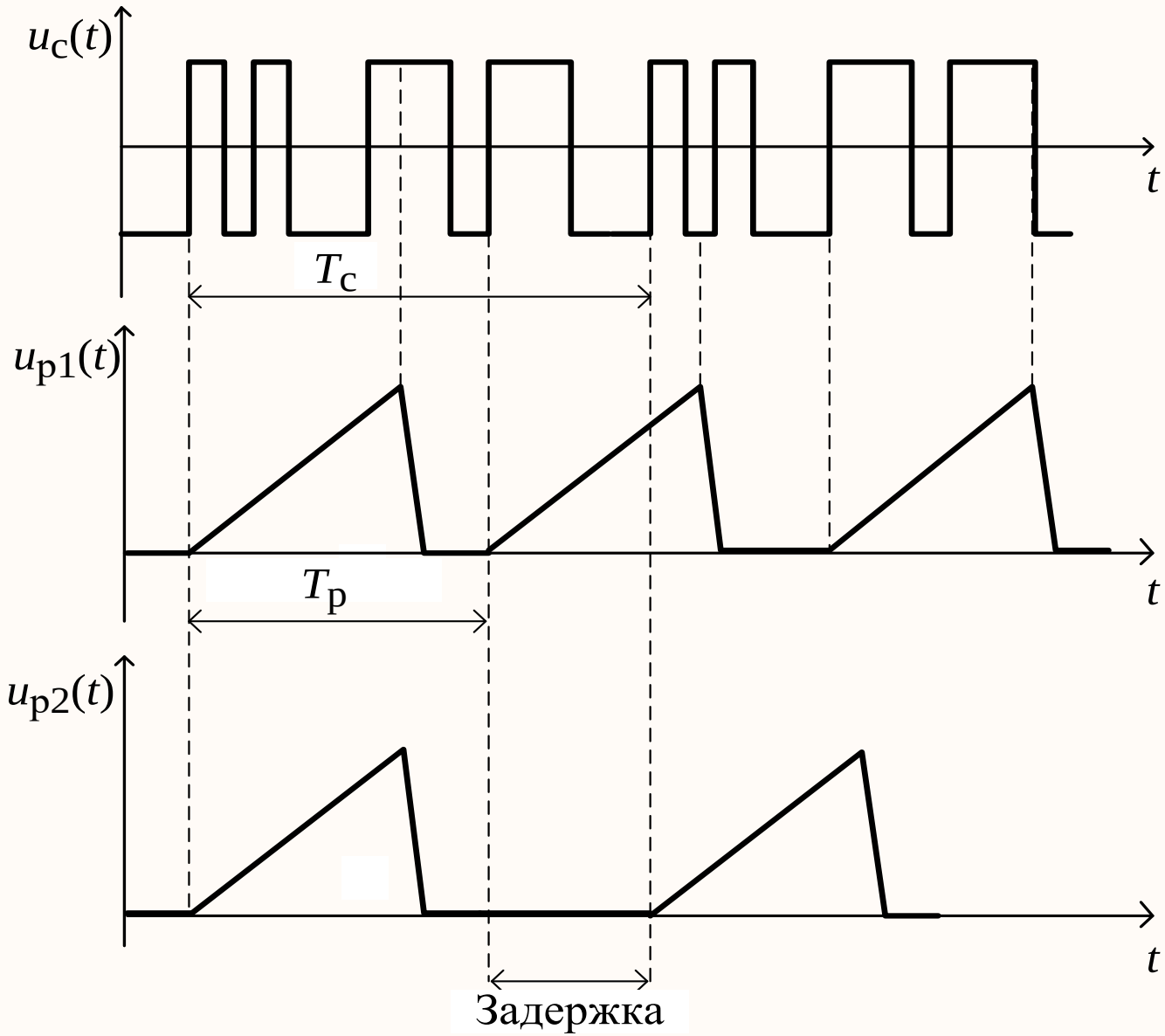
а

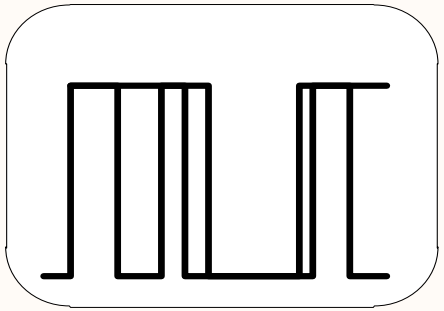


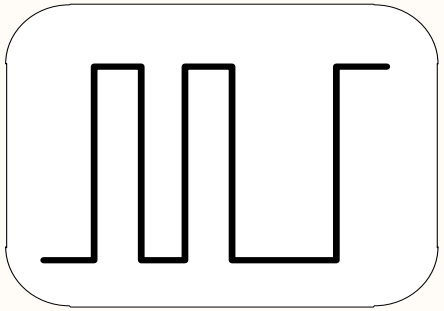
б

38

Регулировка задержки запуска развертки HOLD OFF

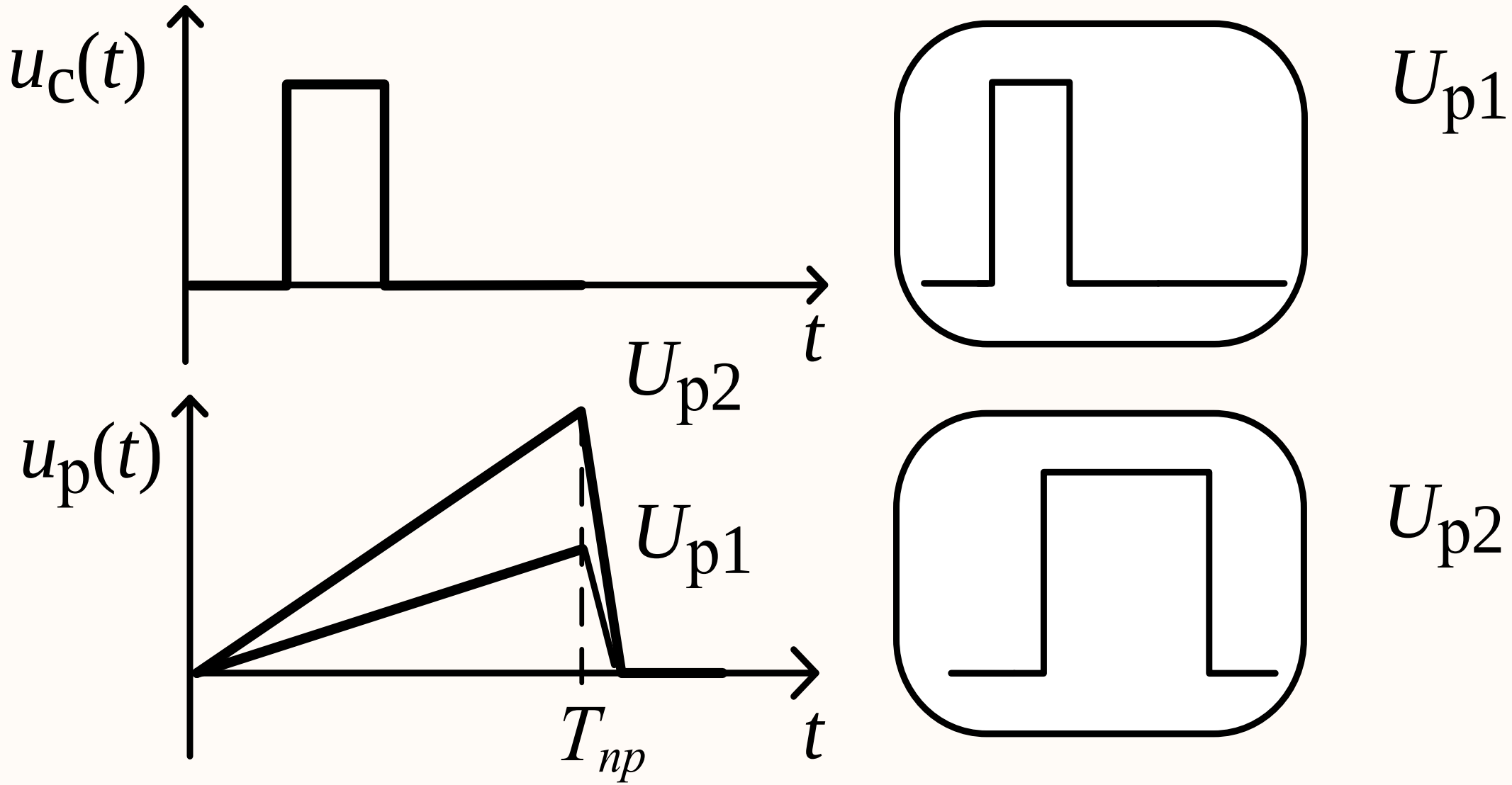






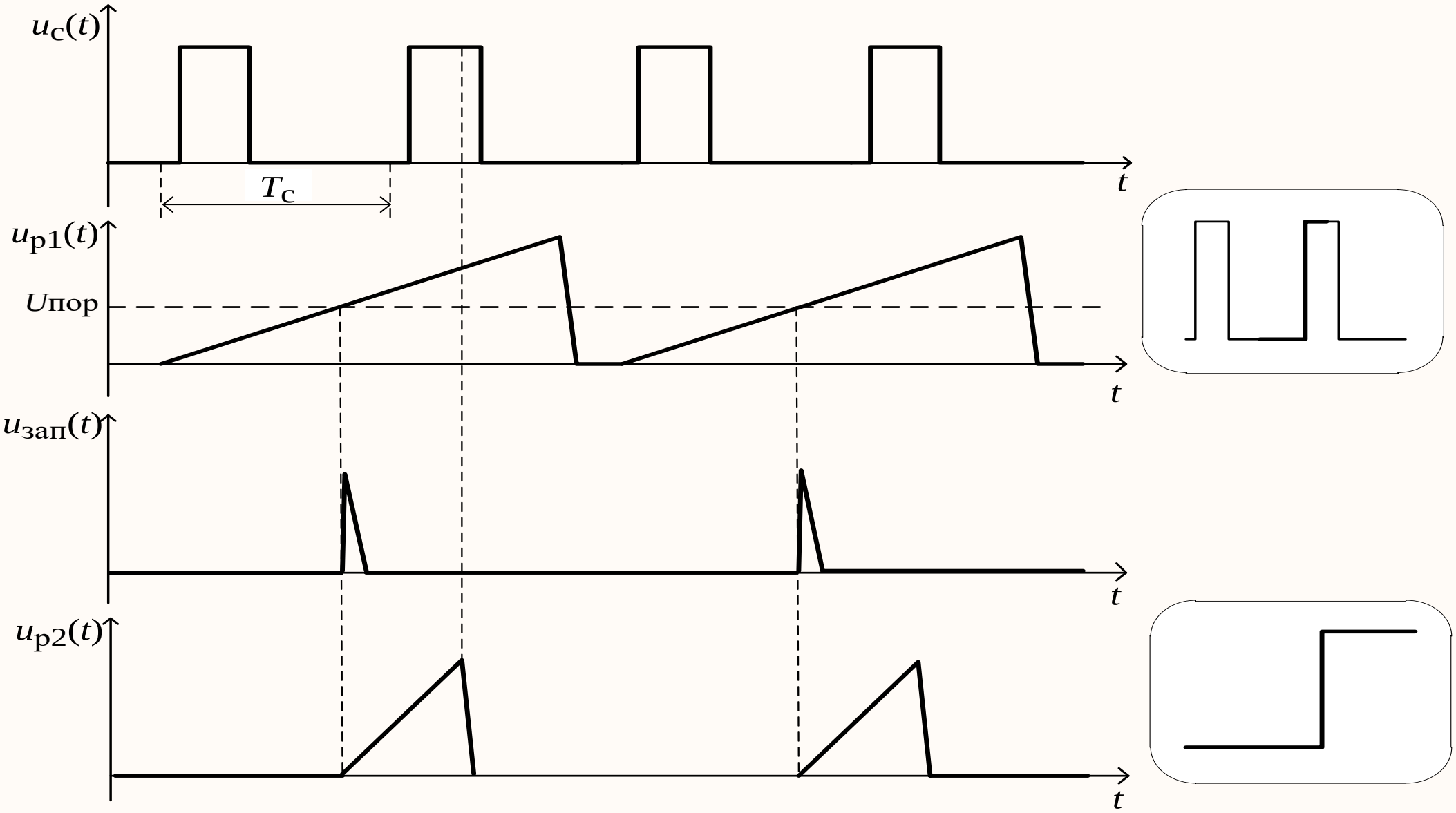
39

Режим растяжки развертки ЭЛО



40

Работа системы двойной развертки ЭЛО



41

Параметры ЭЛО по ГОСТ

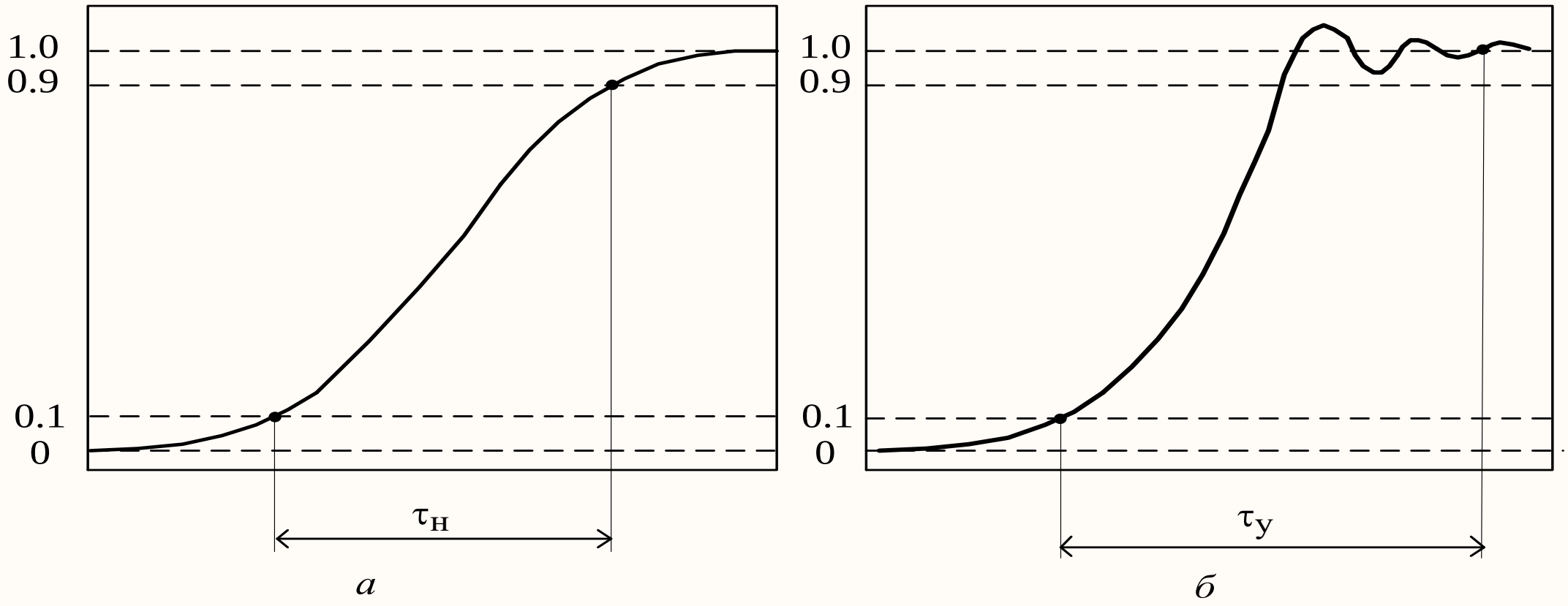
Основные параметры ЭЛО по ГОСТ:

- **Диапазон установки *коэффициента отклонения. Ко*** – это входное напряжение, необходимое для отклонения луча на деление по вертикали.
- **Погрешность** установки коэффициента отклонения или погрешность измерения напряжения методом калиброванных шкал.
- **Диапазон установки коэффициента развертки. Кр** – это время, за которое луч смещается по горизонтали на одно деление шкалы.
- **Погрешность** установки коэффициента развертки или погрешность измерения временных интервалов.
- Параметры **переходной характеристики** (ПХ) осциллографа: - время нарастания, выброс, время установления.
- Параметры **входа** канала вертикального отклонения: активное входное сопротивление и входная емкость.
- Параметры сигнала **внешней синхронизаци**и: уровень, диапазон частот, и др.
- К *дополнительным* параметрам относятся:
- Параметры **АЧХ осциллографа**: полоса пропускания, нормальный диапазон АЧХ, расширенный диапазон АЧХ.

42

Переходная характеристика осциллографа

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



ПХ часто имеет вид отклика апериодического (рис. 3.9 а) или – реже - колебательного (рис. 3.9 б) звена.

43

Параметр апериодической ПХ – ***время нарастания*** $\tau_н$. Для коле-бательной формы ПХ параметры – ***время установления*** $\tau_у$ и величина ***выброса*** $\delta_в$, %.

Время нарастания измеряют *по осциллограмме между точками 0.1 и 0.9* от установившегося значения сигнала. Если входной скачок имеет конечное время фронта $\tau_ф$, то время нарастания $\tau_н$ рассчитывают по формуле:

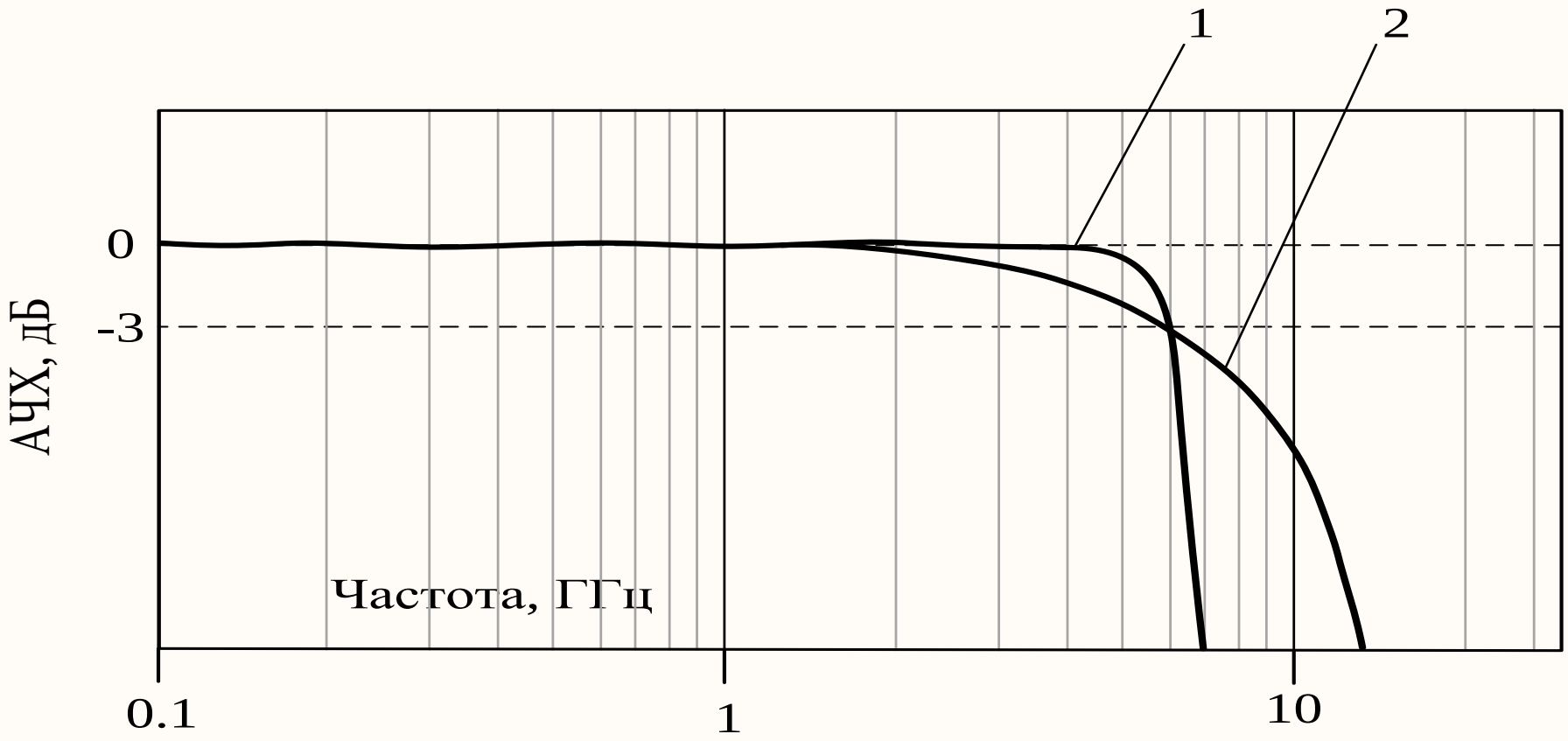
$$\tau_н = \sqrt{\tau_{изм}^2 - \tau_ф^2}$$

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

Время установления отсчитывают между уровнем 0.1 и моментом, когда осцилляции на вершине ПХ станут пренебрежимо малы.

АЧХ осциллографа

АЧХ осциллографа –зависимость вертикального размера изображения гармонического сигнала от его частоты. Главный параметр АЧХ- ***верхняя граничная частота*** $f_в$. 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 связаны (в зависимости от формы АЧХ канала Y) соотношением

$$\tau_{н} = \frac{320 \ldots 450}{f_{в}}$$

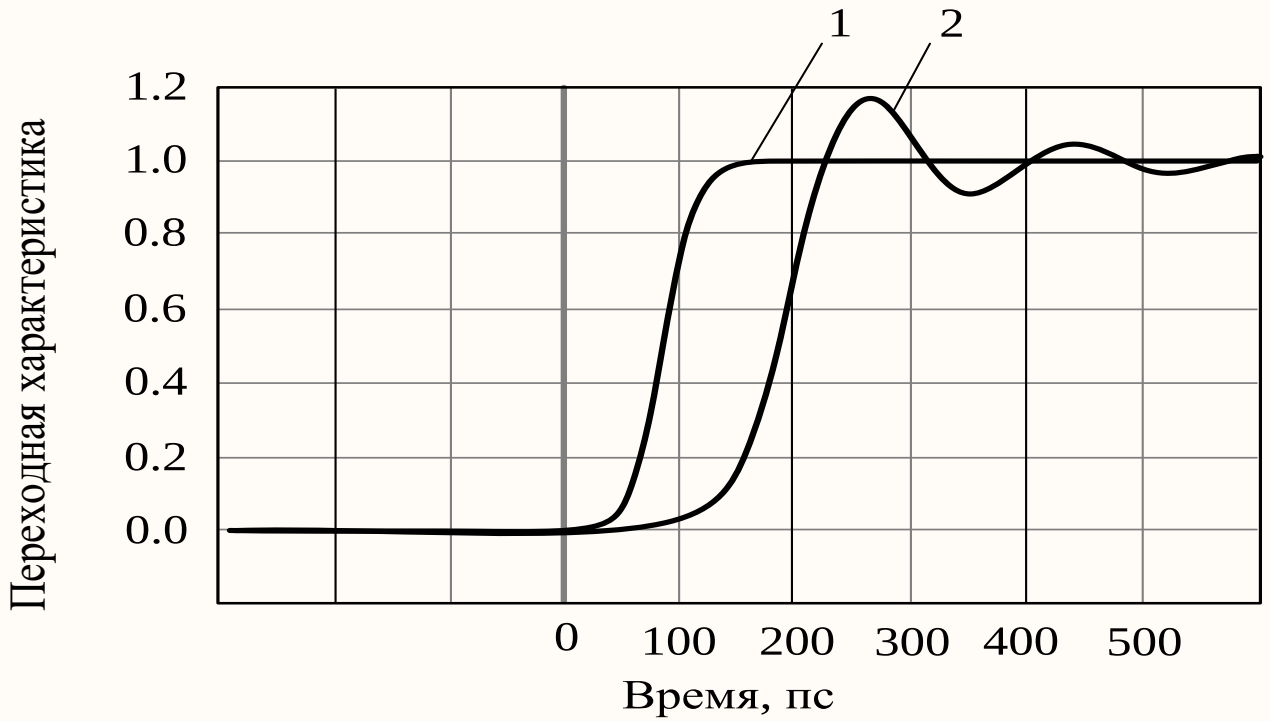
частота выражена в МГц, а время – в нс.

Измерение амплитуды гармонического сигнала на границе полосы пропускания приводит к значительным погрешностям (до 30 % на fв). 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 максимально плоскую форму АЧХ, близкую к прямоугольной (для нее ПХ имеет колебательный характер).

Верхнюю граничную частоту и время нарастания ПХ, согласно ГОСТ, принято связывать между собой соотношением

Оптимальной формой АЧХ, которая дает наименьшее время нарастания, обладает характеристика, близкая к АЧХ фильтра Гаусса:

$$A(f) = \exp(-0.35\frac{f}{f_в})$$



Переходные характеристики: 1 – АЧХ близкая к гауссовой, 2 – максимально плоская

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

$$\tau_н = \frac{350}{f_в}$$

частота выражена в МГц, а время – в нс.

Импульсный осциллограф-синхроскоп С1-5 (10 Мгц) и радиолюбительский осциллограф ЛО-70 (1 МГц)





Отечественный двухканальный осциллограф С1-92 (100 МГц)



Отечественный двухлучевой осциллограф С1-55 (10МГц)



Малогабаритный сервисный 5 МГц осциллограф С1-101

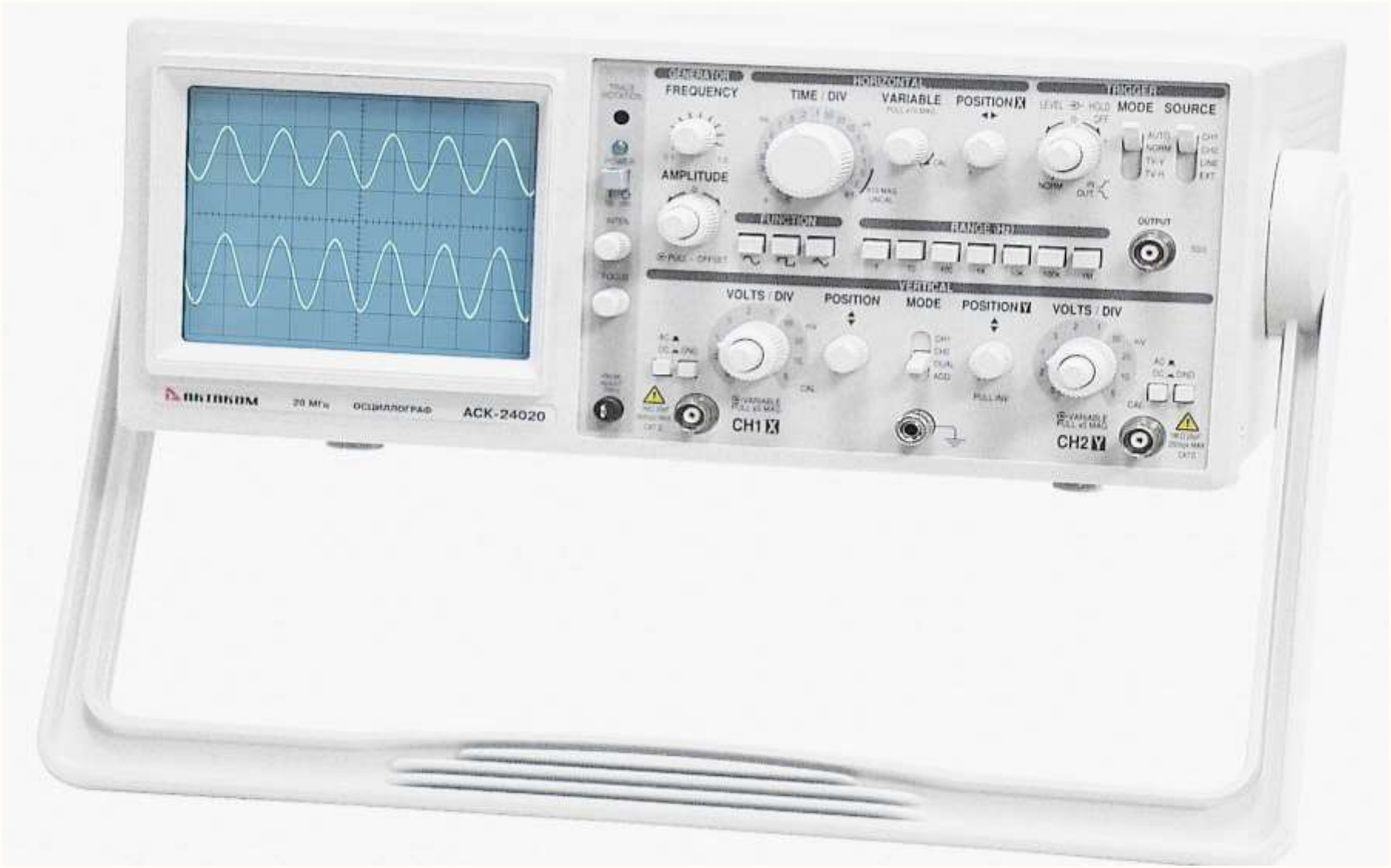


Отечественный аналоговый осциллограф С1-167



Аналоговый осциллограф АКТАКОМ АСК-24020

(2 канала, полоса пропускания 20 МГц, ЭЛТ 8х10 см, чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, встроенный функциональный генератор 0,1 Гц...1 МГц)

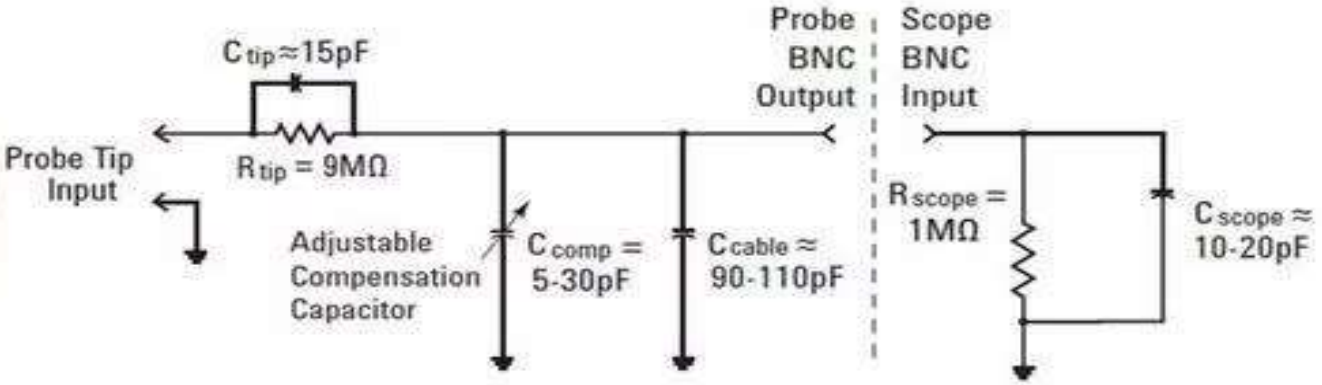


Аналоговый осциллограф HAMEG HM1004 100 МГц



Пассивный пробник 10:1 делителя напряжения





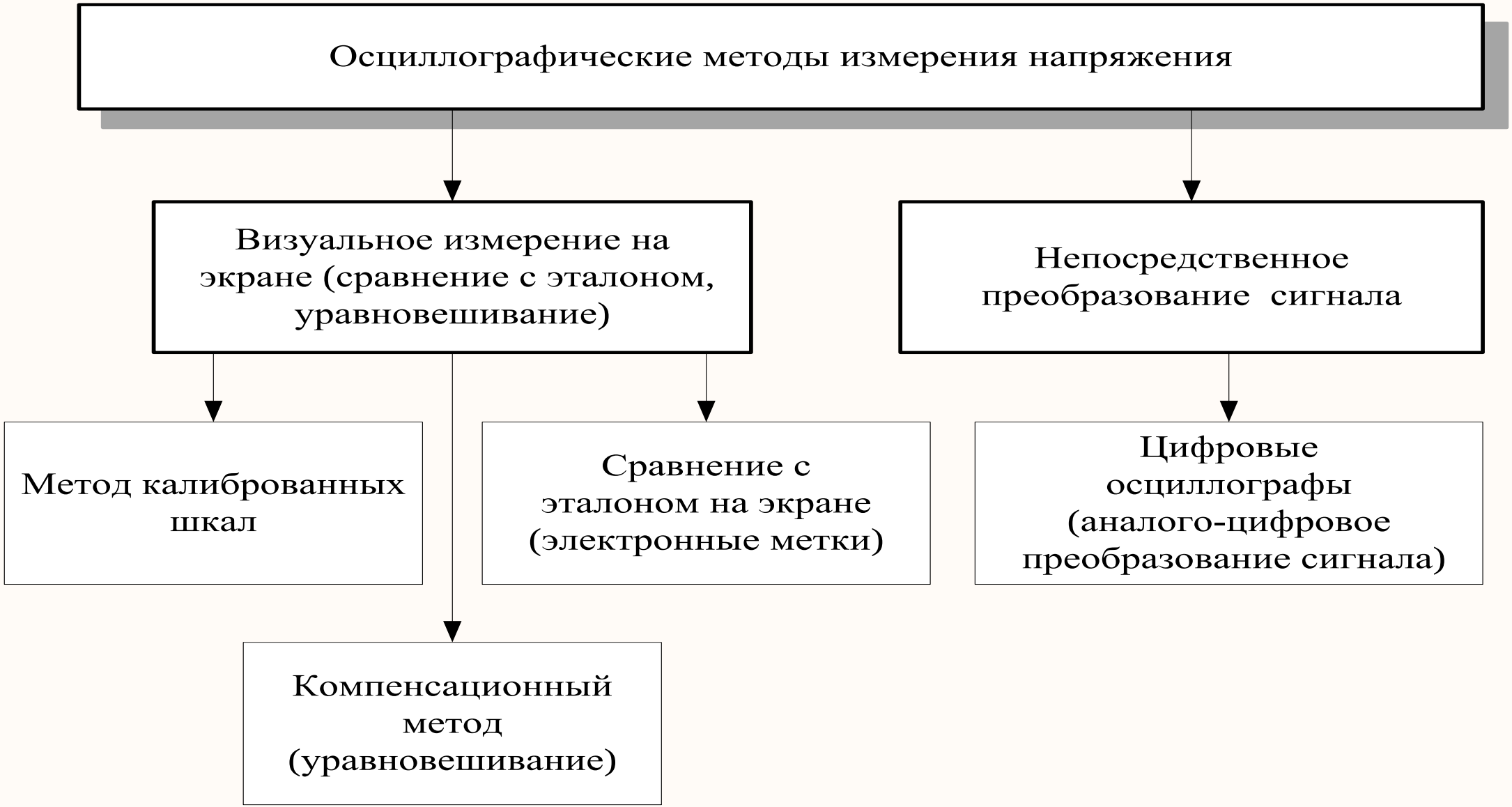
Модель пассивного пробника 10:1

Пассивный означает отсутствие активных элементов, например транзисторов или усилителей.

10:1 означает, что амплитуда сигнала, подаваемого на вход BNC осциллографа, уменьшается на коэффициент, равный 10. Кроме того, входной импеданс увеличивается в 10 раз.

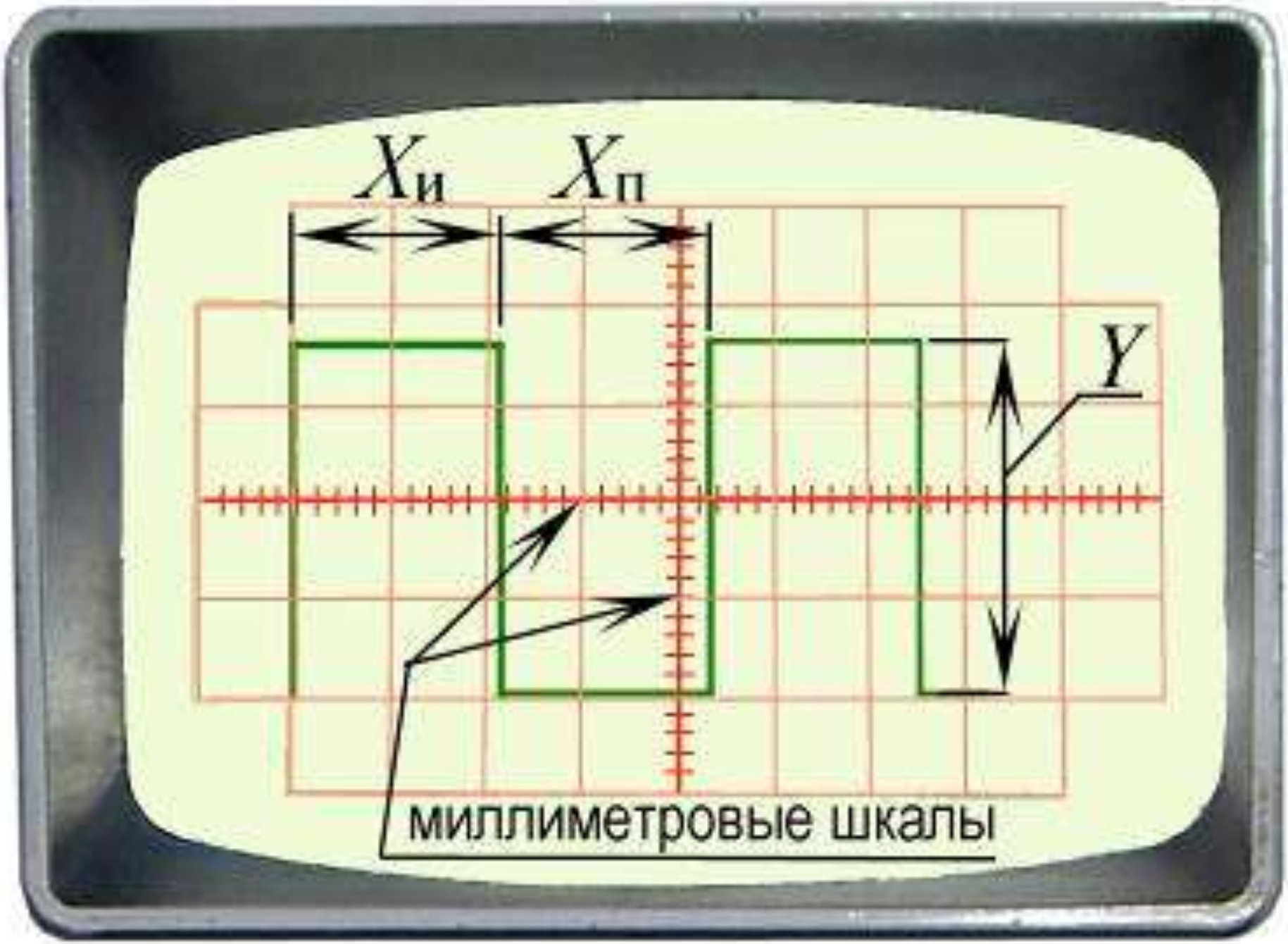
Примечание. Все измерения должны выполняться относительно точки заземления!

Классификация методов осциллографических измерений




Осциллографические методы измерения временных интервалов
Визуальное измерение на экране
Непосредственное преобразование сигнала
Метод калиброванных шкал
Сравнение с эталонным импульсом на экране
Калиброванная развертка
Электронные метки
Компенсационный метод с постоянным напряжением
Метод замещения с задержанной разверткой
Цифровые осциллографы (цифровая развертка)
Трансформация временного масштаба (стробоскопические осциллографы с калиброванной частотой стробирования)

Метод калиброванных шкал



Этапы метода калиброванных шкал

- Регулируют масштаб так, чтобы размер изображения составлял бы 80 ... 90 % экрана.
- Измеряют **размер** изображения по вертикали в делениях шкалы. Умножив число делений на установленный коэффициент отклонения *K*о, получают искомое значение амплитуды.
- Измерение временных интервалов проводят аналогично –**размер** интервала (в делениях шкалы по горизонтали) умножают на коэффициент развертки *K*р. При использовании растяжки развертки его необходимо дополнительно умножить на коэффициент растяжки (обычно ×0.1).

Калибровка осциллографа

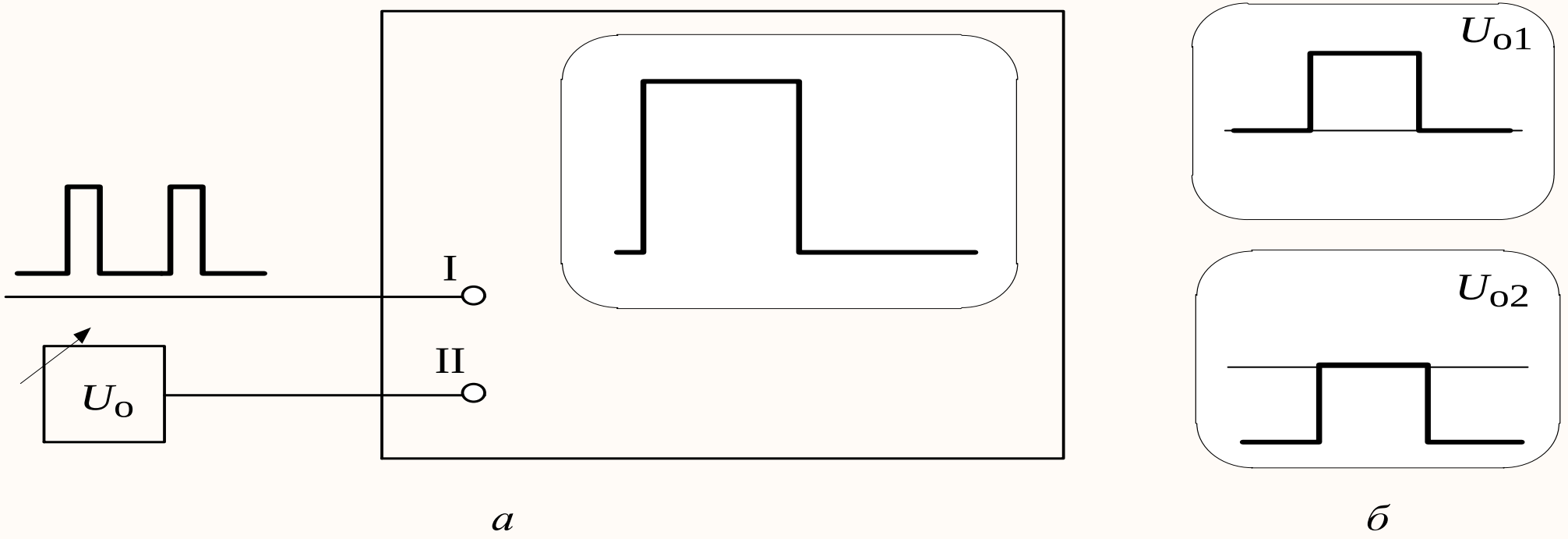
Перед измерениями осциллограф **калибруют** по вертикали и по горизонтали.

На вход *Y* подают сигнал калибратора (меандр) с известными амплитудой и периодом (например, 2 В, 1 кГц). Далее выбирают масштаб осциллограммы так, чтобы один период сигнала занимал бы примерно два деления шкалы, а по вертикали размер изображения – около 4 делений шкалы.

Калибровка состоит в следующем:

- Плавной регулировкой усиления **канала** *Y* добиваются точного соответствия вертикального размера изображения амплитуде сигнала калибратора (4 деления)
- Плавной регулировкой **длительности прямого хода** развертки добиваются точного совпадения размера периода сигнала калибратора с 2 делениями шкалы

Компенсационный метод измерения напряжения (метод замещения)



а *б*

$$U_m = \frac{(U_{o2} - U_{o1})K_{o1}}{K_{o2}}$$

Разность напряжений (*U*о2 – *U*о1) пропорциональна амплитуде импульса.

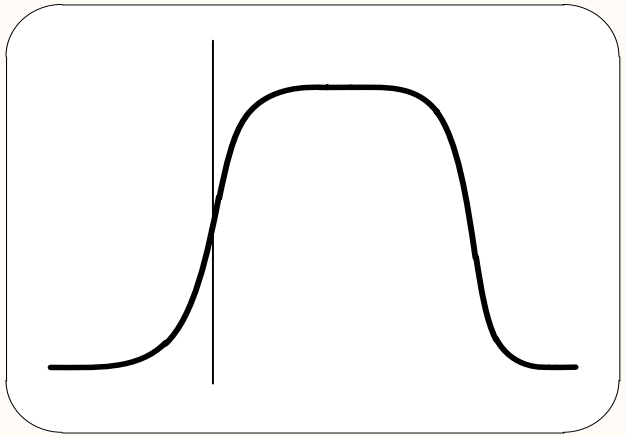
*K*о1 и *K*о2 – коэффициенты отклонения по первому и второму входам.

Компенсационный метод измерения временных интервалов (метод замещения)

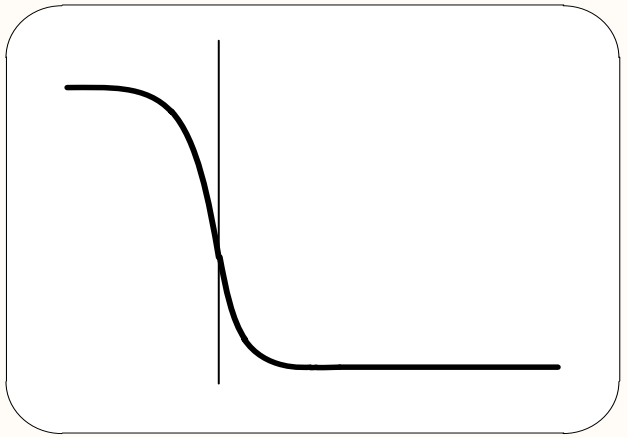
Метод замещения для измерения временных интервалов реализуют в осциллографах *с двойной разверткой* Для измерения используют режим, когда задержанная развертка Б запускается от основной развертки А.

Регулируя задержку (МНОЖИТЕЛЬ ЗАДЕРЖКИ), совмещают начало измеряемого временного интервала с вертикальной линией шкалы и фиксируют значение задержки $t_{з1}$ (а).

Затем с той же линией совмещают конец измеряемого временного интервала (б) и фиксируют задержку $t_{з2}$



а

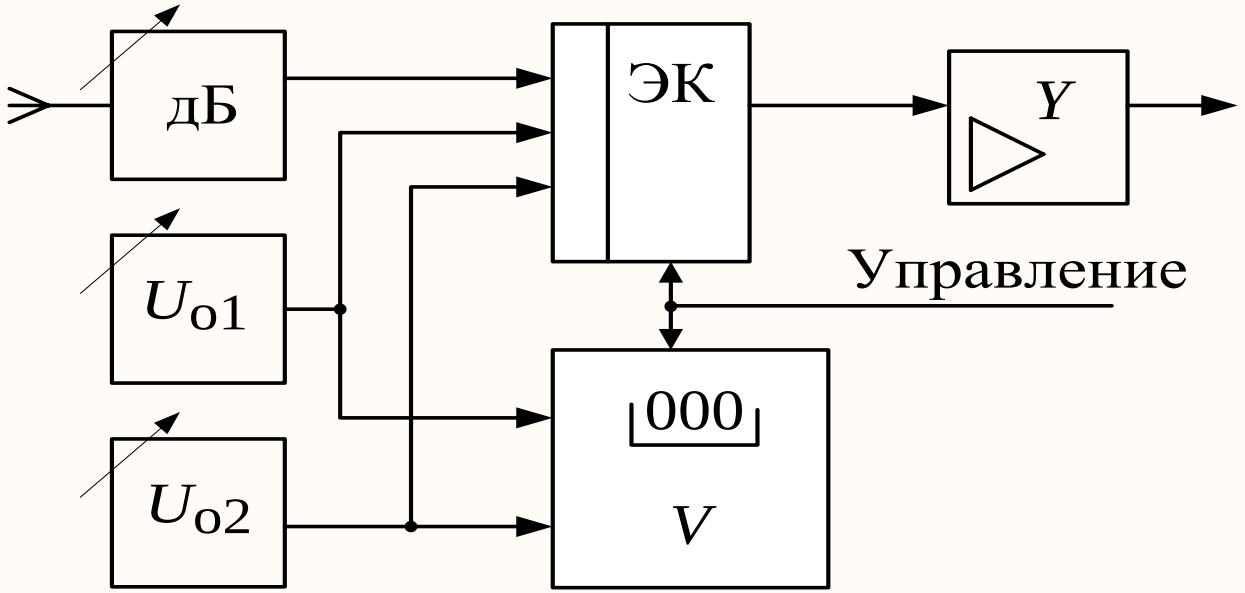


б

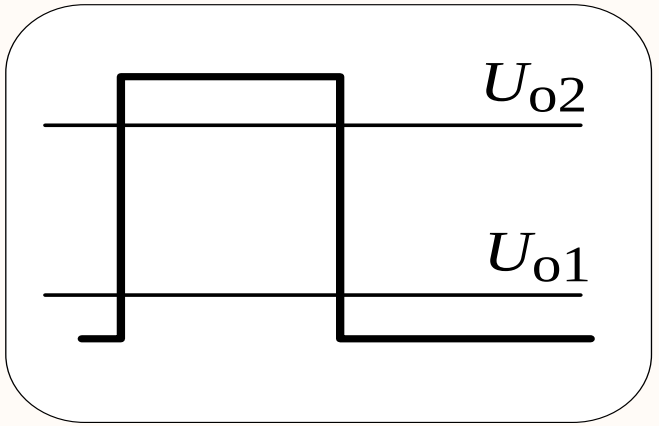
Результат измерения временного интервала равен: $t_{и} = (t_{з2} - t_{з1}) K_{рА}$

Автоматизированные аналоговые осциллографы с цифровыми измерительными блоками

Метод *сравнения с эталоном* – на экране создают пару меток или курсоров, расстояние между которыми известно.



а

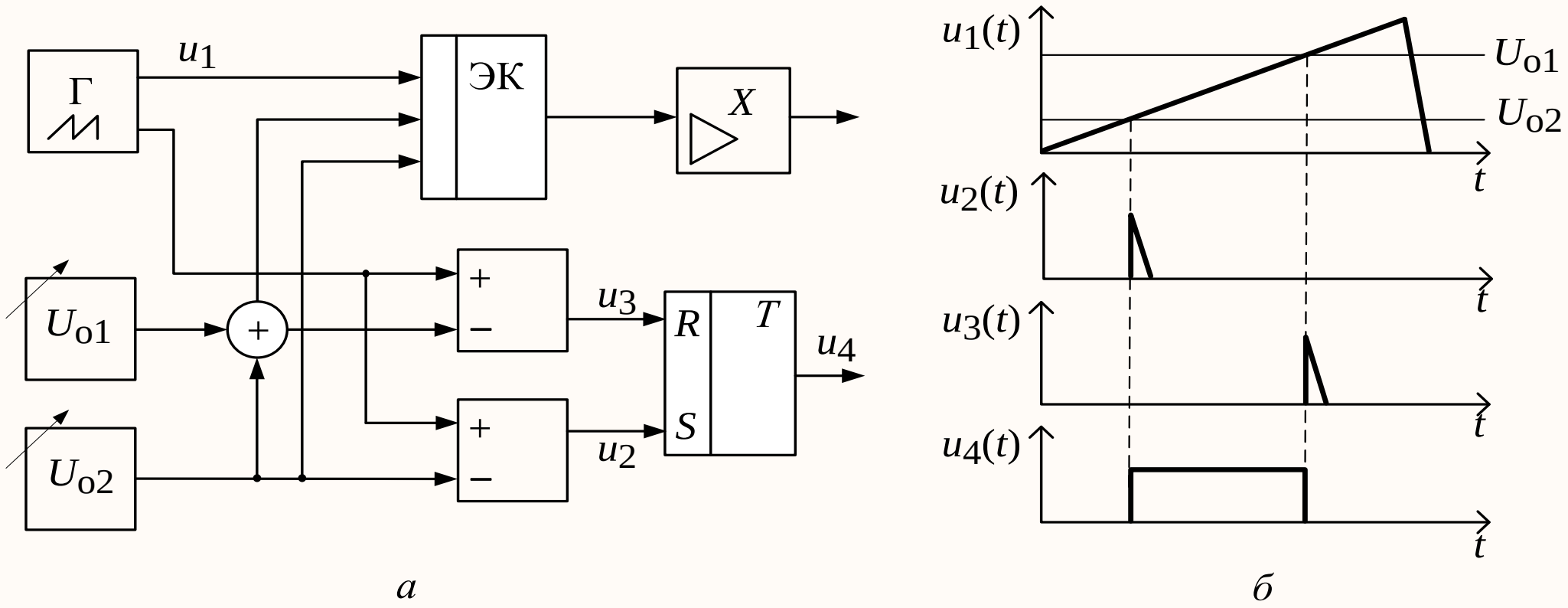


б

На экране образуется изображение сигнала и двух горизонтальных линий – *курсоров* (б).

Процесс измерения сводится к перемещению курсоров к нужным точкам изображения и отсчету значения измеряемого интервала напряжения по цифровому вольтметру.

Временные метки-маркеры можно создать с помощью схемы (а)

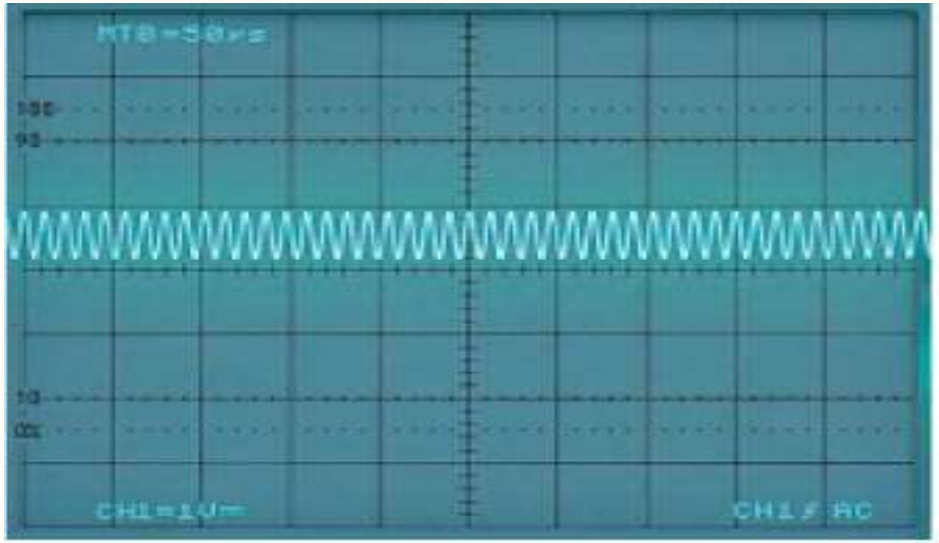


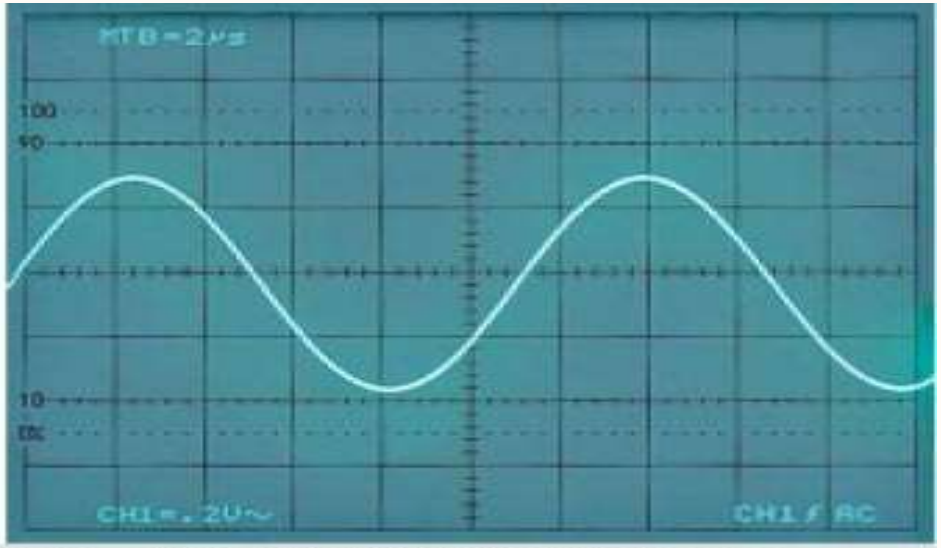
а *б*

На экране появляется изображение сигнала и две яркие точки- маркеры (или вертикальные линии - курсоры). На выходе компараторов образуются импульсы u2,u3, формирующие с помощью *RS*-триггера прямоугольный импульс u4. Длительность его соответствует расстоянию между точками пересечения линии развертки и опорных напряжений (б).

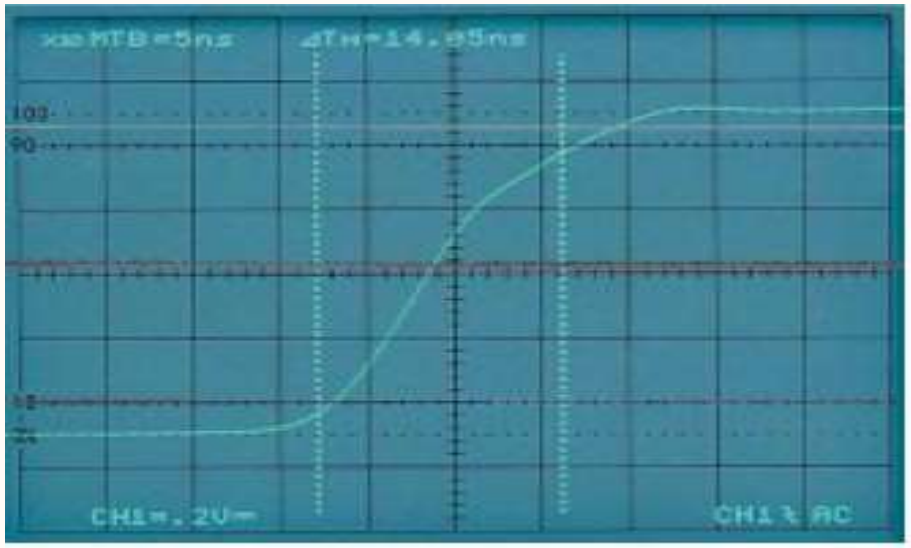
GoodWill GW Instek GOS-6200
Аналоговый осциллограф с цифровым блоком

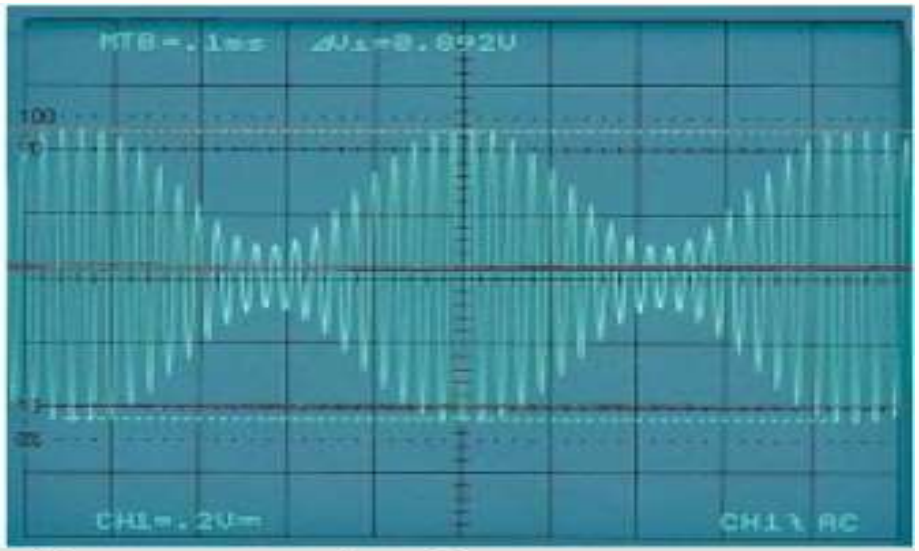






Режим автоустановки: Рис.1 - до включения режима, рис.2 - после включения режима





Курсорные измерения: по длительности (рис.1) и амплитуде (рис.2)

Аналоговый осциллограф Актаком-IWATSU АСК-7103 с цифровым блоком (100 МГц, 3 канала)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

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

**Факультет радиотехники
и телекоммуникаций**

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

***Кафедра Теоретических
основ радиотехники***

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Цифровой осциллограф (ЦО)

**Санкт-Петербург
2025 г.**

ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Принцип действия - преобразование мгновенных значений *аналогового* сигнала в поток *цифровых* данных, запоминаемых в ОЗУ и отображаемых на экране в виде массива точек. Процессы дискретизации сигнала и визуализация его формы **разделены** (в отличие от ЭЛО). *Разделены* блоки **оцифровки** входного сигнала и блоки **построения изображения**. Отсутствует сквозной тракт прохождения сигнала от входа до индикатора

Этот принцип - основа *цифровой осциллографии*, а реализующие его приборы называют *цифровыми осциллографами* (ЦО).

Моменты выборок значений сигнала (***дискретизация по времени***) определяются тактовой частотой АЦП (***Sampling rat***e). Обычно используют *равномерную* дискретизацию – отсчеты берутся через равные отрезки времени (интервалы дискретизации). Он определяет *разрешающую способность* ЦО по времени и, соответственно, быстродействие осциллографа.

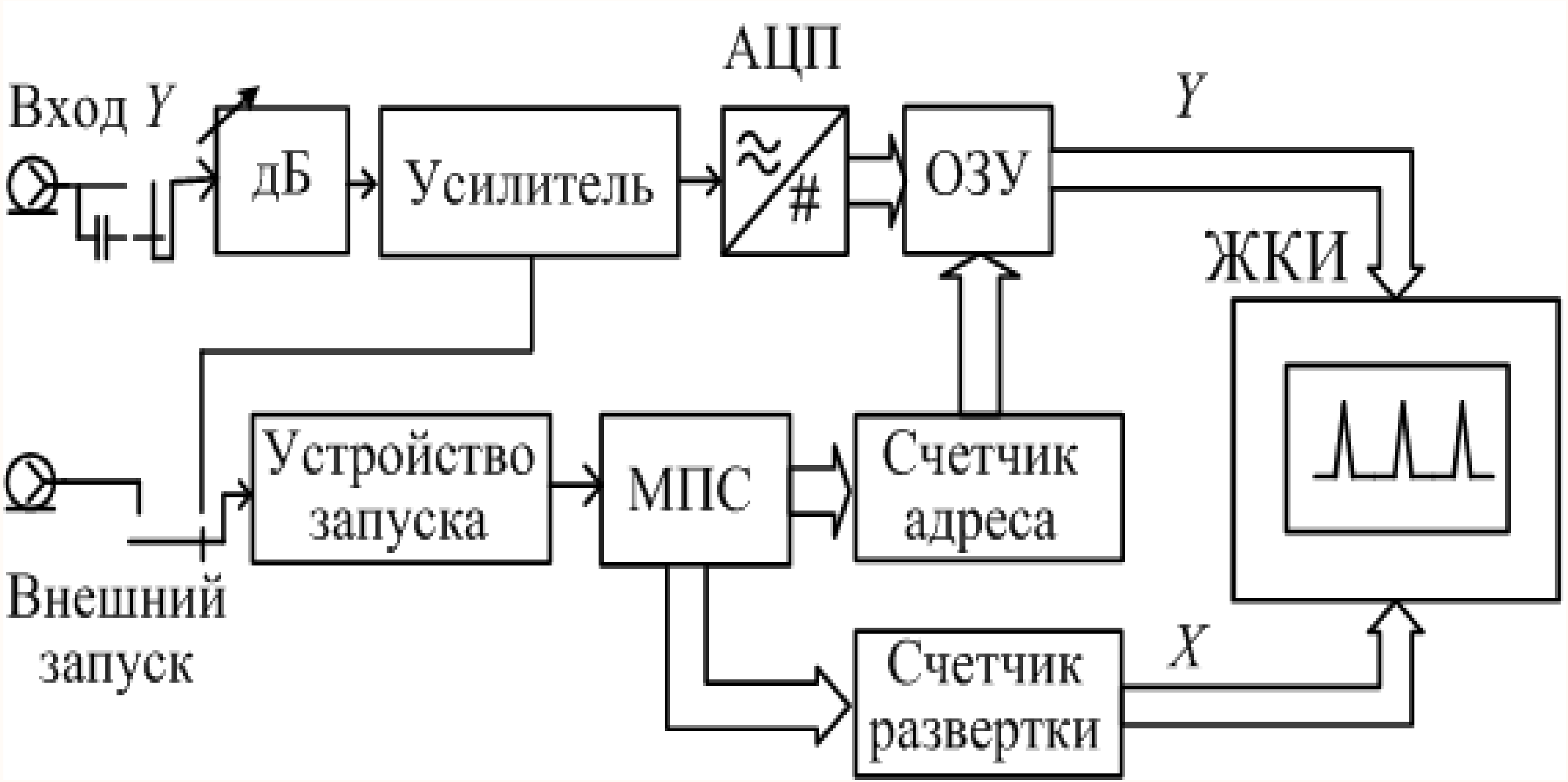
Дискретизация по уровню (***квантование***) определяется разрядностью АЦП. Разность между соседними уровнями (интервал квантования) задает *разрешающую способность* ЦО по уровню.

Построение осциллограммы – отсчеты последовательно извлекаются из ОЗУ. Они определяют *вертикальную* координату осциллограммы (номер строки дисплея). С помощью счетчика развертки вырабатываются линейно нарастающие коды, имитирующие ход осциллографической развертки. Эти коды определяют *горизонтальную* координату осциллограммы (номер столбца дисплея)..

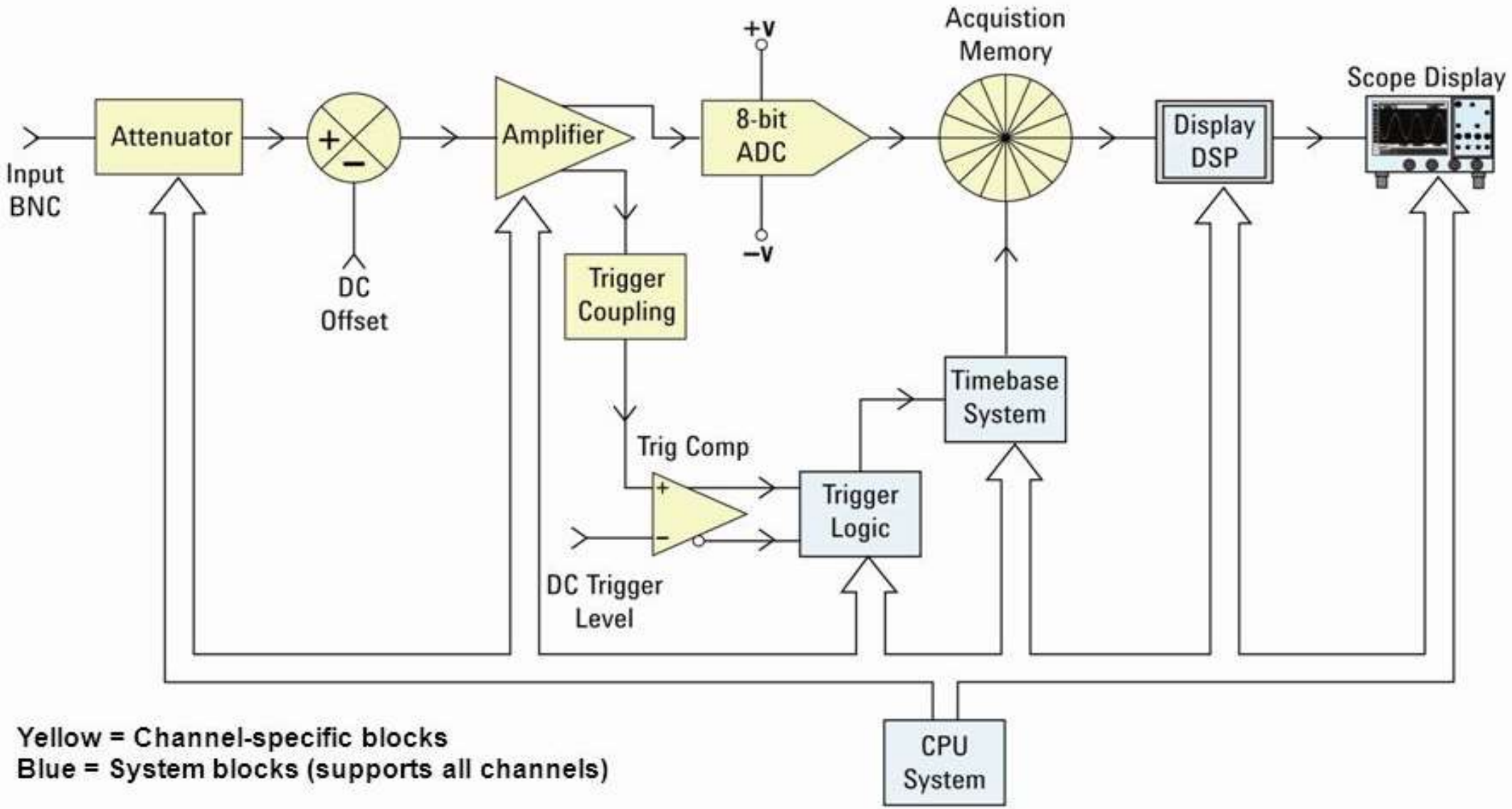
Цифровая осциллография обеспечивает:

- Возможность работы ЦО с одиночными и случайными сигналами. ЦО называют **Digital Storage Oscilloscope** (**DSO** -цифровые запоминающие осциллографы).
- Высокая точность измерения напряжения и временных интервалов.
- Расширенные возможности синхронизации и запуска.
- Возможность проведения косвенных измерений с индикацией результатов на экране.
- Передача данных на внешние устройства и подключение к измерительным системам.

Структурная схема цифрового осциллографа с матричным индикатором



Архитектура типового цифрового запоминающего осциллографа (DSO) фирмы Keysight Technologies



Принципы построения ЦО

1. Индикатор – чаще всего применяют матричные дисплеи на жидкокристаллических панелях (монохромные и цветные). ЭЛТ применяют редко, только в комбинированных аналого-цифровых ЭЛО и в некоторых бюджетных моделях ЦО.

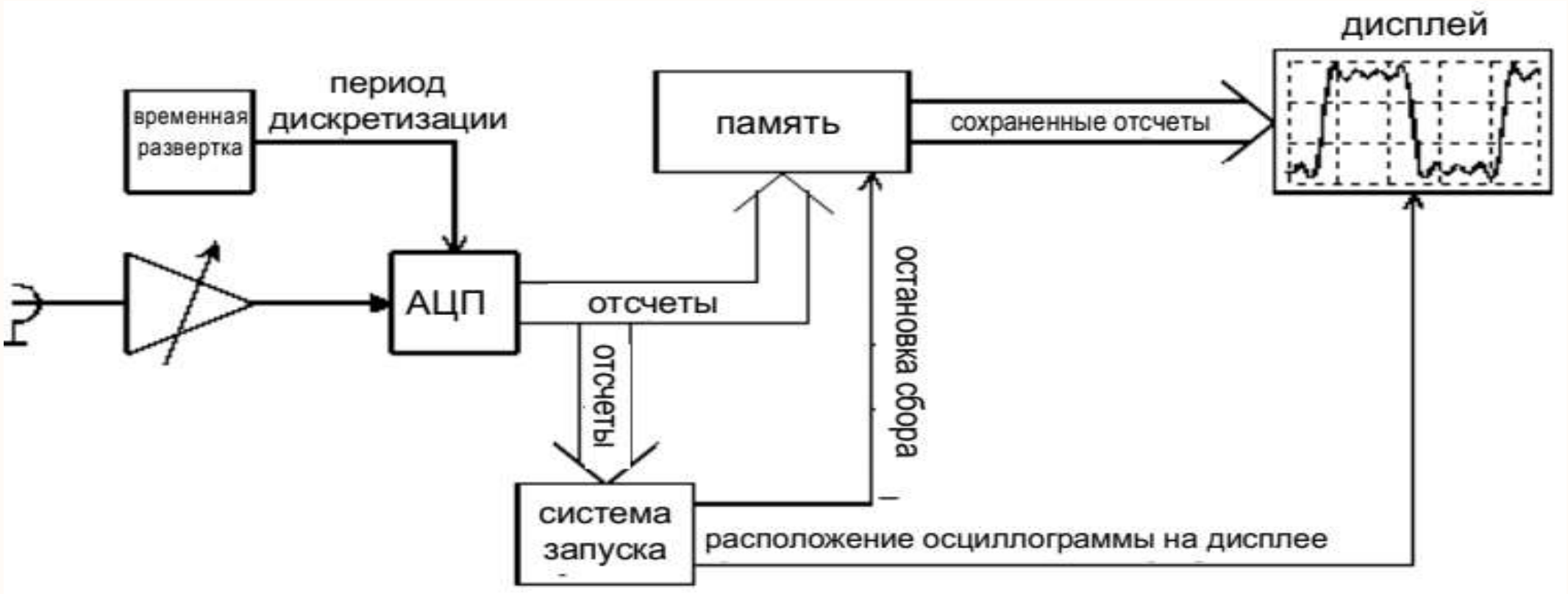
2. Момент начала формирования осциллограммы (запуск ЦО) задают:

- устройством синхронизации и запуска. На микропроцессор поступает импульс, соответствующий началу входного сигнала (или сигнала внешнего запуска).



Событие синхронизации и запуска (**trigger**) в ЦО - это *момент начала построения осциллограммы* (начало «развертки»). При выполнении условия запуска, устройство синхронизации и запуска вырабатывает импульс, по которому процессор формирует массив данных осциллограммы, выводимый на дисплей.

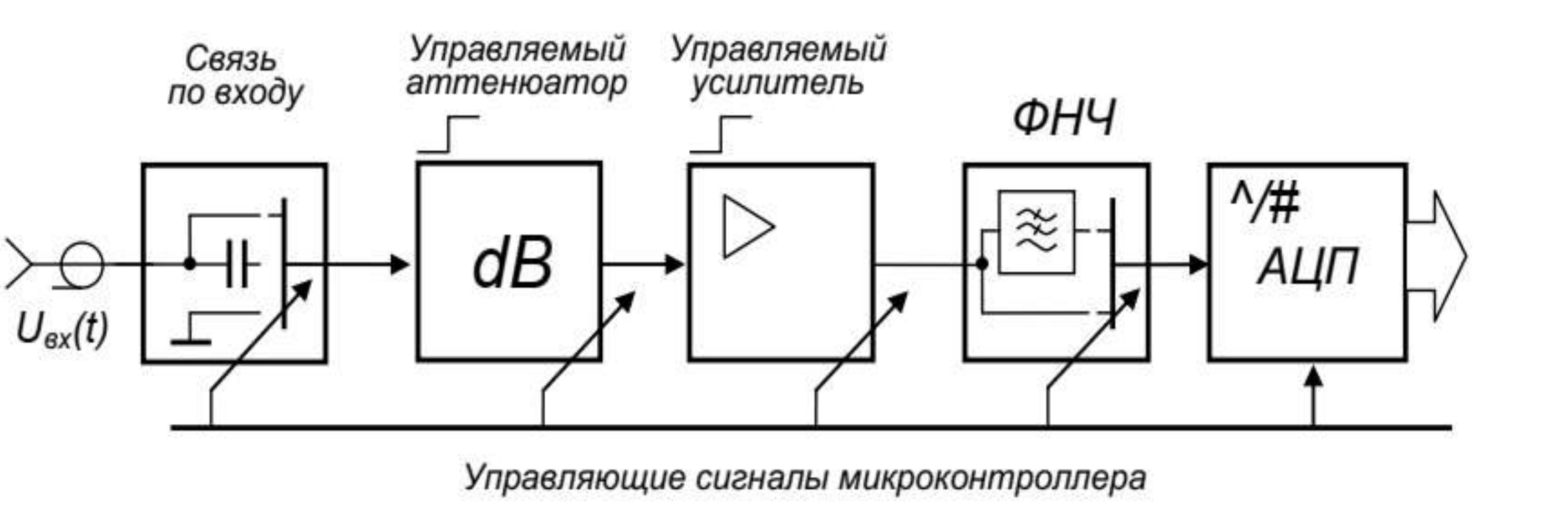
- Программными способами запуска на основе анализа цифрового сигнала в ОЗУ.



Программный способ запуска – начало «развертки» задается по фронту, срезу и их величине, по заданному уровню сигнала и др..
Синхронизация по длительности импульса – это запуск развертки по длительности импульса, меньшей, равной или большей выбранного значения.

ЦО имеют режим синхронизации и запуска телевизионным сигналом по всем строкам, по выбранным строкам, по нечетным и четным полям, по всем полям композитного видеосигнала телевещательных стандартов (NTSC, PAL, SECAM). Для исследования цифровых сигналов применяют запуск по кодовому слову, по заданному количеству импульсов, по сигналам шин интерфейсов (USB, CAN, I2C и др.).

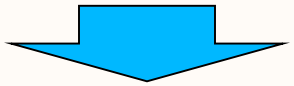
Упрощенная схема канала Y цифрового осциллографа



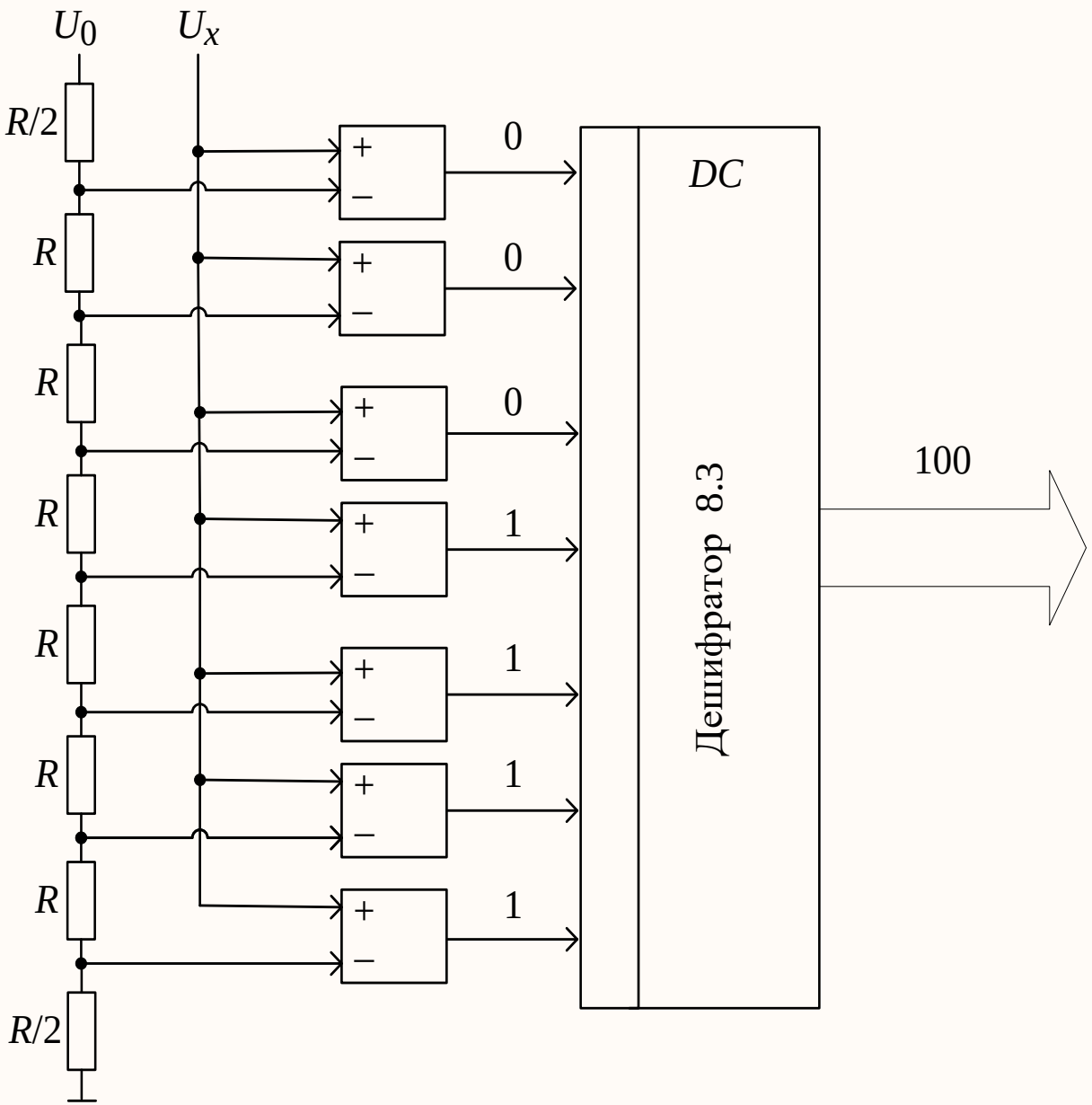
В канале Y ЦО достаточно одного усилителя (оконечный не нужен) . Не нужна и линия задержки в канале Y. Перед АЦП необходим ФНЧ для исключения появления «ложных» изображений в случае сигналов, частота которых превышает половину тактовой частоты АЦП (частоты Найквиста)

Для оцифровки используют быстродействующие АЦП (параллельного типа, поразрядного уравновешивания). Частота дискретизации от десятков МГц до сотен МГц (в дешевых моделях) и до единиц и даже десятков ГГц (в ЦО СВЧ диапазона).

Для отображения сигнала по вертикали на экране необходимо иметь, как минимум, 2 точки на 1 мм. Экран средних размеров имеет высоту 100…120 мм. Следовательно на экране по вертикали должны располагаться 200 …240 точек. Таким образом, для формирования хорошего изображения АЦП должен иметь не менее 8 двоичных разрядов (256 точек по вертикали) . Увеличение разрядности (до 10..12 бит) снижает быстродействие АЦП и – следовательно – рабочую полосу частот.



Пример быстродействующего АЦП; 3-х разрядный параллельный АЦП



Каждый компаратор сравнивает входное напряжение *Ux* с последовательно увеличивающимися порогами

$$U_n = U_{n-1} + \Delta U$$

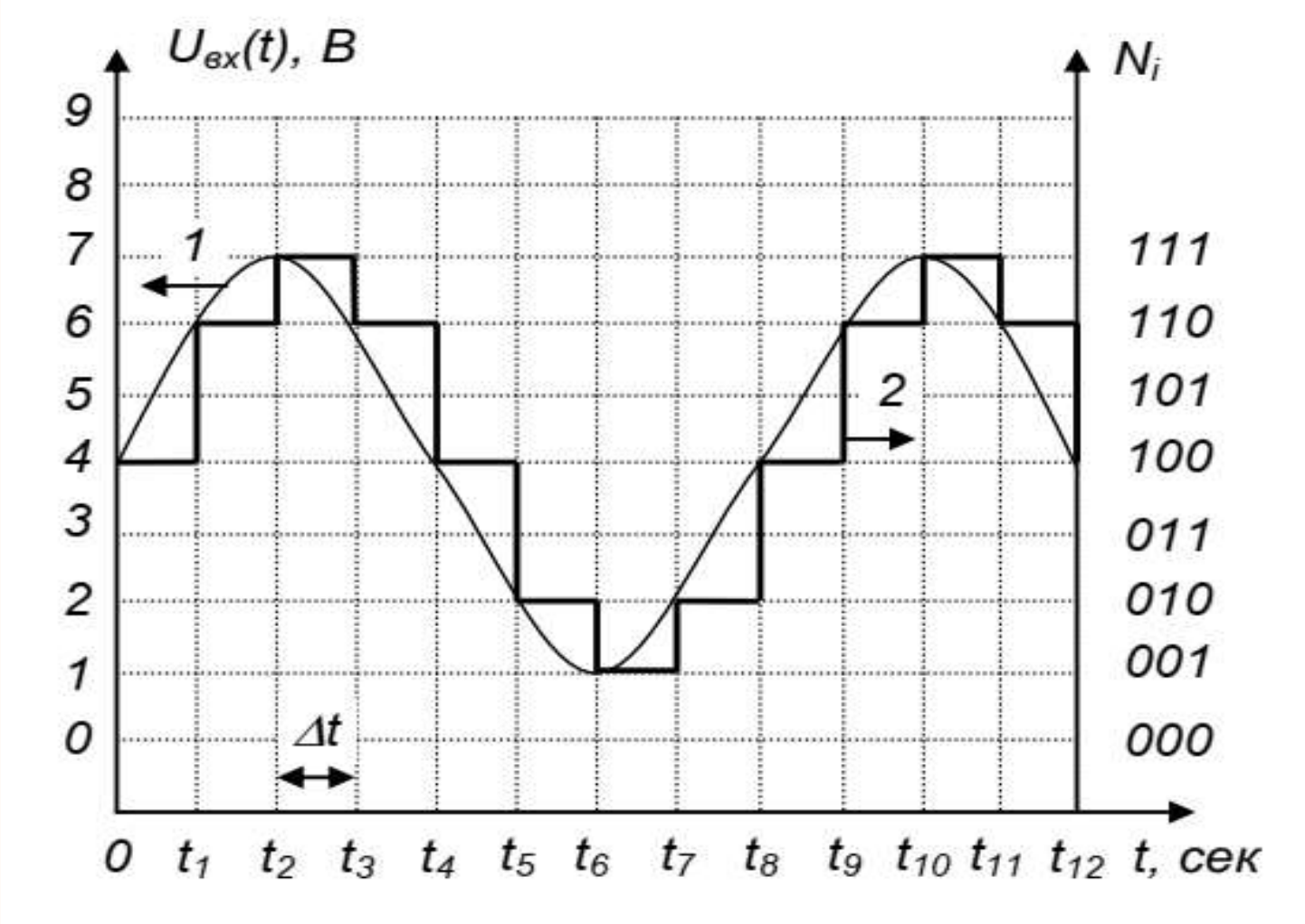
$$\Delta U = U_0 / 2^k$$

k – двоичная разрядность АЦП.

Для 3-разрядного АЦП требуется $2^3 - 1 = 7$ компараторов. Для 8-разрядного АЦП их потребуется уже 255!

Сигналы на выходе линейки компараторов ведут себя аналогично положению столбика термометра (*термометрический* код). Для приведения его к двоичному виду используют *дешифратор*.





Быстродействие параллельных АЦП ограничено скоростью сравнения напряжений в компараторах. Из-за большого количества компараторов параллельные АЦП громоздки и потребляют значительную мощность.

Более экономичны *АЦП поразрядного уравновешивания*, хотя они менее быстрые. Комбинация нескольких АЦП, работающих с сдвигом по времени (*конвейерные АЦП*), позволяет значительно увеличить эффективную частоту дискретизации.

Для двухканальных осциллографов частота дискретизации обычно вдвое меньше, чем для одноканальных, меньше и объем памяти, выделенной на канал.

Память ЦО можно разделить на: быстрое буферное ОЗУ (БОЗУ) и медленное ОЗУ (МОЗУ).

Кол-во выборок	Номер ячейки												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	100												
2	110	100											
3	111	110	100										
4	110	111	110	100									
5	100	110	111	110	100								
6	010	100	110	111	110	100							
7	001	010	100	110	111	110	100						
8	010	001	010	100	110	111	110	100					
9	100	010	001	010	100	110	111	110	100				
10	110	100	010	001	010	100	110	111	110	100			
11	111	110	100	010	001	010	100	110	111	110	100		
12	110	111	110	100	010	001	010	100	110	111	110	100	
13	100	110	111	110	100	010	001	010	100	110	111	110	100

БОЗУ осуществляет прием данных от АЦП с частотой дискретизации входного сигнала. Построено по принципу FIFO - при записи «нового» отсчета исчезает самый «старый».

МОЗУ – это ОЗУ микропроцессорной системы. Используется для хранения результатов вычислений и обработки входных отсчетов, данных изображения (видеопамять) и пр.

Объем БОЗУ определяет максимальное количество точек, которыми может быть представлен исследуемый сигнал. Требуемая длина памяти (Record Length – длина записи или Memory Depth – ***ГЛУБИНА ПАМЯТИ***) связана с установленным в данный момент коэффициентом развертки Kр и частотой дискретизации fд

$$Memory\ Depth = K_{\text{р}} \cdot 10 \cdot f_{\text{д}}$$ размер шкалы = 10 делений).

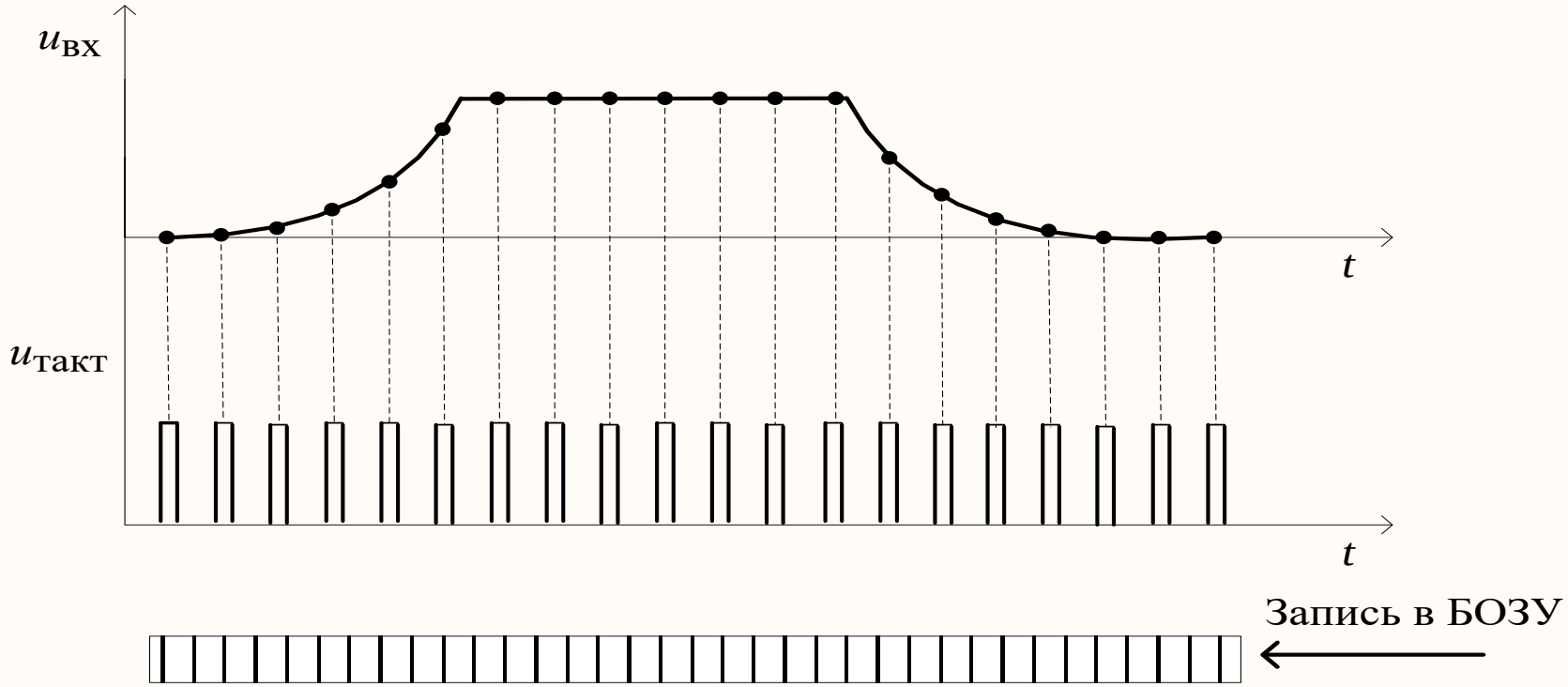
Для больших коэффициентов развертки (например, при наблюдении медленных сигналов) объем памяти БОЗУ может оказаться мал. В этом случае снижают частоту дискретизации сигнала.

Пример: сигнал 50 Гц (период 20 мс), частота дискретизации 500 МГц. На период приходится 10 млн отсчетов, то есть нужно иметь глубину 8-битной памяти не менее 10 Мб.

Режимы работы **цифрового осциллографа**

Основные режимы работы ***блока развертки*** *ЦО*.:

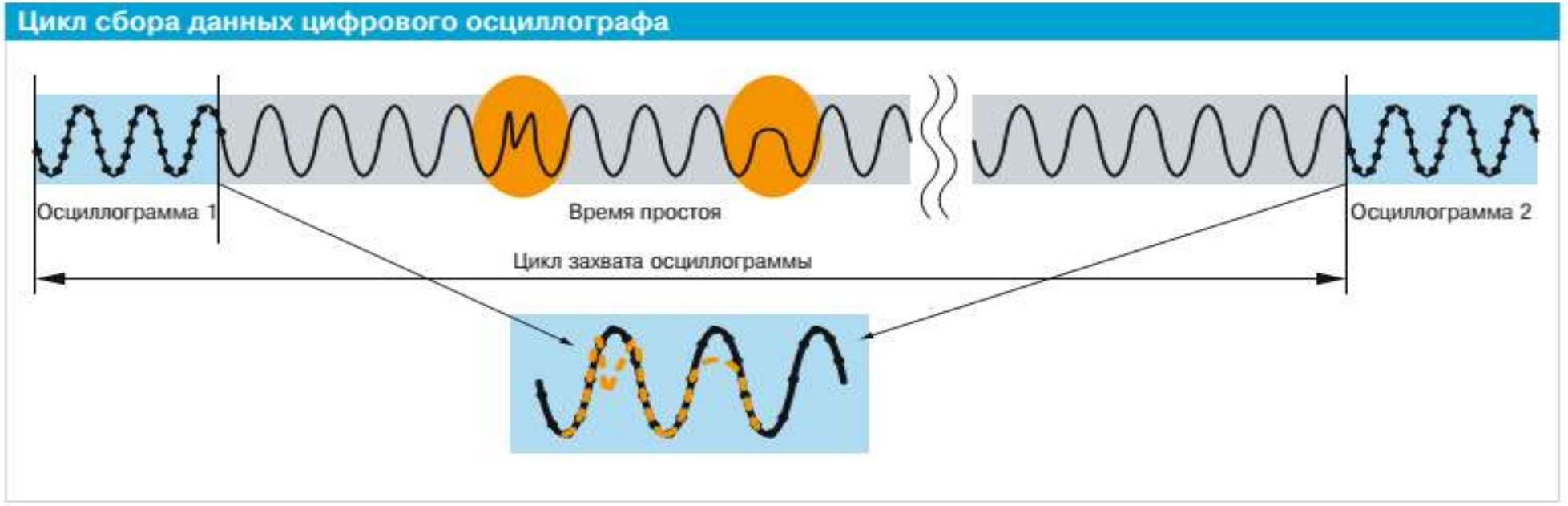
1. Наиболее простой режим непрерывной развертки имитирует работу самописца (***ROLL*** mode). Отсчет входного сигнала записывается в БОЗУ и одновременно выводится в правом краю экрана. При поступлении следующего отсчета осциллограмма сдвигается на один столбец влево и процесс повторяется. Осциллограмма на экране смещается справа налево, имитируя движение ленты самописца. Применяют при медленных развертках.



2. Режим одиночной развертки (***SINGLE SHOT*** mode). Строится ОДИН кадр при возникновении события запуска (нажатие кнопки ПУСК, подача внешнего сигнала). Размер кадра по горизонтали (длительность осциллограммы) задают установкой **коэффициента развертки,** который определяет количество отсчетов, выводимых на экран. Кадр остается на экране, но АЦП и ОЗУ могут продолжать работать в режиме сбора данных.

3. Для наблюдения периодических и повторяющихся сигналов используют повторяющийся режим развертки (***REFRESH*** mode). Этот режим аналогичен автоколебательному или ждущему режимам ЭЛО. В автоколебательном режиме запуска ***(AUTO)*** кадры изображения непрерывно строятся даже в отсутствие события запуска. В ждущем режиме ***(NORMAL)*** кадр строится только при появлении события запуска. В отличие от ЭЛО между событиями запуска на экране сохраняется предыдущий кадр изображения!!!.

Важный параметр – скорость обновления осциллограмм Vosc в режиме периодической развертки. Это *количество выводимых на дисплей кадров за единицу времени (например*. 10^3…10^6 в секунду). Определяет «мертвое время» (*dead time*) ЦО, в течение которого значения сигнала на экран не попадают



Если время развертки сигнала = 10* *Кр* (время захвата, acquisition time), то «мертвое» время составляет

$$DeadTime,\% = \frac{1/Vosc - K_{\text{р}} \cdot 10}{1/Vosc} \cdot 100\%$$

Среднее время измерений, необходимое для отображения ошибки сигнала (как функция частоты ошибок и скорости сбора данных)

Частота ошибок	Скорость сбора данных [осциллограмм/с]			
	100	10 000	100 000	1 000 000
100/с	1 ч : 55 мин : 08 с	1 мин : 09 с	6,9 с	0,7 с
10/с	19 ч : 11 мин : 17 с	11 мин : 31 с	1 мин : 09 с	6,9 с
1/с	7 дней : 23 ч : 52 мин : 55 с	1 ч : 55 мин : 08 с	11 мин : 31 с	1 мин : 09 с
0,1/с	79 дней : 22 ч : 49 мин : 15 с	19 ч : 11 мин : 17 с	1 ч : 55 мин : 08 с	11 мин : 31 с

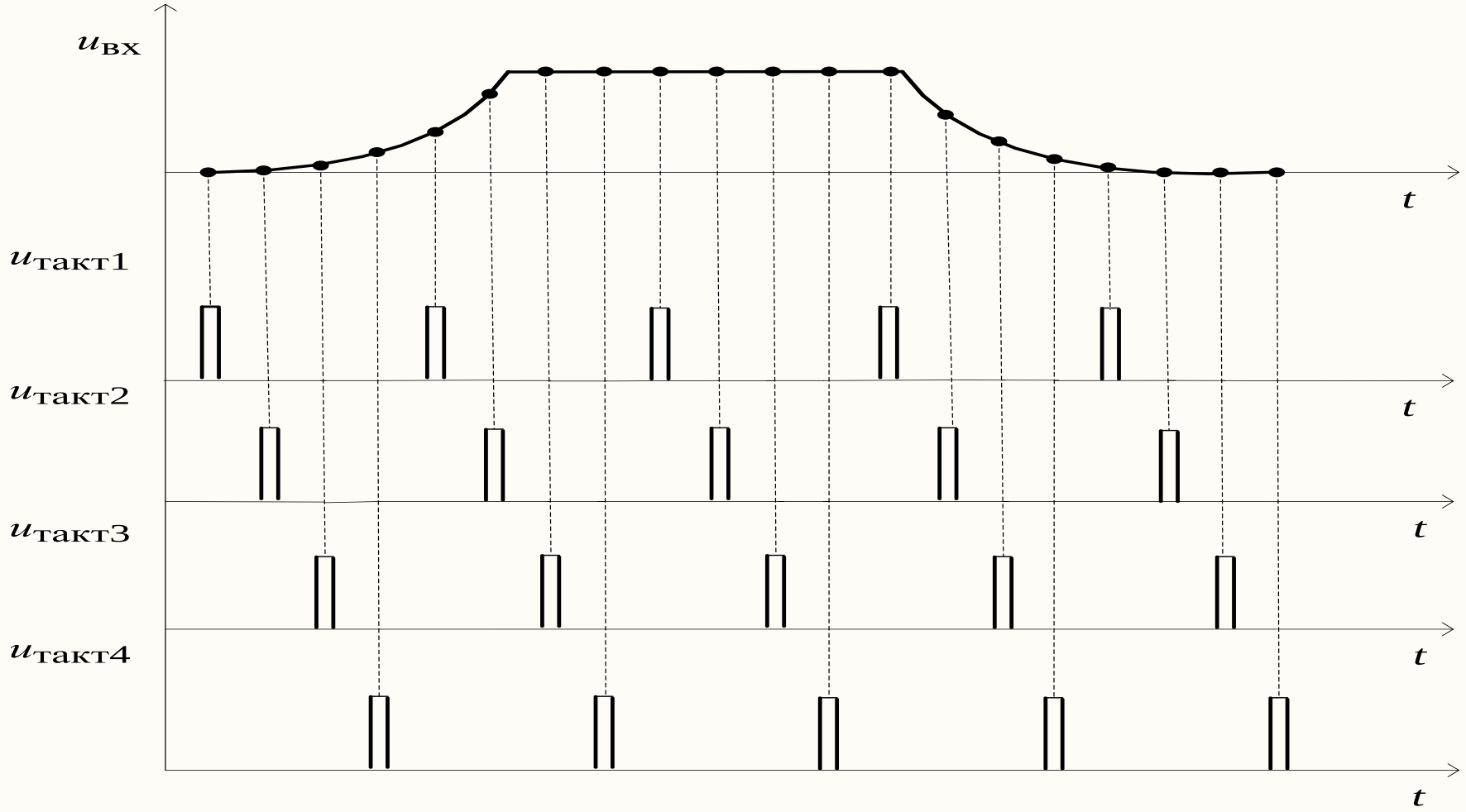
10 ГГц; длина записи 1000 отсчетов; 10 нс/дел.; вероятность обнаружения ошибки 99,9 %.

Цифровой осциллограф не способен зарегистрировать фрагменты сигнала (помехи, «глитчи», «рампы» и пр.), возникающие во время построения осциллограммы (в «мертвое» время). Требуется повторять осциллографирование сигнала , что увеличивает время сбора данных

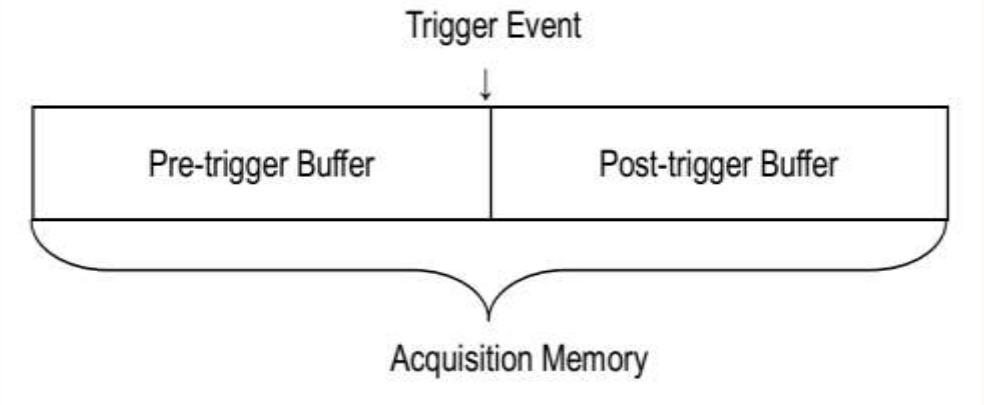
Каково влияние «мёртвого» времени?

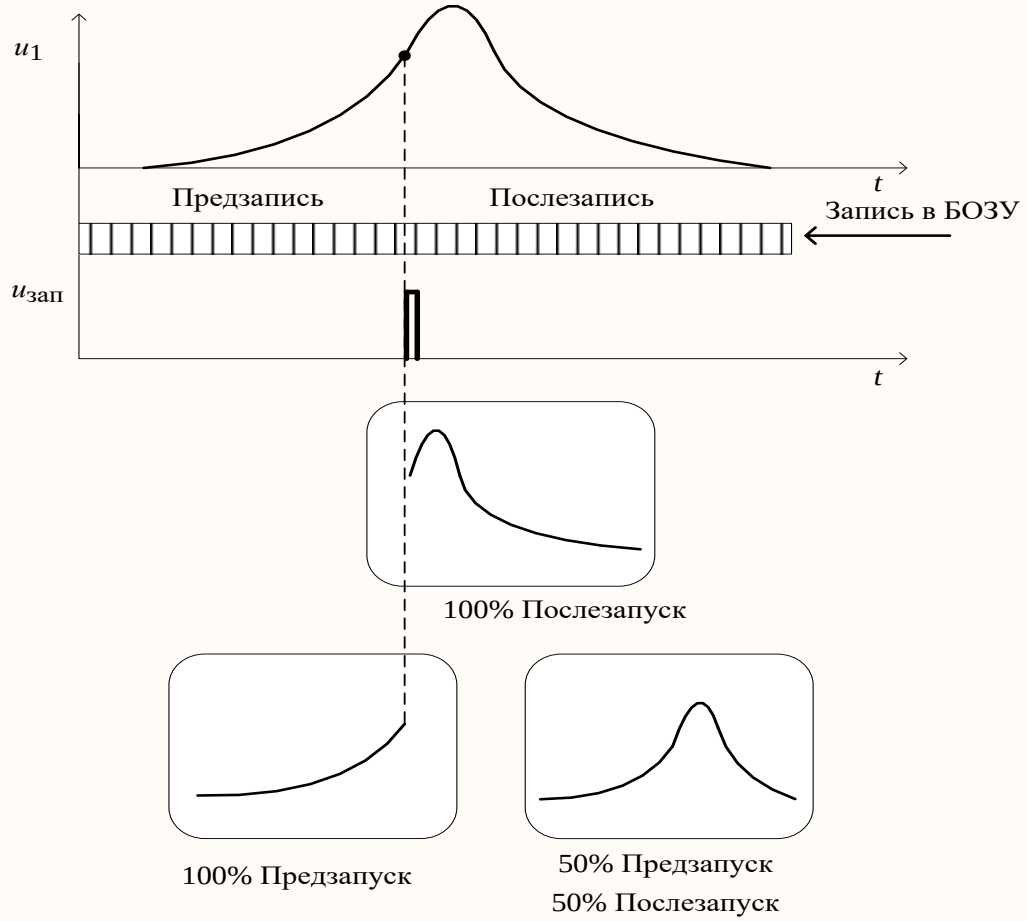
- события в сигнале, возникающие в «мертвое время», не будут не будут отображены. Они остаются невидимыми для пользователя. У широкополосного цифрового осциллографа **время активного сбора** данных может быть в ряде случаев меньше 1 …10%
- Снижается быстрота реагирования прибора. После изменения настроек, требующих нового цикла сбора данных, пользователь ждать, пока результат этого изменения отобразится на экране
- Значительно уменьшается время сбора данных (и увеличивается «мертвое время») при использовании вычислительных операций над изображением: математических и курсорных функций, функций масштабирования и пр.

4. Режим эквивалентного времени (***EQUIVALENT TIME*** mode) применяют, когда количество отсчетов **одной копии** сигнала на экране в режиме реального времени становится малым. В режиме эквивалентного времени осциллограмма строится на основе данных оцифровки **нескольких копий сигнала**



Построение осциллограммы сигнала в режиме эквивалентного времени





5. Режимы «***предзапуска***» и «***послезапуска***». Событие запуска делит содержимое БОЗУ на буфер предпусковых данных Pre-trigger Buffer (предзапись) и буфер послепусковых данных Post-trigger Buffer (послезапись). Режим запуска ЦО по умолчанию – 50% предзапись – 50% послезапись (точка запуска в центре экрана).

Если при построении изображения сделать положительный сдвиг адресов БОЗУ, то на экране появится фрагмент сигнала, *предшествующий* запуску (предзапуск). Сдвиг адресов в другую сторону позволяет получить *задержанный* относительно события запуска сигнал. (послезапуск)

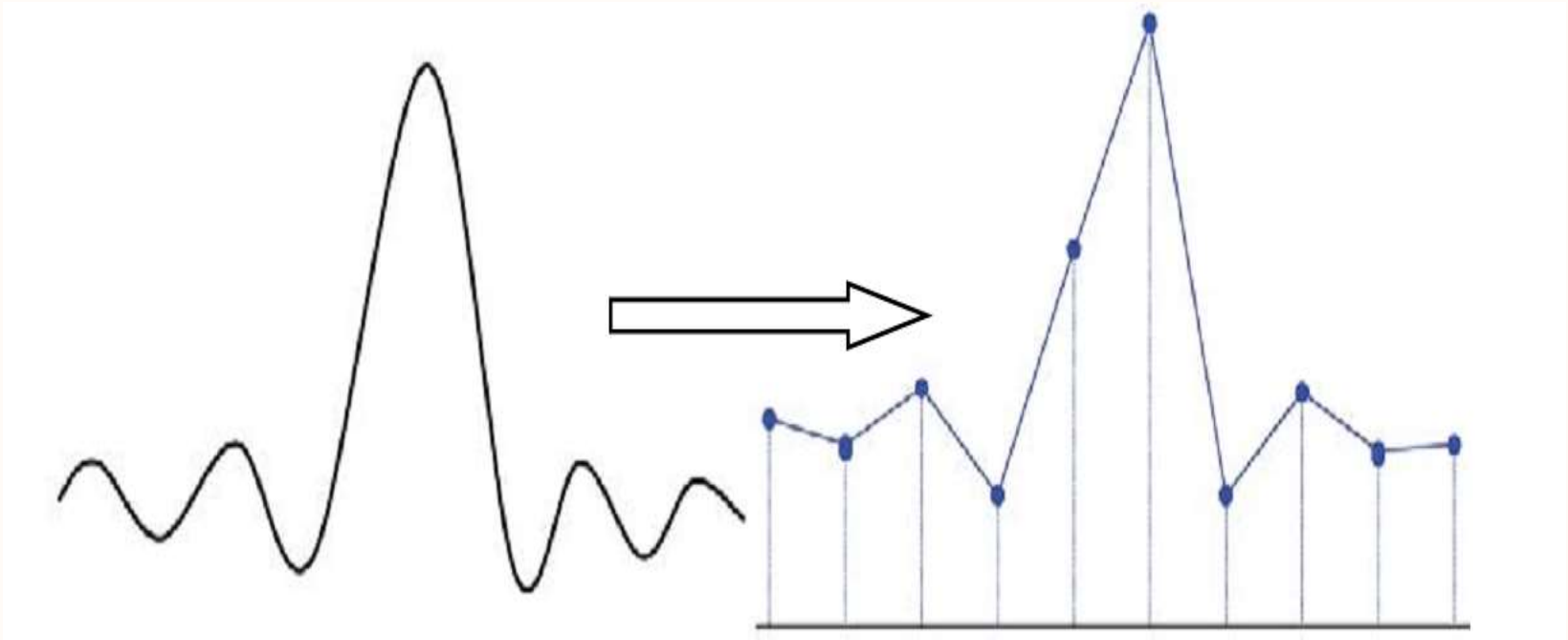
6. Режим запоминания сигнала Реализуется при последовательном запуске АЦП (sequense mode). Буфер данных (БОЗУ) полностью заполняется («захват сигнала») , после этого сбор данных прекращается (отключается БОЗУ от АЦП или приостанавливается работа АЦП). Весь буфер БОЗУ при этом доступен для просмотра с выводаом на экран осциллограмм в произвольном масштабе (с растяжкой и сжатием – режим ZOOM, со смещением по времени), с математической обработкой данных и пр.. Возможет вывод на экран нескольких осциллограмм одновременно (с наложением) или последовательности различных во времени кадров

Режимы построения изображения на экране ЦО

Значение числа, записанного в конкретную ячейку памяти, определяет координату «Y», а номер этой ячейки определяет координату «X» точки, отображаемой на экране.

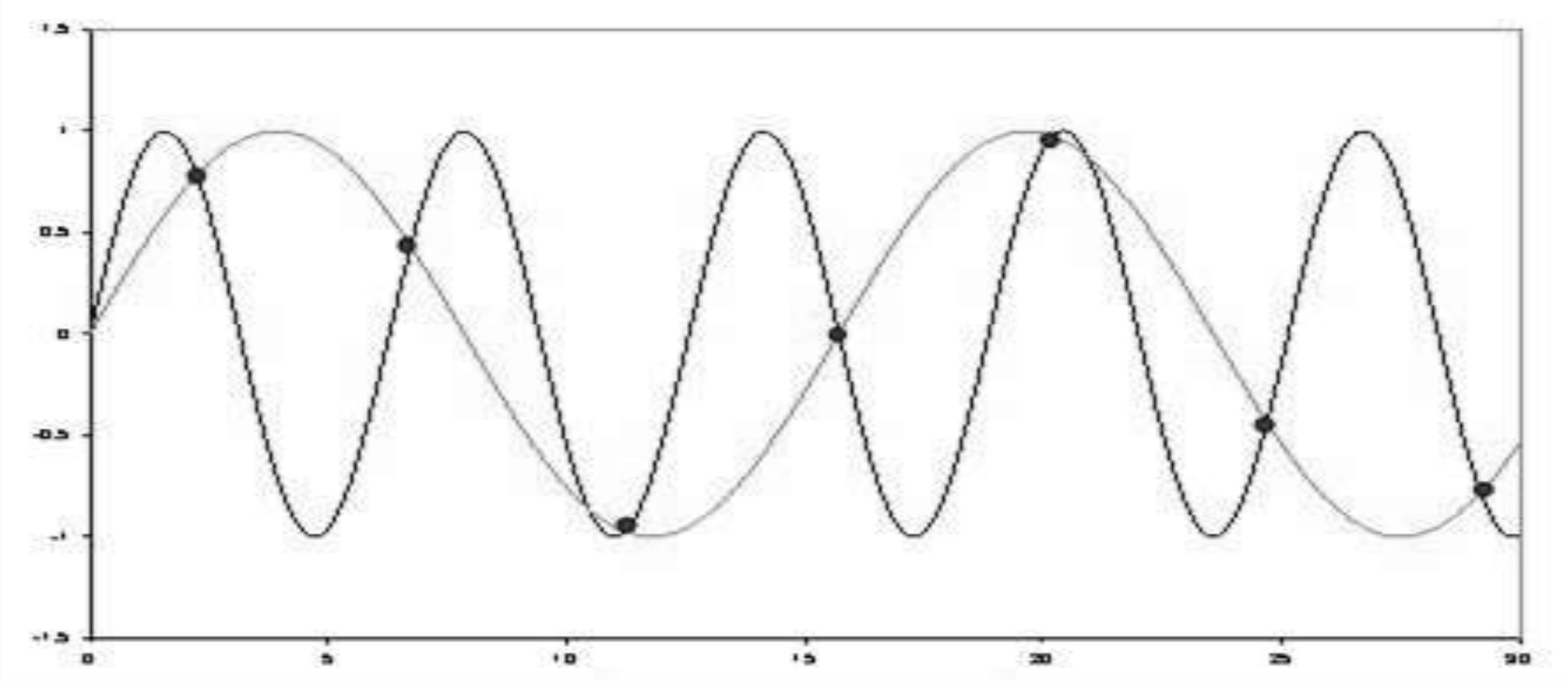
При **малом** количестве отсчетов возможны:

1. Искажение формы сигнала (Waveform Distortion)



2. Появление ложного изображения формы сигнала (Waveform Confusion)

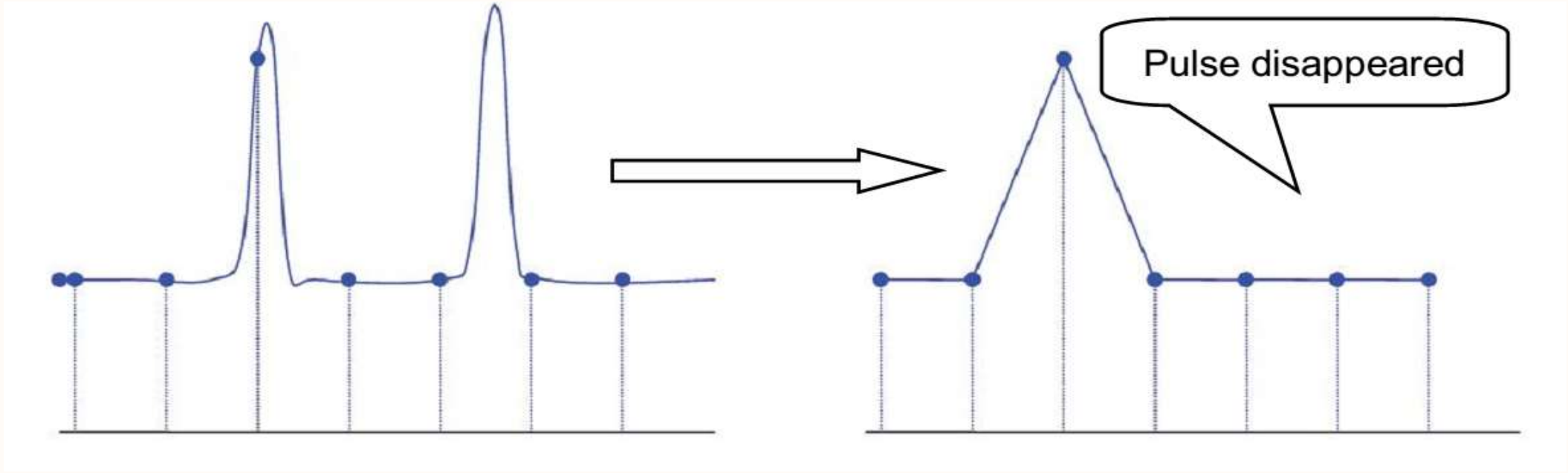
При осциллограмме в виде точек реконструкция формы сигнала происходит визуально, путем мысленного соединения ближайших точек. При малом количестве отсчетов возможен эффект «наложения», когда глаз оператора конструирует ложное изображение (alias).



3. Расширение импульсных сигналов (Waveform Leakage)

Напомним, что частота дискретизации $f_д$ по теореме Котельникова связана с верхней граничной частотой спектра сигнала fв, форму которого можно восстановить без искажения (fд > 2fв)..

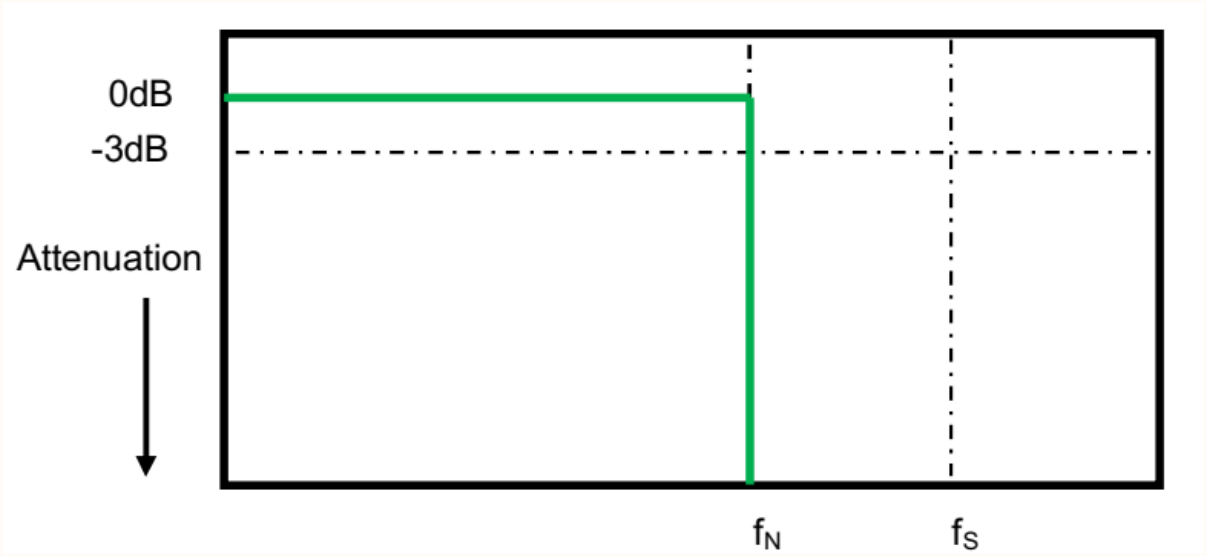
При малом количестве отсчетов из-за искажения формы сигнала его параметры будут измерены неточно (длительность импульса, его амплитуда определяются по осциллограмме с погрешностью)

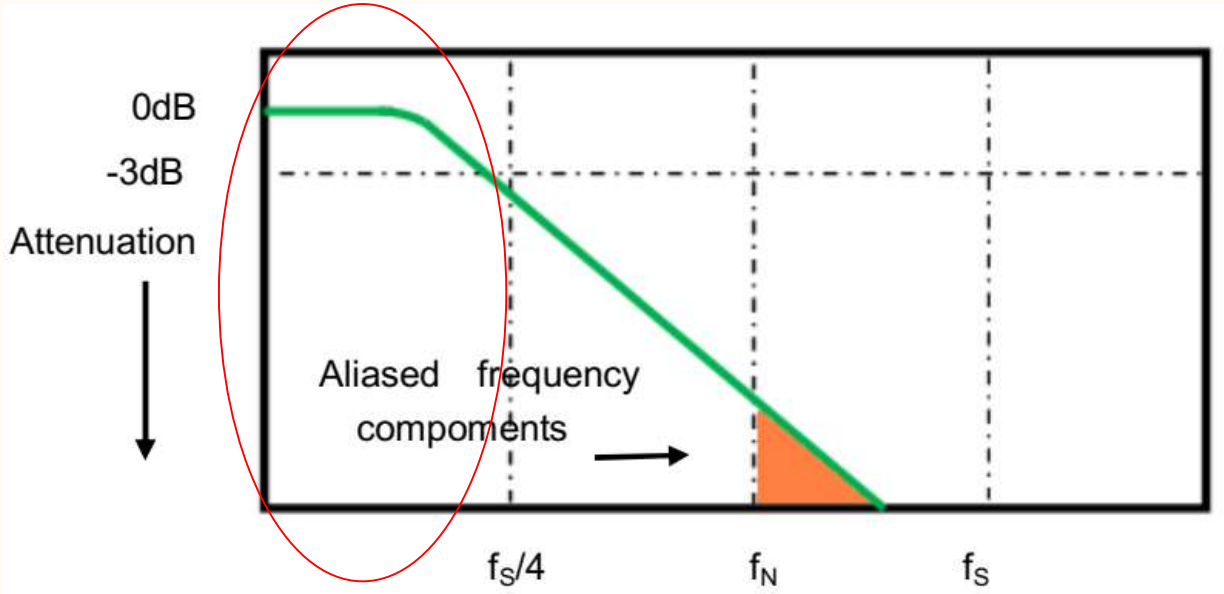


Полоса пропускания ЦО

Определяется верхней граничной частотой, при которой спад амплитуды синусоидального сигнала составляет 3 дБ (0.707) По теореме Котельникова надо (fд > 2fв) и выше этой частоты спектральных составляющих быть не должно. Требуется идеальная прямоугольная АЧХ ЦО

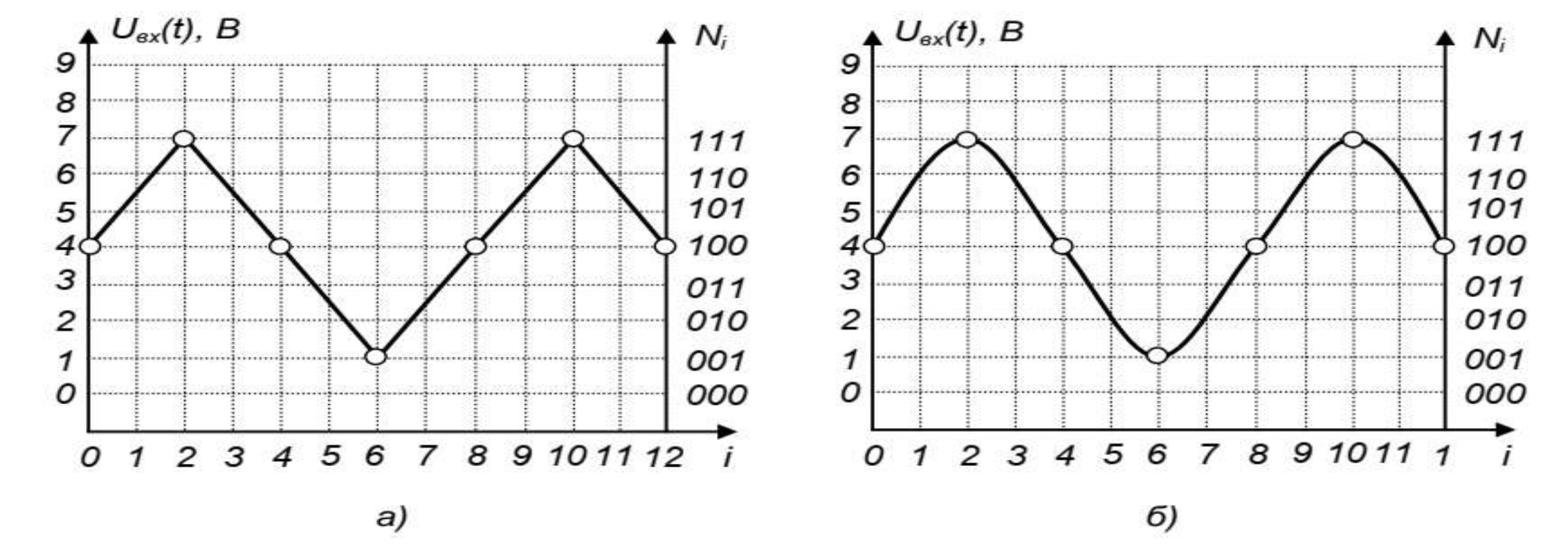
У реального ЦО АЧХ спадает по закону Гаусса Для сложных сигналов часть спектра лежит выше частоты Найквиста. Поэтому верхняя граничная частота должна быть меньше частоты дискретизации минимум в 4 раза



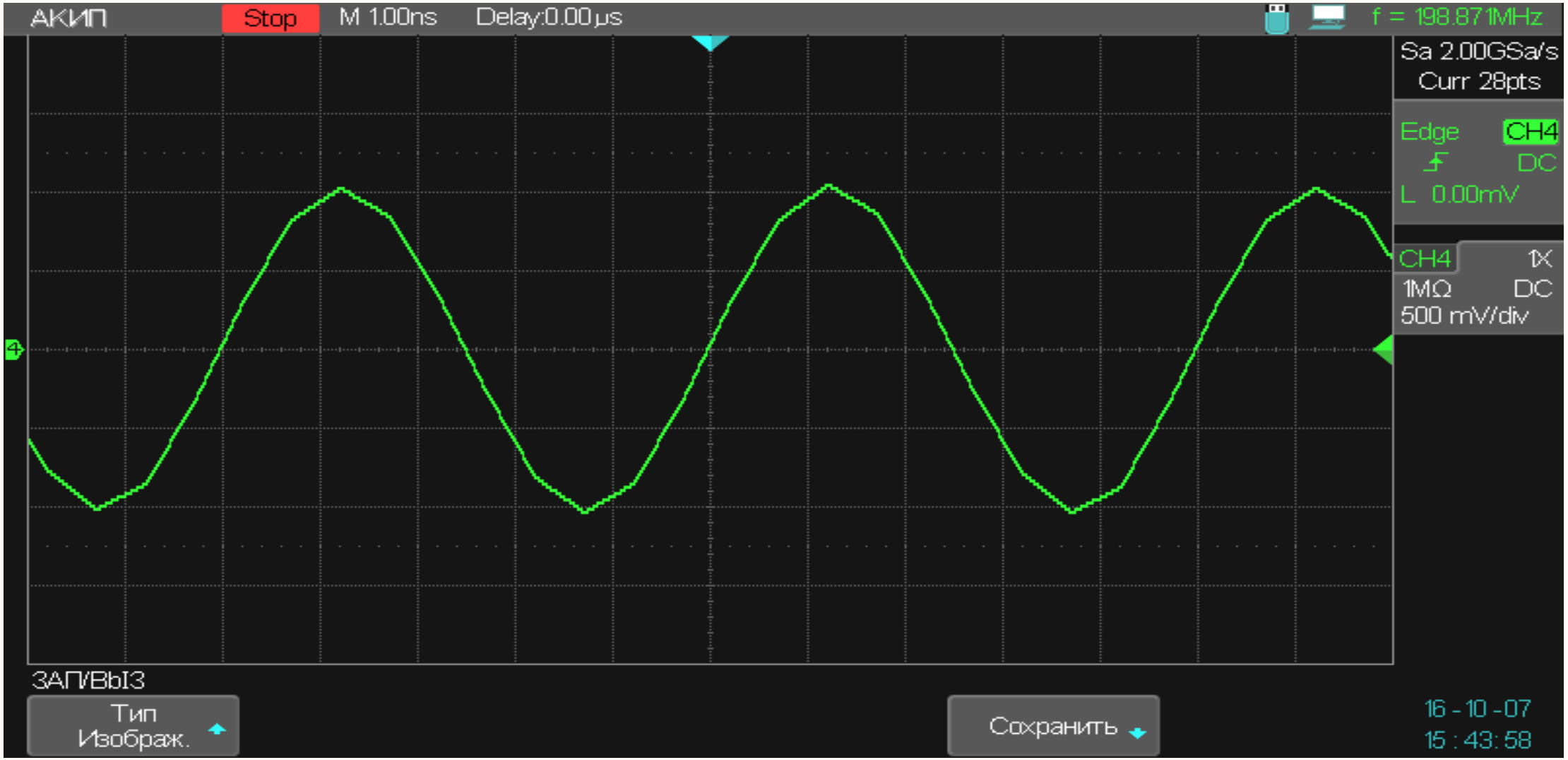


Чтобы избежать эффекта наложения в режиме поточечного (dots) построения изображения, частота дискретизации должна быть в **10 – 20 раз** выше частоты сигнала.

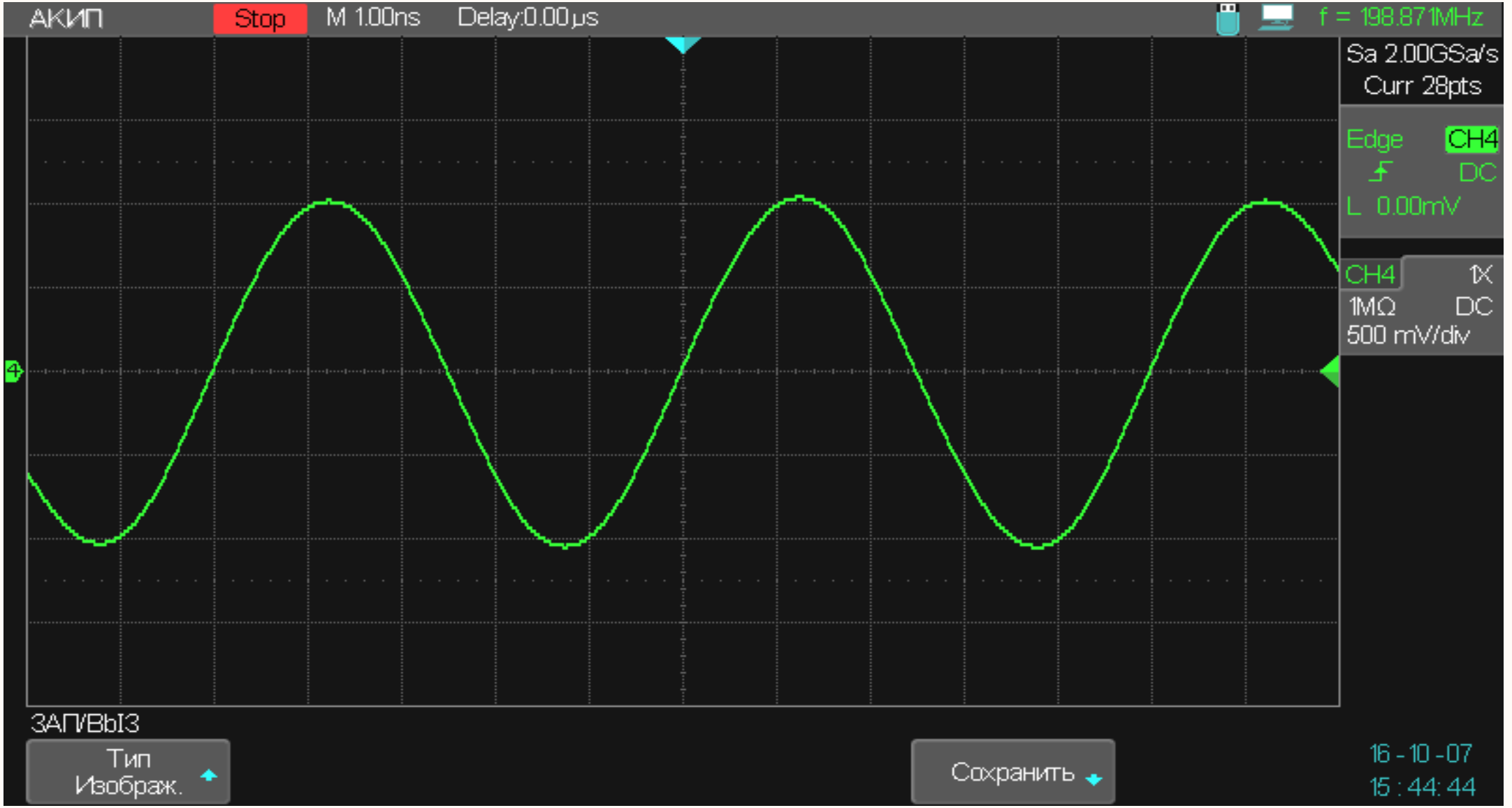
В случае **недостаточного количества** точек необходимо использовать режим интерполяции. В ЦО обычно применяют два метода – линейную (а) и синусоидальную (б) интерполяции.



При линейной интерполяции в осциллограмму добавляются точки, расположенные на прямой линии между отсчетами сигнала. При этом для получения качественного изображения достаточно выполнять условие fд > 10fв. Линейная интерполяция больше подходит к импульсным сигналам.



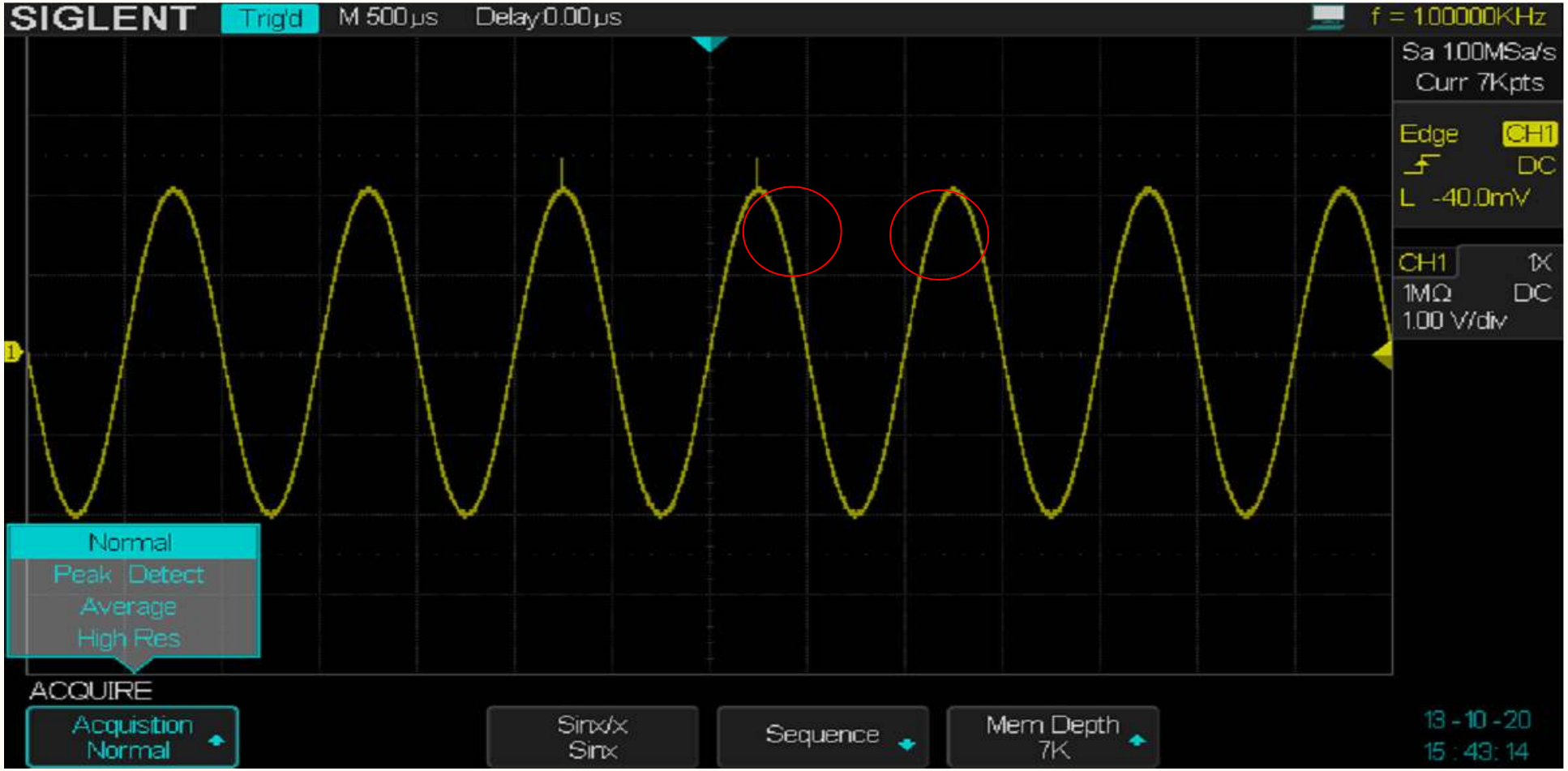
Для гладких сигналов используют синусоидальную интерполяцию типа “sin(x)/x”, которая позволяет получить приемлемое качество изображения уже при fд >(3 – 4)fв. Применение интерполяции *снижает скорость вывода осциллограмм* на экран.



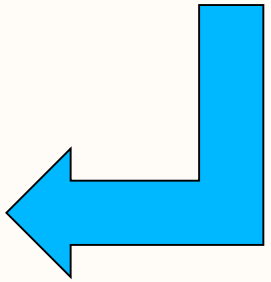
При **большом количестве** отсчетов :

На каждую точку изображения приходится выборка отсчетов, размер которой зависит от выбранного временного масштаба и частоты дискретизации. Если размер выборки >1, требуется ее прореживание (децимация).

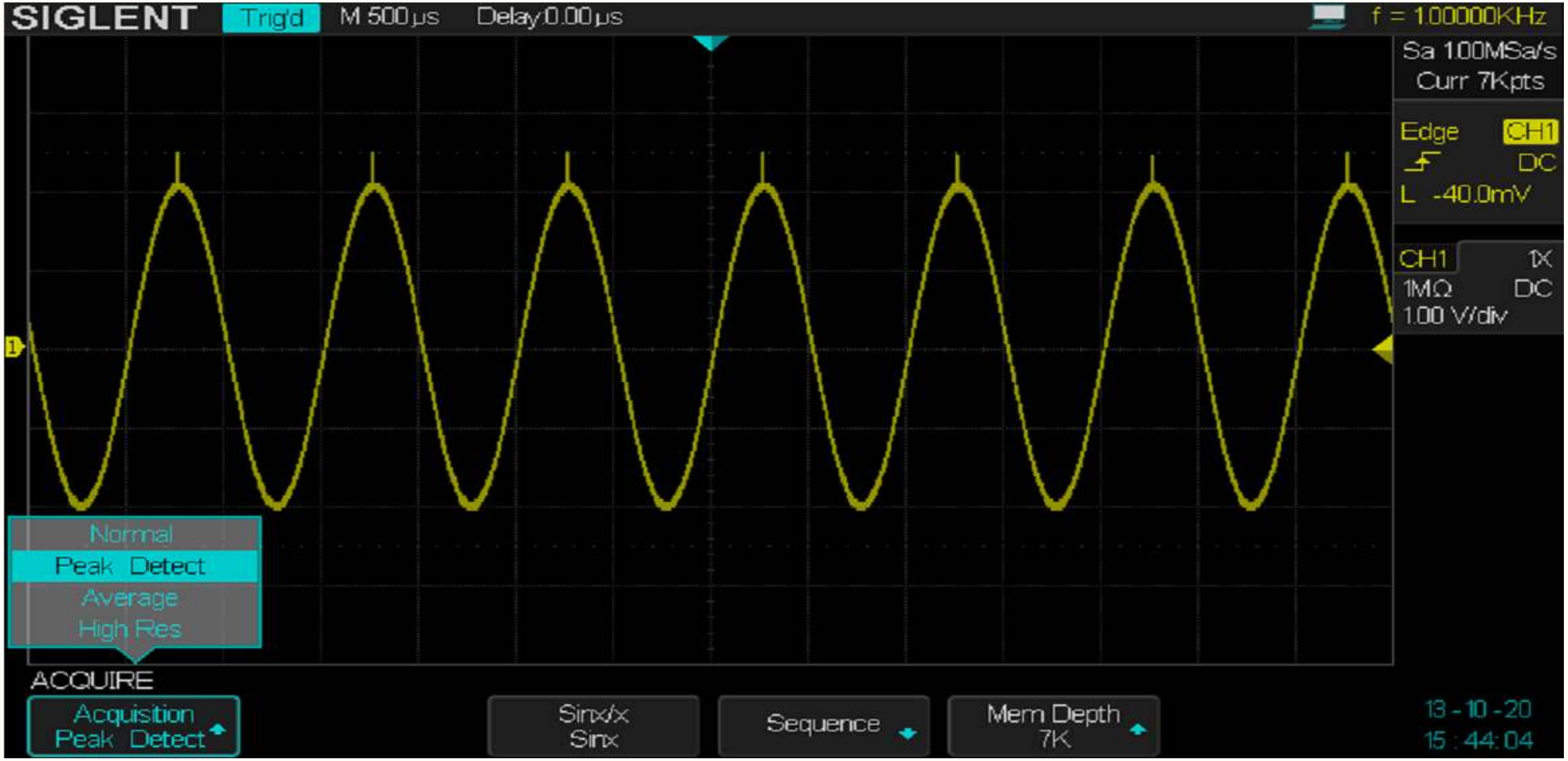
1. В стандартном режиме децимации выводится только один отсчет из выборки (например, первый). Он может не совпасть с моментом появления импульса помехи



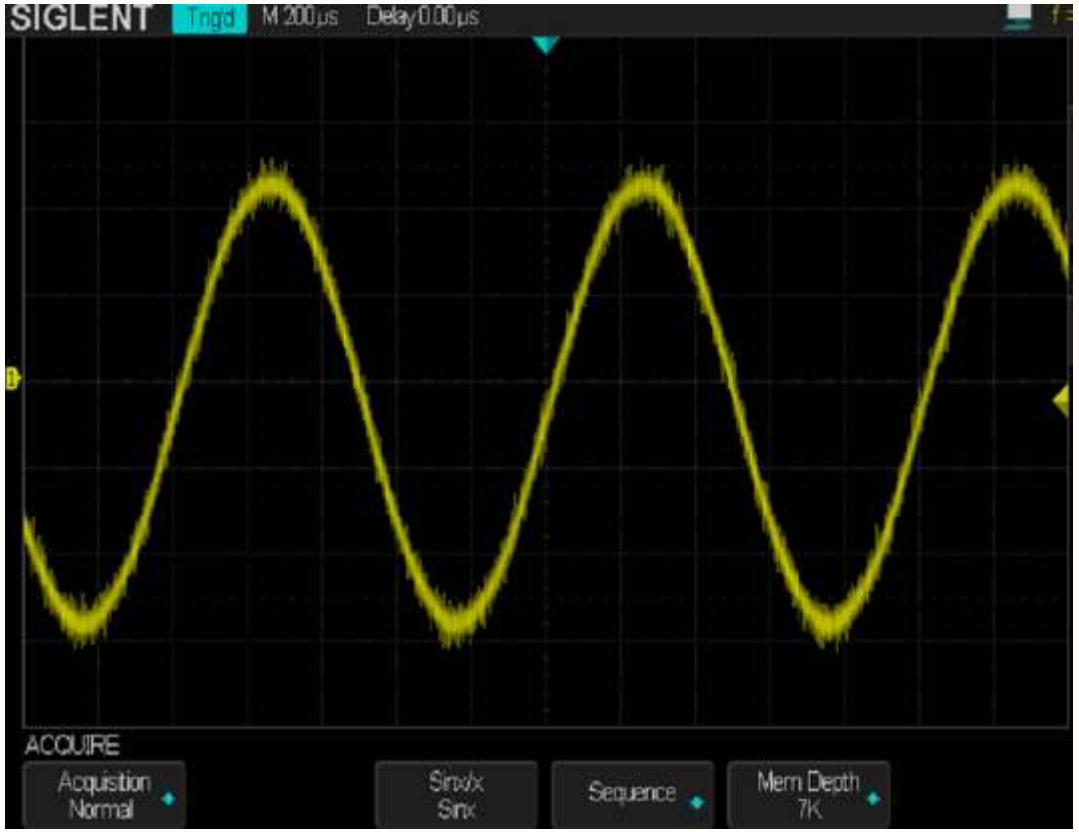
В сигнале на каждый период присутствует импульсная помеха. На осциллограмме она на некоторых периодах пропущена

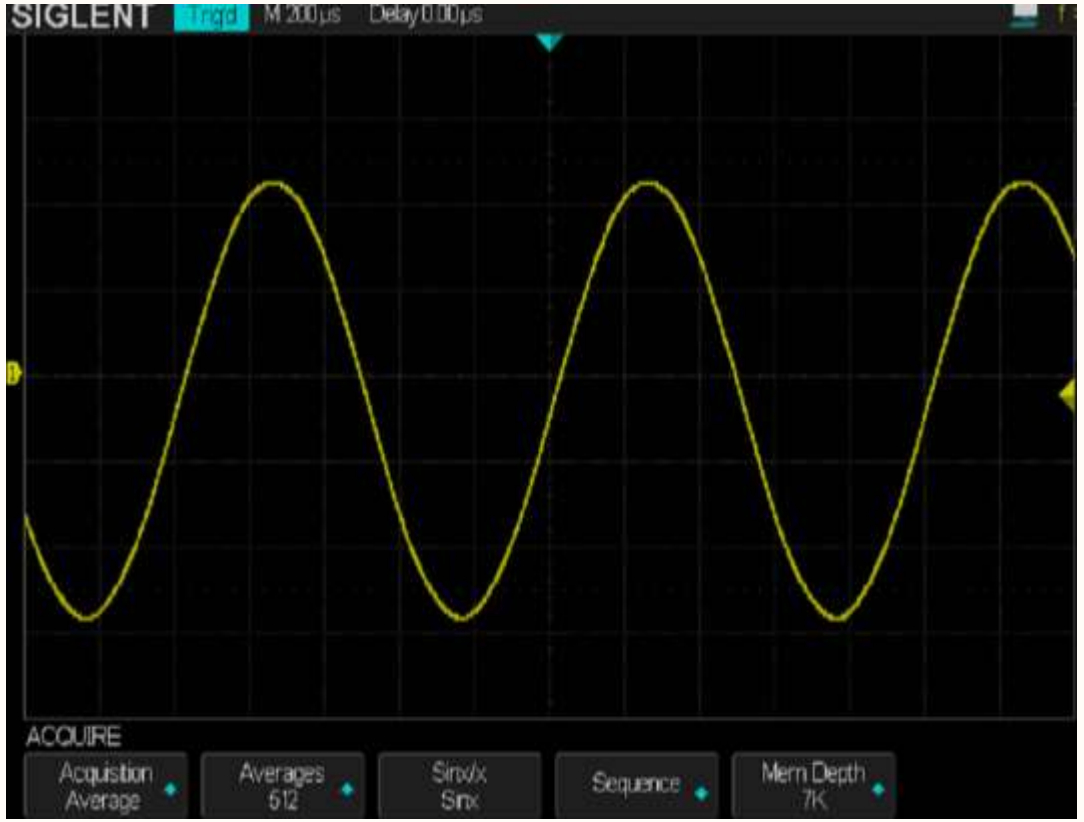


2. В режиме пик-детектора каждая нечетная точка строится по отсчету с максимальным значением в выборке, следующая (четная) – по отсчету с минимальным значением в выборке. Режим пик-детектора позволяет *не пропустить* короткие выбросы в сигнале



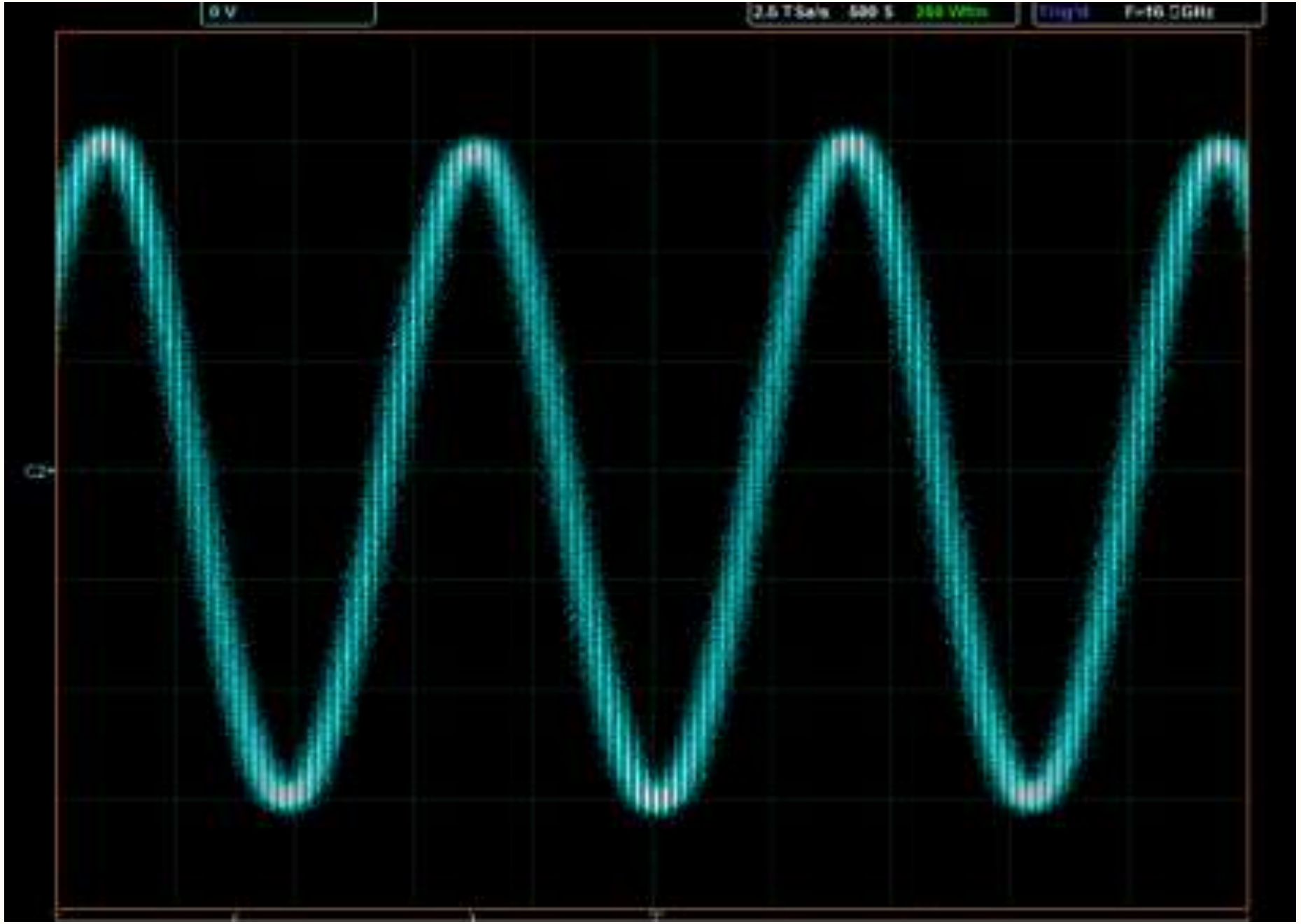
3. В режиме усреднения на экран выводится точка, представляющая собой среднее арифметическое выборки. Этот режим позволяет эффективно снижать шумы квантования АЦП, внутренние шумы усилителя канала Y. Однако на экране будут представлены не мгновенные значения оцифрованного сигнала, а результаты его усреднения. Импульсные помехи будут сглажены и не фиксируются на экране



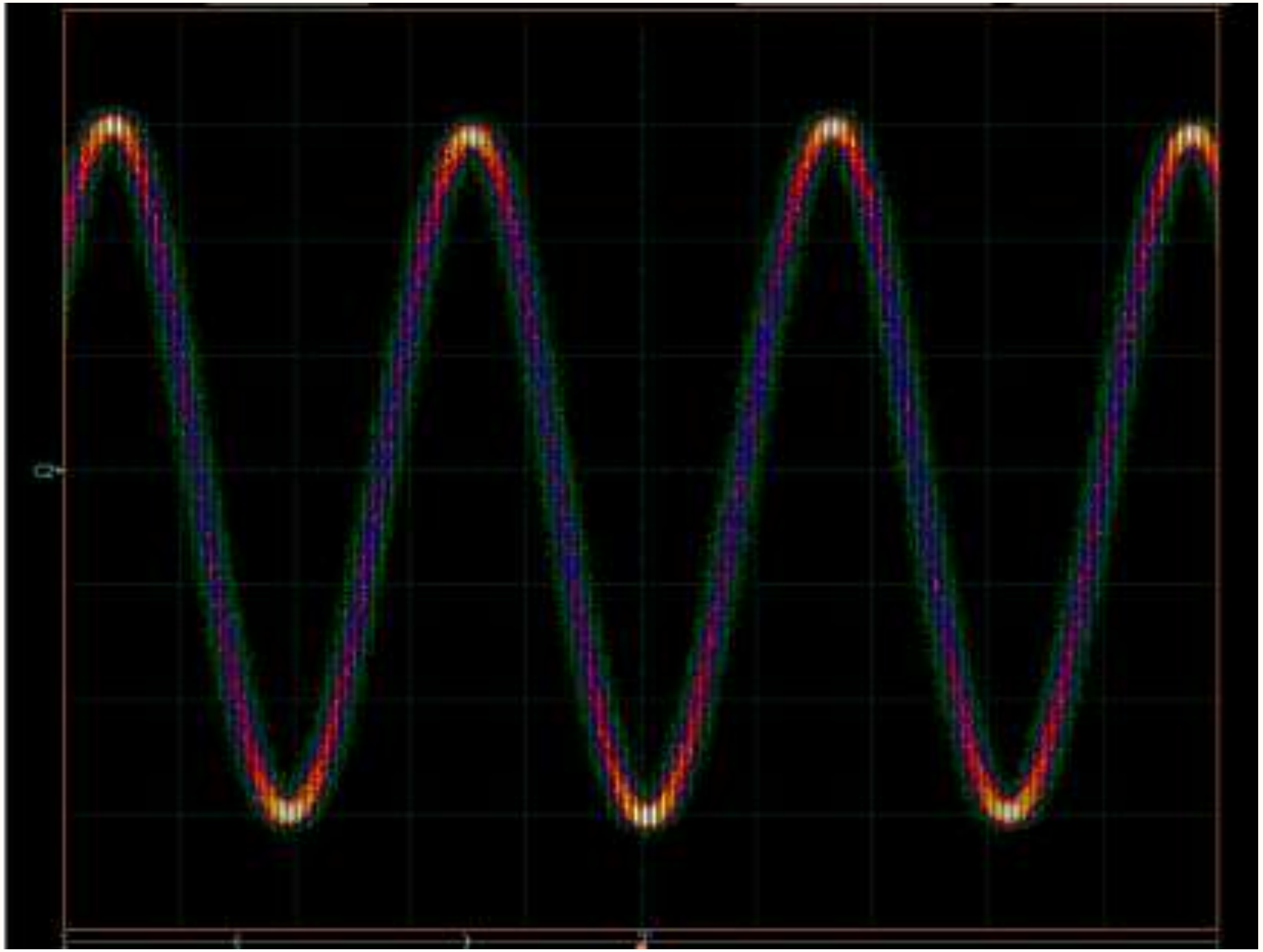


4. Режим «цифрового фосфора» (***DPO – Digital Phosphor Oscilloscope***) или режим послесвечения позволяет выводить на экран кадры изображения сигнала с использованием ***наложения*** изображений. Если сигнал появляется в данной точке экрана часто, то яркость этой точки делают больше, чем у соседних точек, в которых сигнал появляется реже. Осциллограф обновляет отображение не сразу, а по истечении установленного времени послесвечения. На осциллограмме появляется новая переменная – ***яркость***, характеризующая частоту появления сигнала в данной точке экрана (режим «градации серым»).

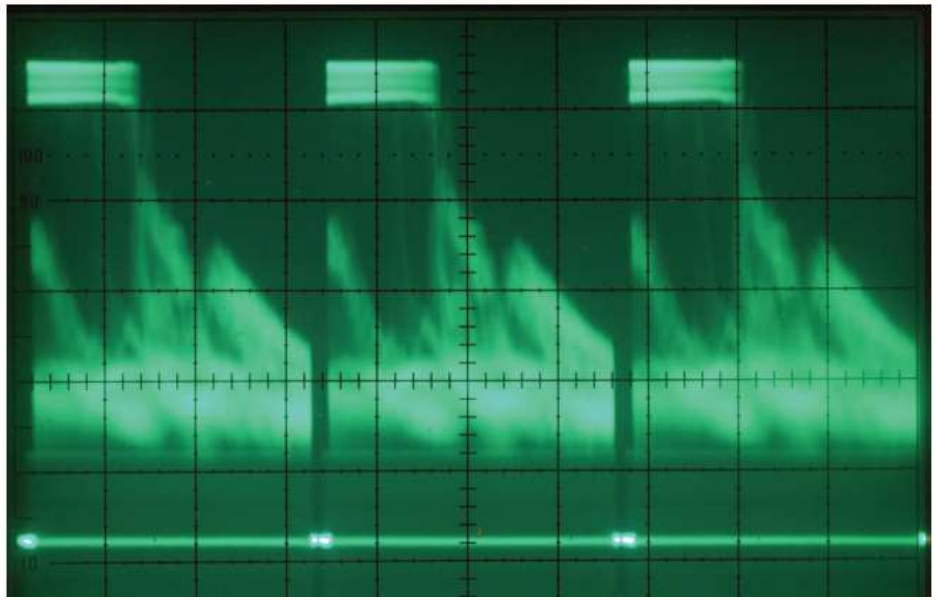
Для цветных дисплеев яркостную шкалу дополняют ***цветовой шкалой*** (режим “градации цветом”). Осциллограмма формируется накопленными точками, имеющими различные цвета. Цвет индицирует плотность попадания точек сигнала в данный пиксел осциллограммы.



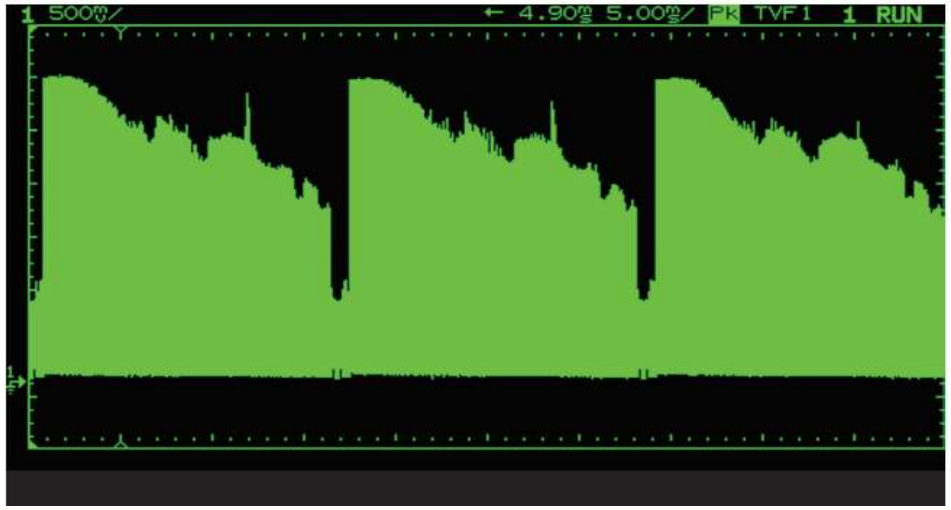
Осциллограмма гармонического сигнала в режиме послесвечения (режим «градации серым»)



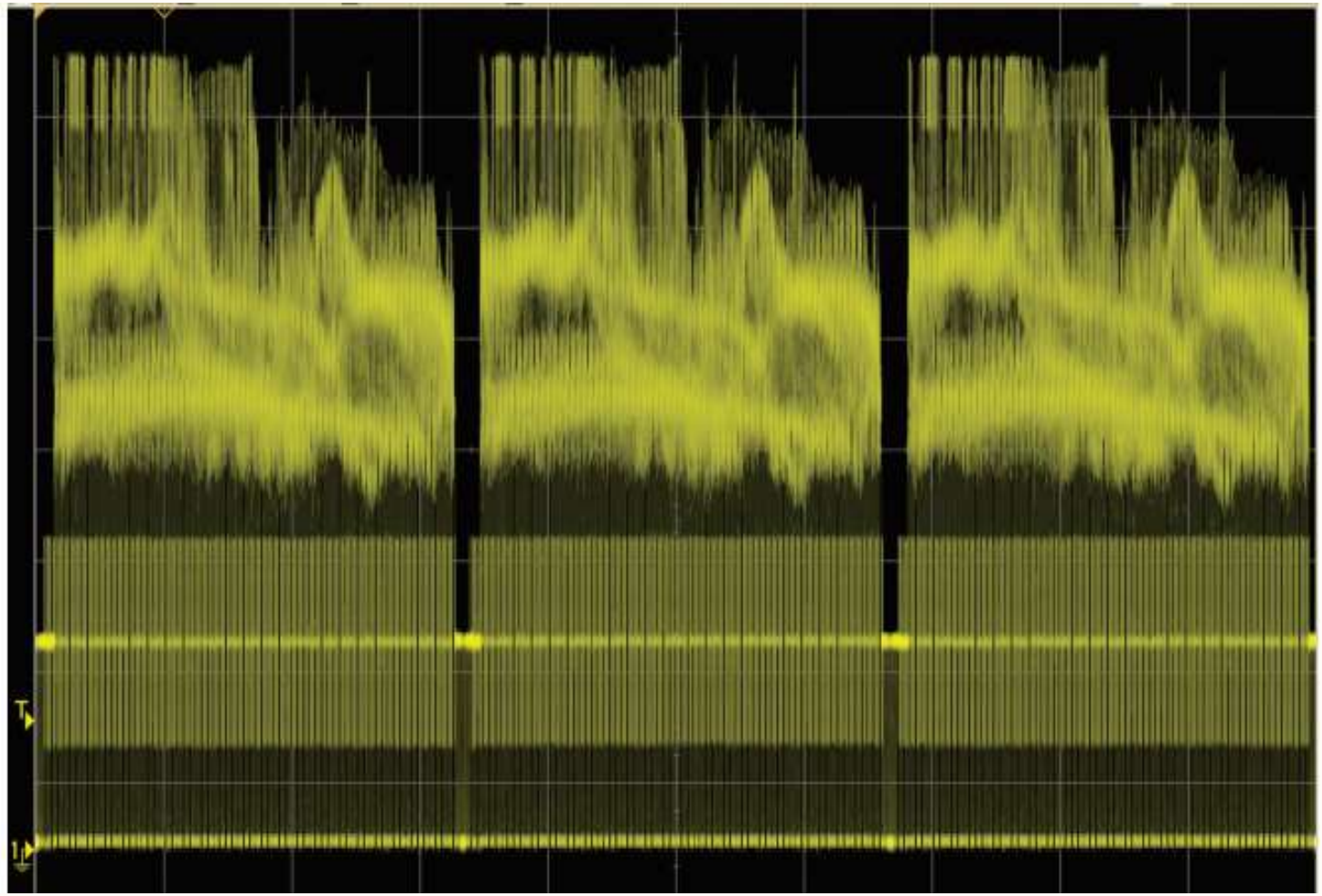
Осциллограмма гармонического сигнала в режиме «градации цветом»



а)



б)



в)

Осциллограммы ТВ видеосигнала: аналоговый ЭЛО (а), обычный ЦО (б) и ЦО с послесвечением (в)

Автоматические измерения параметров сигналов

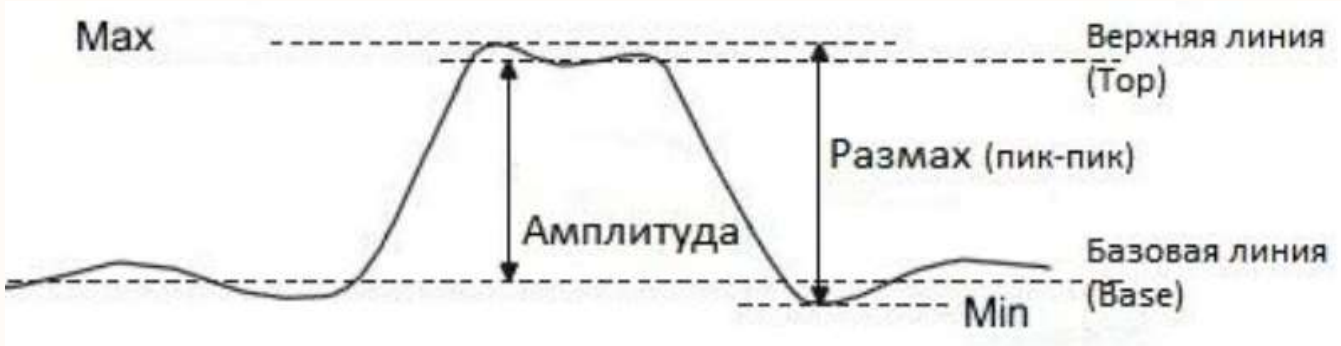
Автоматические измерения параметров сигнала присутствующего на экране!!

1. *Амплитудные измерения:*

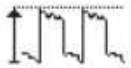
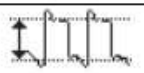
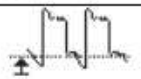
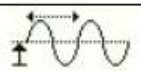
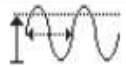
- Измерения сигнала от пик до пика;
- Измерение максимального и минимального значения сигнала;
- Измерение амплитудного значения сигнала;
- Измерение среднего значения сигнала;
- Измерение среднеквадратического значения сигнала;
- Измерение среднеквадратического значения за целый период сигнала;

2. *Временные измерения:*

- Измерение периода и частоты сигнала;
- Измерение длительности положительного и отрицательного импульса;
- Время нарастания и среза импульса;
- Скважность положительного и отрицательного импульса;
- Измерение временных интервалов между двумя сигналами:
- Измерение фазового сдвига;

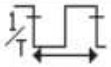
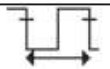
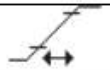
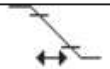
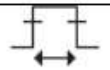
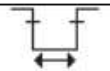


Автоматические измерения амплитудных параметров импульсов

1.	Pk-Pk /пик-пик двойная амплитуда		Разность между положительным и отрицательным пиками напряжений (=Vmax – Vmin)
2.	Max./Макс.		Положительный пик напряжения
3.	Min./Мин.		Отрицательный пик напряжения
4.	Amplitude/ Амплитуда		Разница между глобально высоким и глобально низким напряжением (=Vtop – Vbase)
5.	Top/ Верх		Измерение Верхнего значения формы сигнала, в пределах установленного окна
6.	Base/ База		Измерение Нижнего (базового) значения формы сигнала, в пределах установленного окна
7.	Mean/Среднее		Среднее из значений (сумма значений сигнала, деленная на количество точек)
8.	Vmean/Цикл Среднее		Усреднённое напряжение первого цикла
9.	RMS/ СКЗ		Измерение среднеквадратического значения (СКЗ) формы сигнала (квадратный корень из суммы квадратов значений сигнала, деленной на количество точек)
10.	Crms / Цикл СКЗ		Измерение среднеквадратического значения (СКЗ) формы сигнала (квадратный корень из суммы квадратов значений сигнала, деленной на количество точек) первого цикла



Автоматические измерения временных параметров импульсов

1.	Frequency/ Частота		Частота сигнала(=1/T)
2.	Period/ Период		Период сигнала (T) – интервал между двумя последовательными точками на фронтах одинаковой полярности, взятыми на среднем пороговом уровне (50%).
3.	Rise Time/ Время нарастания		Время нарастания импульса от нижнего до верхнего порогового уровня (10%~90 %).
4.	Fall Time/ Время спада		Время спада импульса от верхнего до нижнего порогового уровня (90%~10 %).
5.	+Width/ Длительность+		Длительность положительного импульса – интервал между двумя последовательными точками на фронте и срезе импульса, взятыми на среднем пороговом уровне.
6.	–Width/Длительность-		Длительность отрицательного импульса – интервал между двумя последовательными точками на срезе и фронте импульса, взятыми на среднем пороговом уровне.
7.	+Duty/Скважность+		Отношение длительности положительного импульса в сигнале к периоду сигнала = (Длительность+/T) x 100%.
8.	-Duty/Скважность-		Отношение длительности отрицательного импульса в сигнале к периоду сигнала = (Длительность-/T) x 100%.

ИТОГИ: достоинства и недостатки ЦО

Достоинства:

1. Возможность захвата и сохранения единичных событий; запоминание сигнала.
2. Отсутствие мерцания при больших коэффициентах развертки
3. Равномерная яркость изображения.
4. Замена дорогостоящих ЭЛТ жидкокристаллическими дисплеями.
5. Упрощение и удешевление аппаратной части ЦО за счет использования компьютерных компонентов общего применения
6. Курсорные и автоматические измерения параметров с цифровой точностью

Недостатки:

1. Работа в реальном масштабе времени возможна на относительно низких частотах. На высоких частотах время вывода может быть существенно больше длительности сигнала, что вызывает пропуск фрагментов сигнала.
2. Возможно появления мнимых изображений при быстрых сигналах
3. Использование интерполяции при работе ЦО вызывает искажение осциллограммы сигнала.
3. В типовых моделях ЦО разрешение по вертикали обычно не превосходит 8 бит (256 точек), что вызывает заметную дискретность изображения по вертикали.

ЦО классифицируются по нескольким видам:

1. Бюджетные модели ЦО с полосой рабочих частот до 100 – 500 МГц. Это относительно недорогие, компактные приборы широкого применения. Предназначены для замены универсальных аналоговых осциллографов.

2. Комбинированные портативные ЦО в сочетании с мультиметром. Их называют скопметры (scopemeter). Эти приборы имеют компактную конструкцию с жидкокристаллическим дисплеем небольшого размера, автономное Эти приборы предназначены для работы в производственных и полевых условиях

3. Многофункциональные вычислительные ЦО с мощными встроенными микропроцессорами и компьютерами. Имеют высокую частоту дискретизации (так, частота 20 ГГц и выше в реальном масштабе времени уже достигнута в современных моделях осциллографов класса high-end фирм Textronix, LeCroy и Keysight - Agilent).

4. Осциллографы смешанных сигналов (MSO) сочетают цифровой осциллограф с логическим анализатором . Имеют аналоговые входы (2..4) и набор цифровых входов (8, 16, 32, 64). Позволяют одновременно на экран выводить аналоговые и цифровые сигналы, также производит декодирование цифровых данных

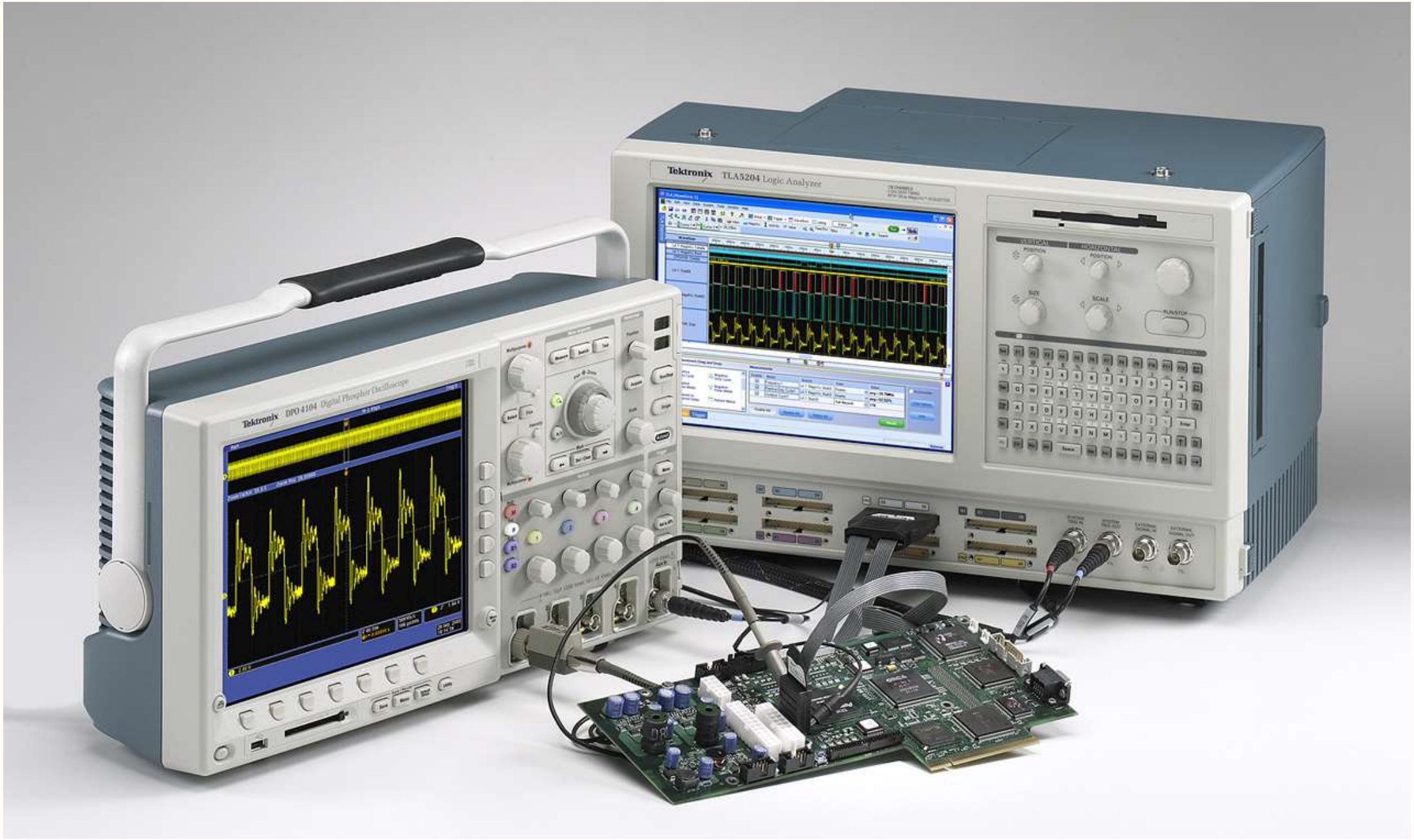
5. Виртуальные ЦО, выполняемые в виде приставок к персональному компьютеру. Такая приставка содержит аналоговую часть ЦО и АЦП. Для связи с компьютером часто используют интерфейс USB, поэтому такие приборы носят название «USB-осциллографы». Они не имеют удобного управления на передней панели приставки . USB осциллографы, как правило, не обеспечивают постоянное обновление результатов на экране. Они сначала записывают регистрируемые данные во встроенный буфер и только потом передают их на компьютер.

Первый отечественный цифровой осциллограф С9-5 (1979г. ВНИИРИП г. Вильнюс)



2 канала, частота дискретизации 20 Мгц, матричнаый экран 100х100, интерфейс GPIB (КОП)

Tektronix DPO 4104+TLA5204



Agilent DSA80000B Digital Signal Analyzer
2-GHz to 13-GHz Oscilloscope



Rohde & Schwarz

Цифровые осциллографы R&S ® серии RTO



LeCroy Осциллографы цифровые запоминающие серии WaveSurfer MXs-BWP 740Zi




1 2.00V/ 2 2.00V/ 3 4 100.0µs/ 1.000Ms/ Stop I²C 1 2.35V
a0WA 10A 4dA 53A 4fA
I²C Trigger Menu
Signals
Trigger: EEPROM
Data is =
Data 0x41
Data2 0xXX

Популярные бюджетные модели ЦО

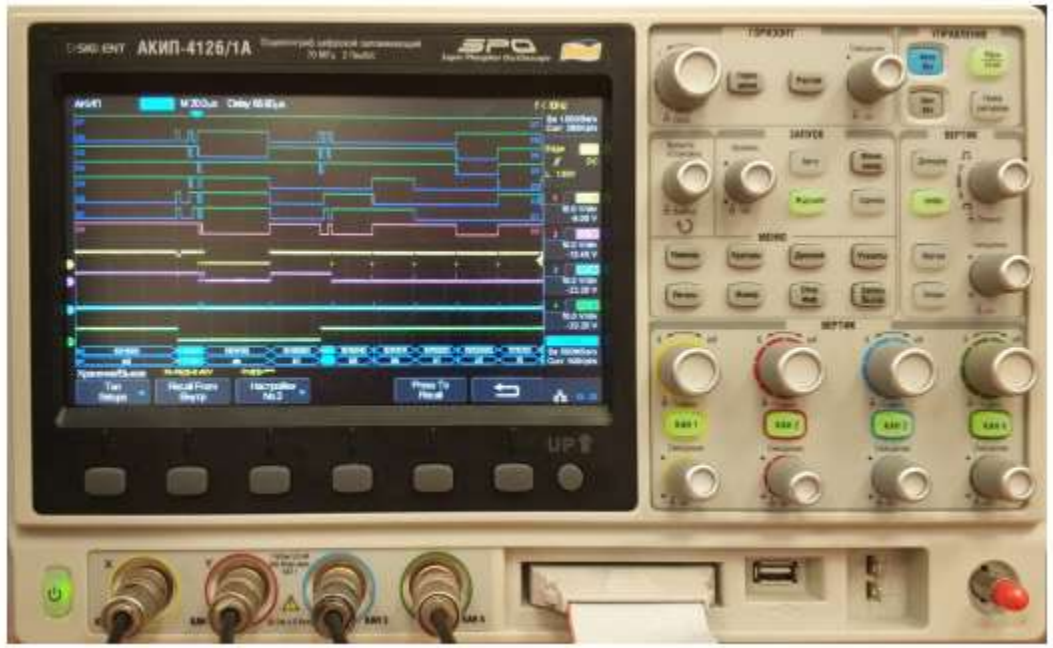


Осциллограф цифровой
Instek Goodwill GDS-73104



Осциллограф-мультиметр
АКИП-4128/1

Бюджетный цифровой осциллограф АКИП 4126/1А (SIGLENT SDS2074)



Характеристика	Значение
Количество каналов	4
Частота дискретизации АЦП	1 ГГц
Полоса пропускания по уровню -3 дБ	70 МГц
Время нарастания переходной характеристики	5 нс
Скорость обновления осциллограмм	110 000/с
Разрешающая способность экрана	800x480 (диагональ 20см)
Максимальная длина записи (глубина памяти)	14 Мбайт
Диапазон коэффициентов отклонения. Ко	2 мВ/дел.10В/дел
Погрешность установки. Ко	±3%
Диапазон коэффициентов развертки Кр	1 нс/дел…50с/дел
Погрешность установки Кр	±0.0025%
Входной импеданс	1 Мом, 23 пФ или 50 Ом

Бюджетный цифровой осциллограф АКИП 4131



Число каналов вертикального отклонения: 2

Коэффициенты отклонения : от 500 мкВ/дел до 10 В/дел;

Полоса пропускания 100 МГц, время нарастания 3,5 нс

Частота дискретизации 500 МГц

Число разрядов АЦП осциллографа: 8

Активное сопротивление входов 1МОм,

Входная емкость не более 18%

Коэффициент развертки осциллографа от 1 нс/дел до 100 с/дел

Математические действия с сигналами всех входных каналов:

1. Суммирование каналов;
2. Разность каналов;
3. Умножение каналов;
4. Деление каналов;
5. Инвертирование сигнала;
6. Интегрирование каналов;
7. Дифференцирование каналов;
8. Извлечение квадратного корня;
9. БПФ (с применением прямоугольного окна, окна Блэкмена, Ханнинга и Хэмминга)

Осциллограф-мультиметр OX7042-CSD компании Metrix



АКТАКОМ ADS-4155

2 канала, 150 МГц (частота дискретизации 1 ГГц), 8 бит, глубина памяти 28 Мбит, 31 тип автоизмерений, 8 стандартных типов запуска + декодирование 7 видов шин



USB осциллографы: АКИП-4110; АКИП-4110/1
«2 в 1»: осциллограф, анализатор спектра





Число вх. каналов: 2 или 4 (АКИП-4110/1)

Полосы пропускания: 20 МГц, 50 МГц, 100 МГц., АЦП: 16 бит

Макс. частота дискретизации: до 250 МГц, эквивалентная до 10 ГГц

Максимальная длина памяти: 32 МБ

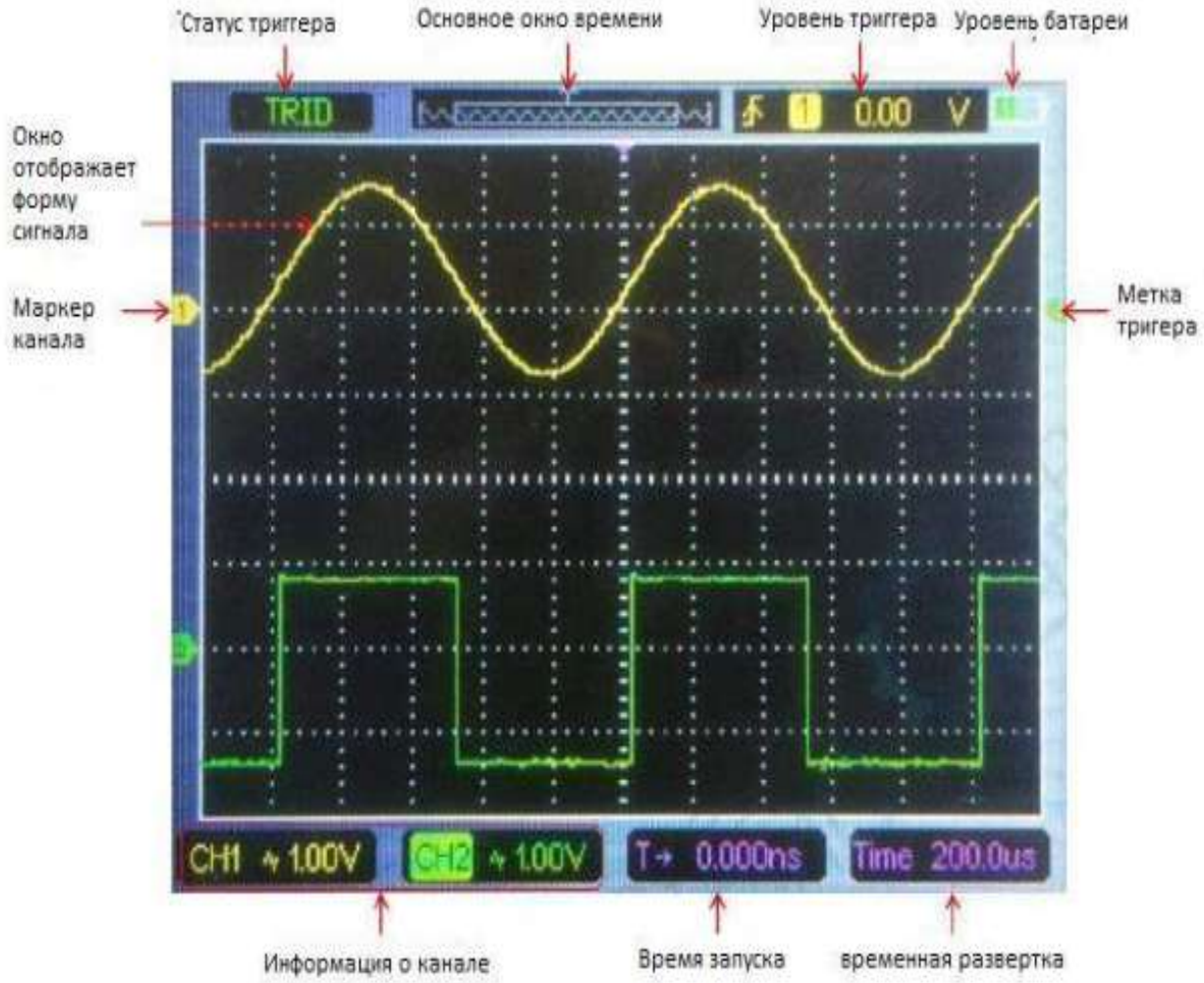
Hantek 6022BE Портативный PC USB oscilloscope. 2 канала, 20 МГц (осциллограф + анализатор спектра)





Hantek 7D72 Handheld oscilloscope. 2 канала, (3 в 1 =>осциллограф + DDS генератор+ DMM мультиметр))





Scope:

- 70MHz, 250MSa/s(Single-channel), 125MSa/s(Dual-channel)
- Record Length Max. 6K for single-channel; 3K samples per dual-channel
- Waveform Interpolation (sin x)/x
- 5ns/div~500s/div
- 8-bit resolution, 10mV/div~10V/div
- Rise Time ≤5ns
- Input Impedance, 25pF±3 pF, 1MΩ±2%

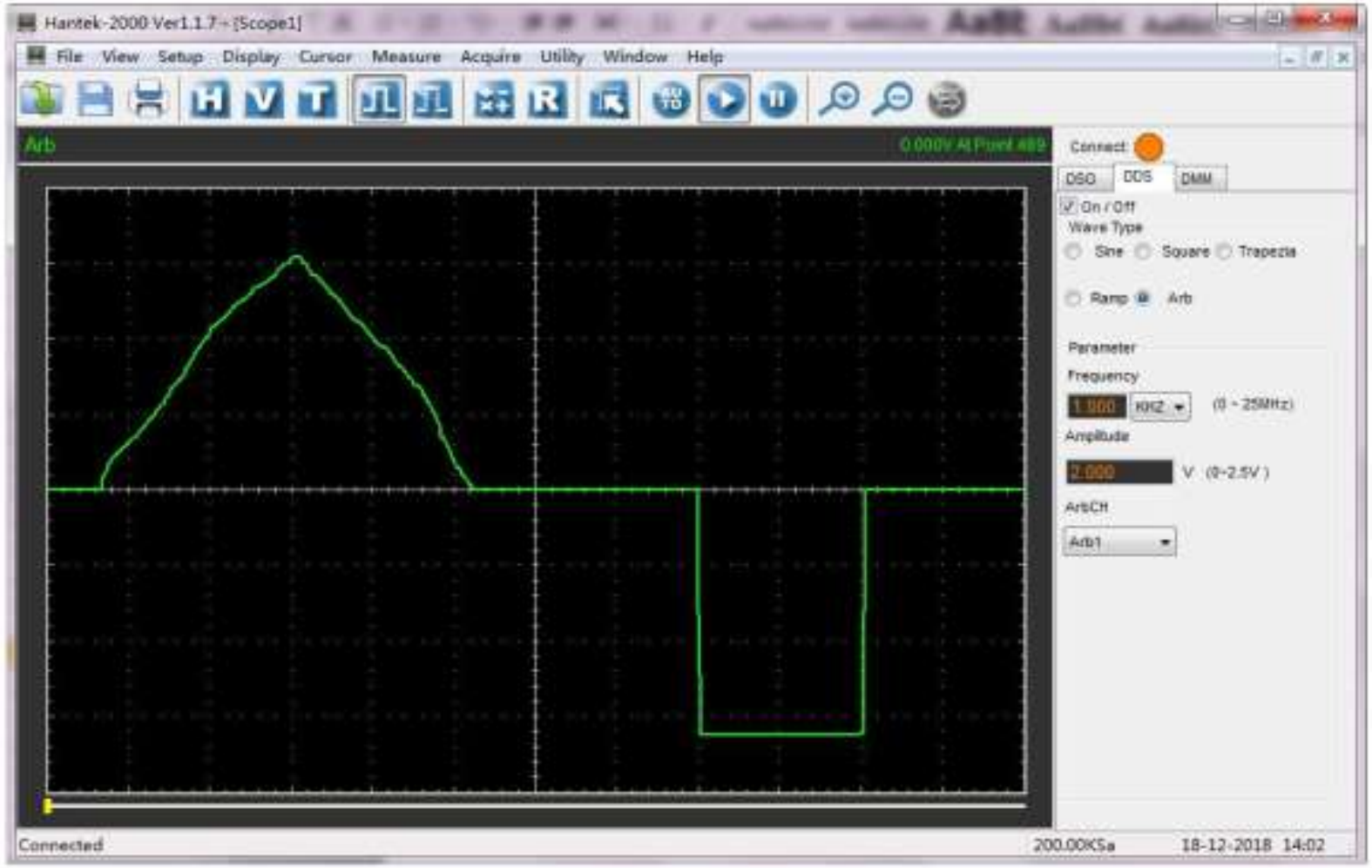
AWG:

- Sine: 1Hz~25MHz, Square: 1Hz~10MHz, Ramp: 1Hz~1MHz, EXP: 1Hz~5MHz
- Vertical Resolution 12 bit
- Output Impedance 50 Ω

DMM:

- Maximum Resolution 4000 (3 ¾)
- Voltage,Current,Resistance,Capacitance,Diode &On-Off

*Окно программы управления ЦО **Hantek2xx2.exe***



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

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

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

А.А. Данилин

«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Анализаторы спектра радиосигналов

Санкт-Петербург
2024 г.

Спектральный анализ радиосигналов

Спектральная функция сигнала u(t) (или *спектральная плотность*), размерность В/Гц

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt$$

Измерять можно только *текущий частотный спектр*

$$S(\omega, \mathrm{t}) = \int_{-\infty}^{t} u(t) e^{-i\omega t} dt$$

Модуль спектральной функции называют *амплитудным спектром,* *аргумент – фазовым спектром сигнала*

Для периодических бесконечных сигналов используют представление в виде *ряда Фурье:*

$$u(t \pm kT) = u(t),\ k = 0,1,2,3\ldots$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(n\frac{2\pi}{T}t + \varphi_n\right)$$

Ряд представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Амплитуды U_n и начальные фазы φ_n представляют собой амплитудный и фазовый спектры. U_0 является постоянной составляющей сигнала.

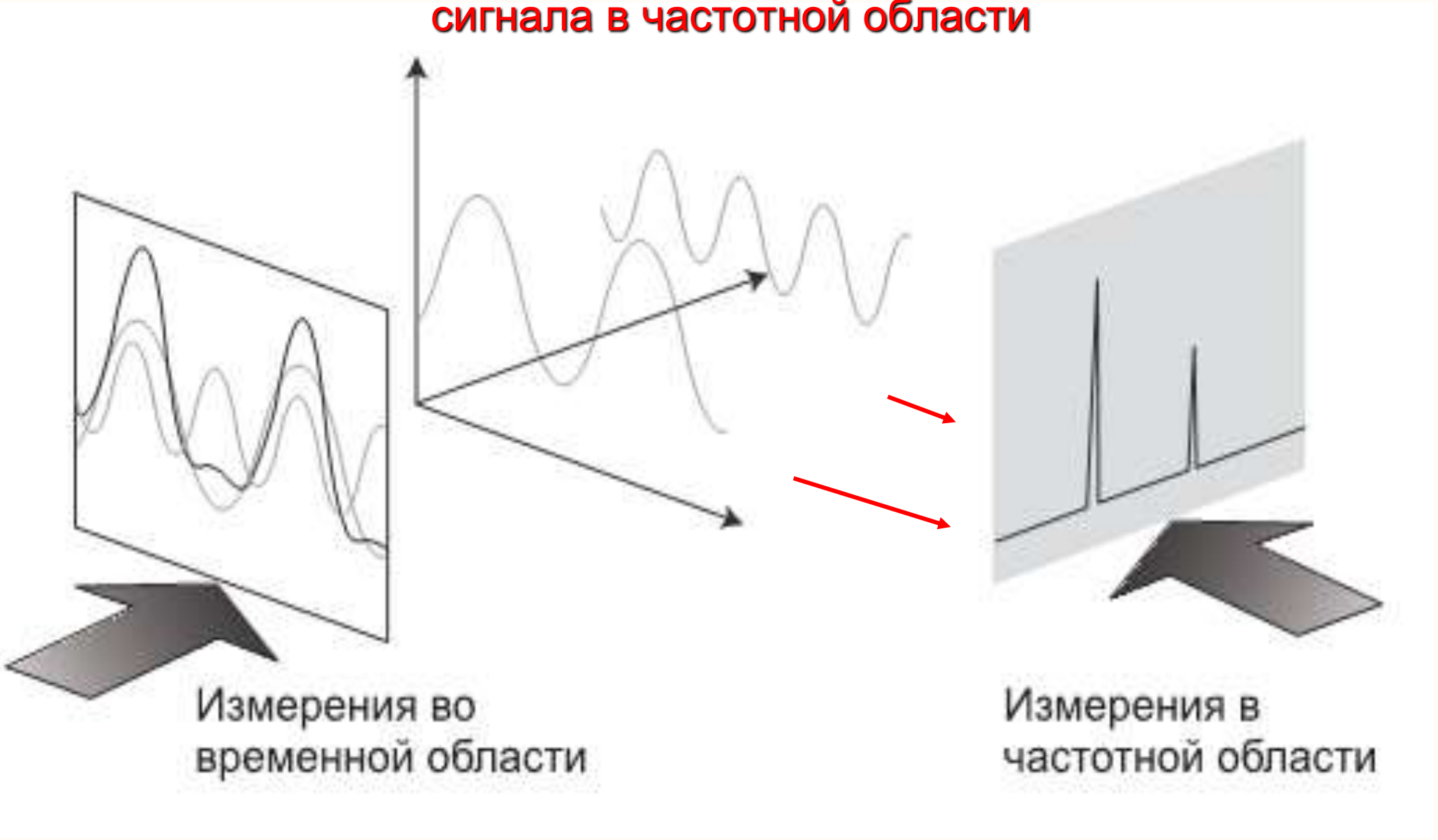
Шумовые и случайные сигналы характеризуются

спектральной плотностью мощности (энергетический спектр)

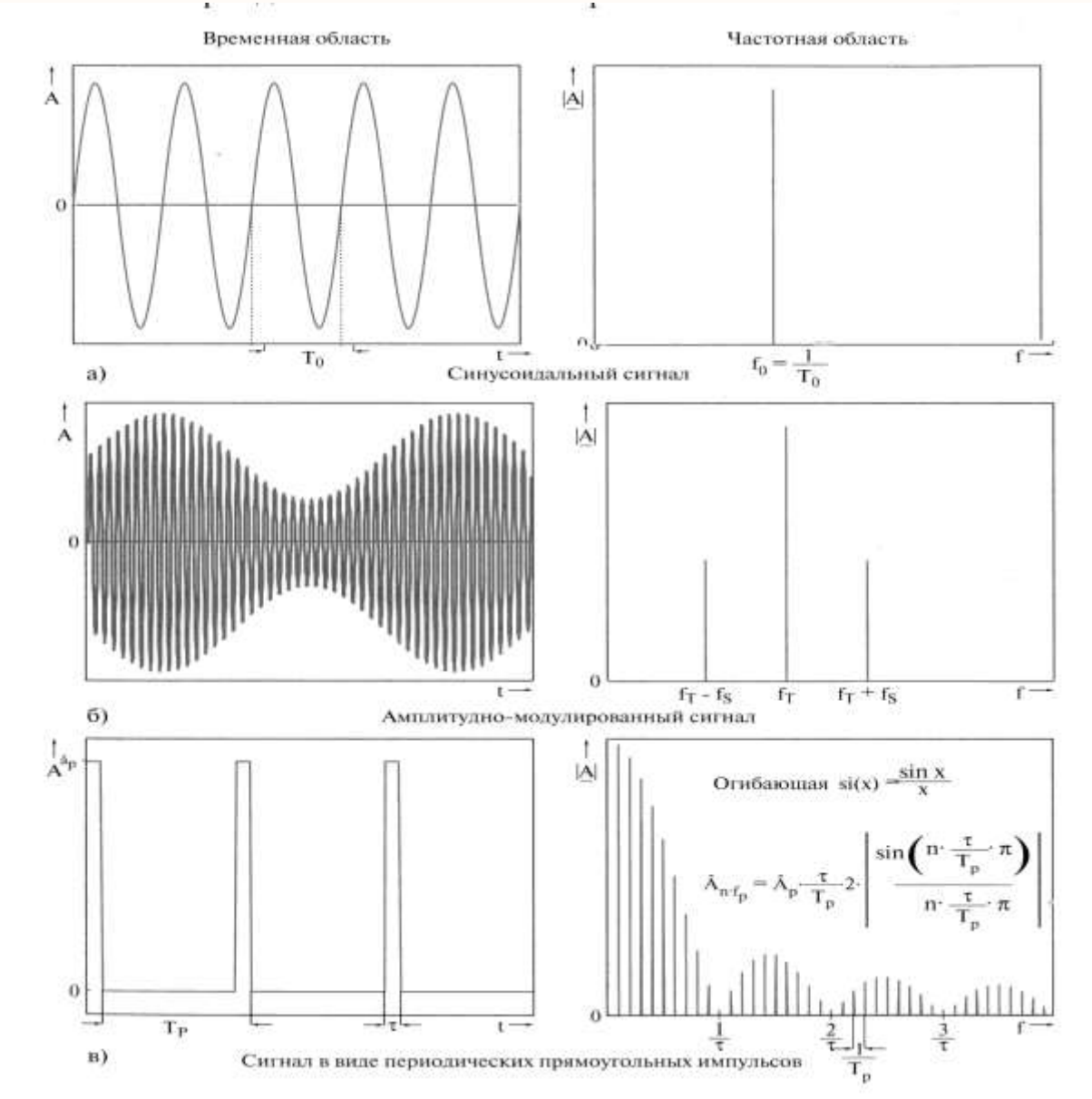
$$W(\omega) = \lim_{T \to \infty} \frac{|S(\omega, T)|^2}{T}$$

S(ω,T) – спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале [-T/2,T/2] при расширении интервала до бесконечности

Задача спектрального анализа – представление сигнала в частотной области



Графическое представление спектров периодических сигналов



Синусоидальный (тональный) сигнал

Радиосигнал с тональной амплитудной модуляцией (АМ)

Прямоугольный видеоимпульс с большой скважностью

Задачи спектрального анализа радиосигналов

- измерение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов (одного или нескольких одновременно)
- измерение амплитудной (реже - комплексной) спектральной функции непериодических сигналов (одиночных или неповторяющихся)
- измерение спектральной плотности мощности случайных сигналов (шумовых и информационных).

Эти задачи решают специализированными приборами –***СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРАМИ***.

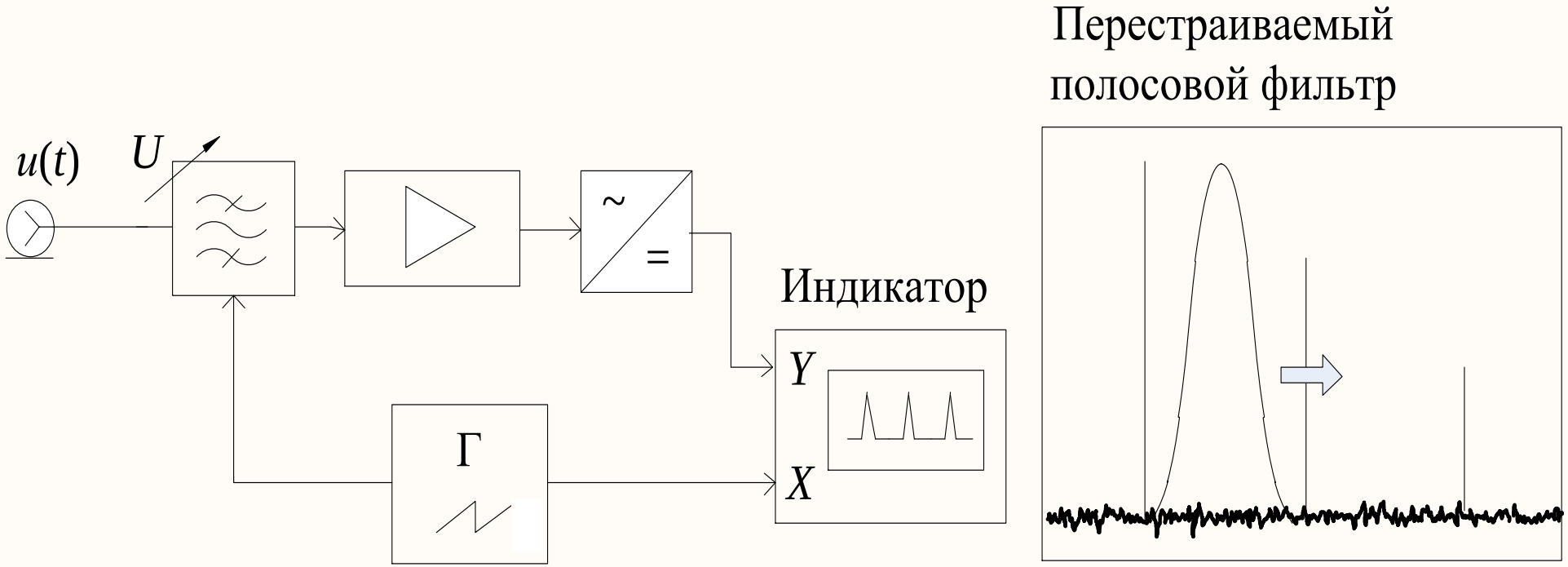
Возможности анализа спектров предусмотрены в большинстве цифровых осциллографов, а также в виртуальных компьютерных измерительных устройствах (плата АЦП+программы обработки сигналов на ПК)

Виды спектроанализаторов

- *Приборы диапазона НЧ* – до частот порядка единиц МГц применяют для анализа сигналов низкочастотной электроники, акустики и механики. В настоящее время чаще используют компьютерные измерительные приборы (виртуальные приборы) и цифровые осциллографы
- Спектроанализаторы *радиодиапазона ВЧ* (до 3..6 ГГц) – используют при разработках систем мобильной связи, радиотехнических устройств, аппаратуры радиовещания и телевидения и пр.
- Приборы для *диапазона СВЧ* (микроволновый диапазон – до 40 ГГц и выше) – для исследований в СВЧ электронике, радиолокации, в системах широкополосных линиях связи и пр. В настоящее время -как правило - это вычислительные анализаторы сигналов, позволяющие получать как амплитудные, так и фазовые спектры сигналов


Методы измерения спектров радиосигналов
Узкополосная фильтрация
Вычислительные спектроанализаторы
Параллельные анализаторы спектра
Последовательные спектроанализаторы
АС с аналоговыми фильтрами
АС с цифровыми фильтрами
Измерители нелинейных искажений
Анализаторы гармоник, селективные вольтметры
Панорамные спектроанализаторы

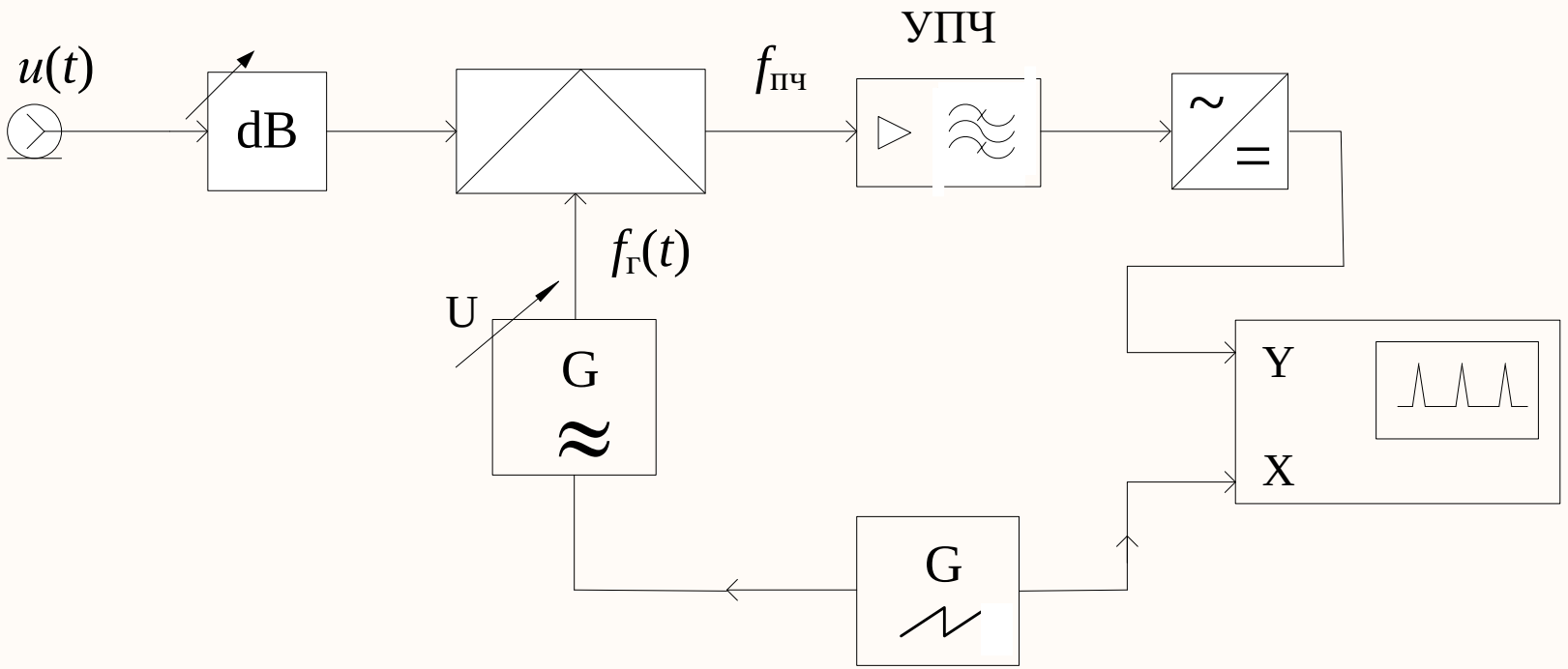
Принцип узкополосной фильтрации с перестраиваемым фильтром



Достоинства – высокая помехозащищенность по побочным каналам приема, простота схемы.

Недостатки – трудности перестройки в широком частотном диапазоне, сложно создать узкополосный фильтр, мала чувствительность . Практически не используется

Упрощенная схема последовательного анализатора спектра (гетеродинный АС)

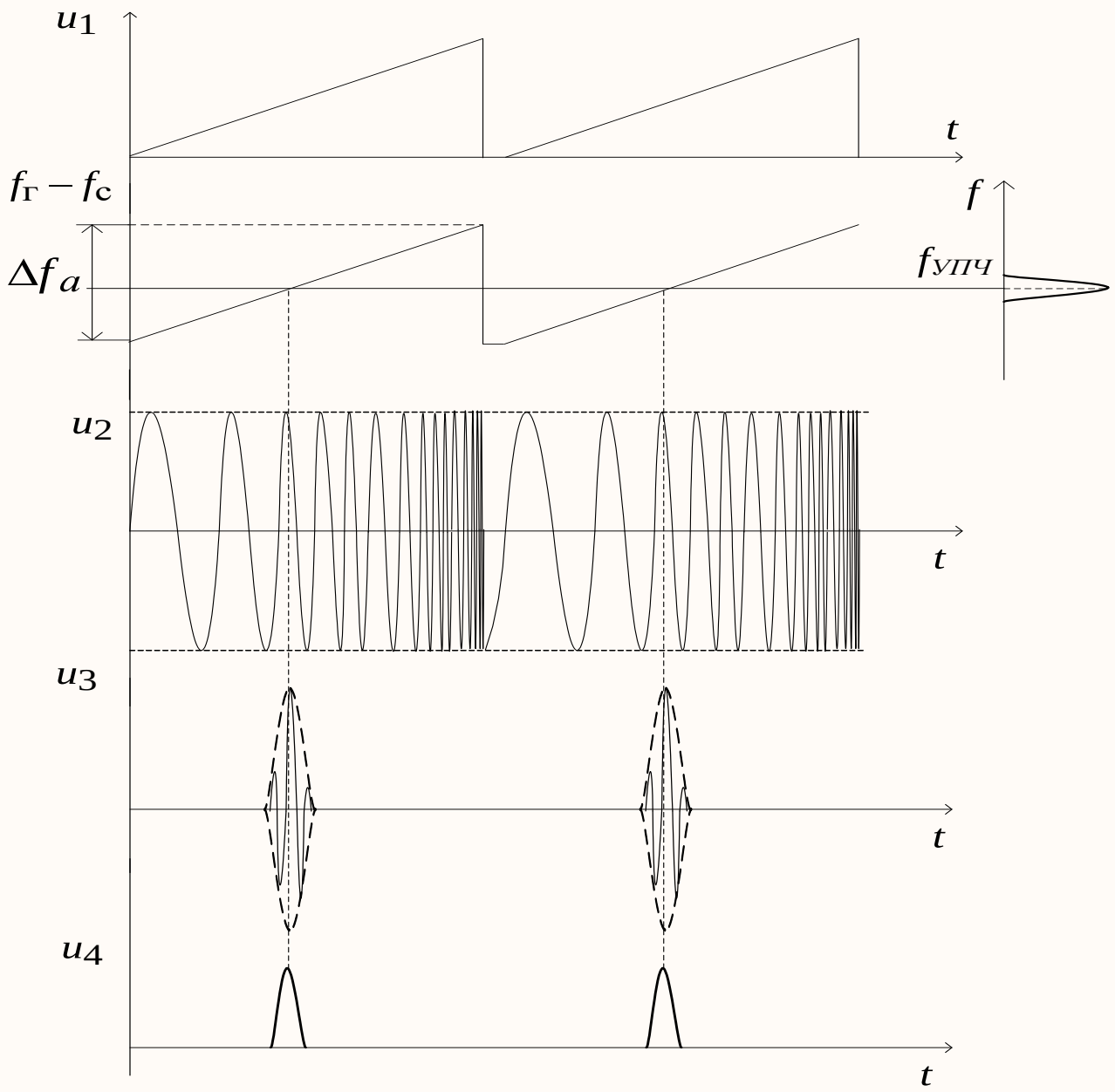


Закон управления частотой гетеродина

$$f_{\text{г}}(t) = f_{\text{г}\min} + (f_{\text{г}\max} - f_{\text{г}\min}) \cdot \frac{u_{\text{р}}(t)}{U_{\text{р}}}$$

Условие появления отклика от гармонического сигнала на экране АС в момент t_0

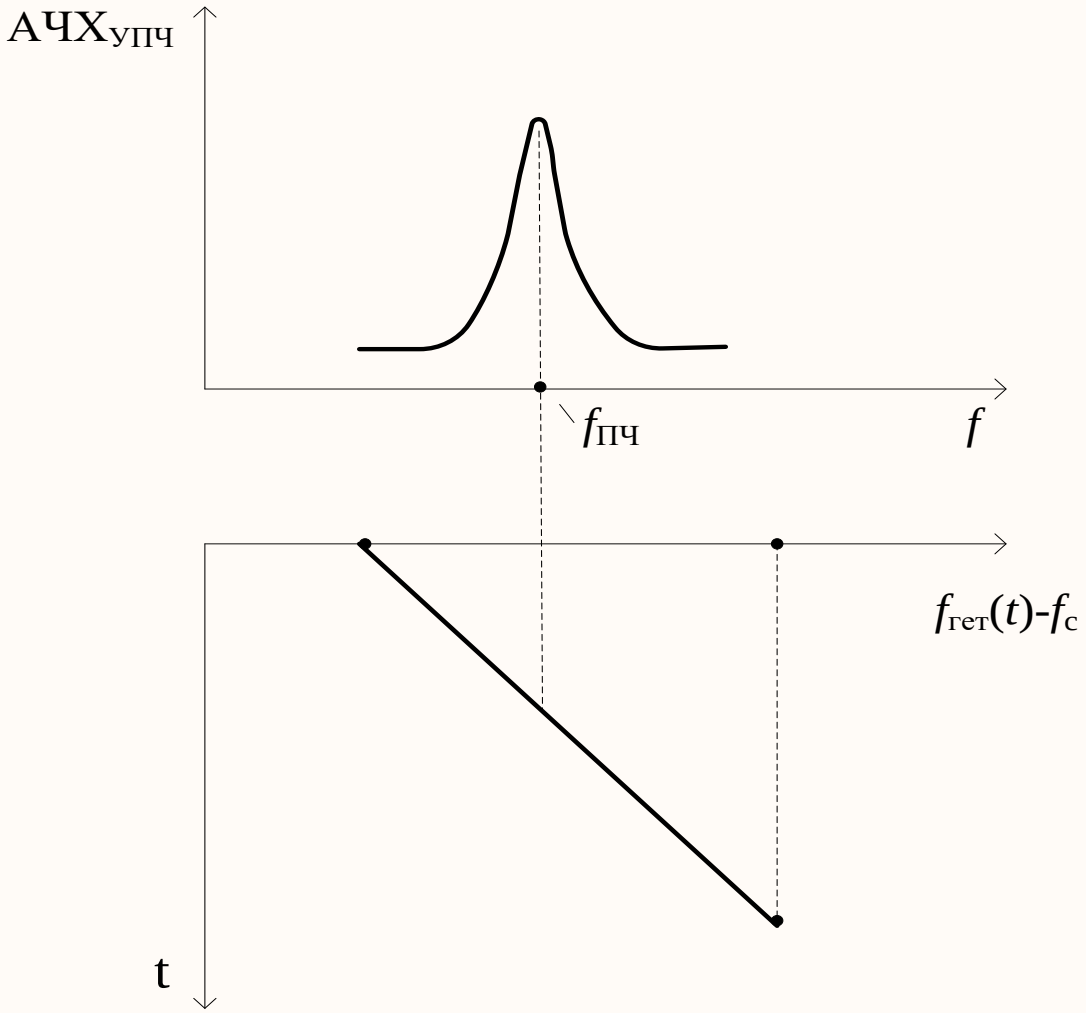
$$f_{\text{г}}(t_0) - f_c = f_{ПЧ}$$

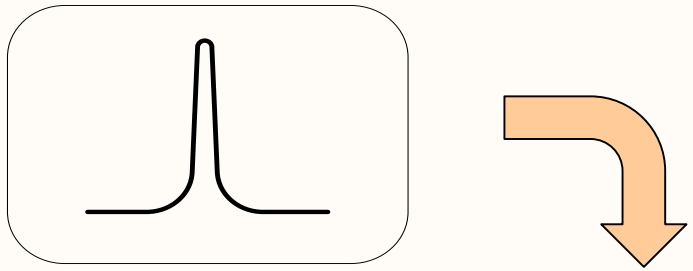


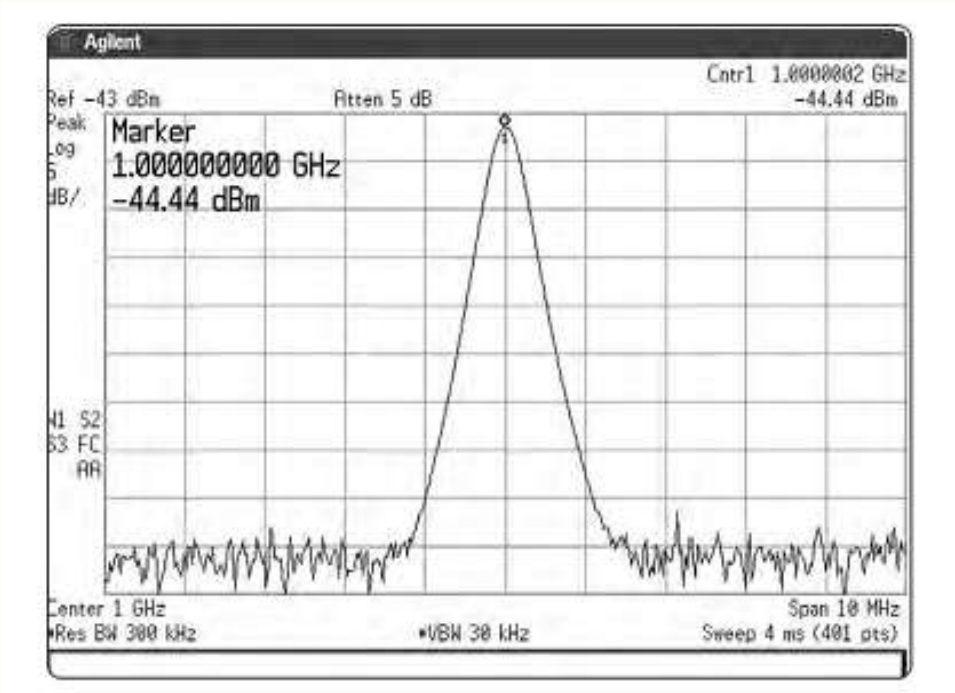
Осциллограммы сигналов в последовательном спектроанализаторе:

- u1 - напряжение развертки
- закон изменения **разности** частот гетеродина и сигнала
- u2 - осциллограмма выходного сигнала смесителя
- - u3 - выходной сигнал узкополосного фильтра УПЧ (радиофильтр)
- - u4 - сигнал с выхода детектора (видеофильтр)

Формирование отклика спектрограммы на гармонический сигнал



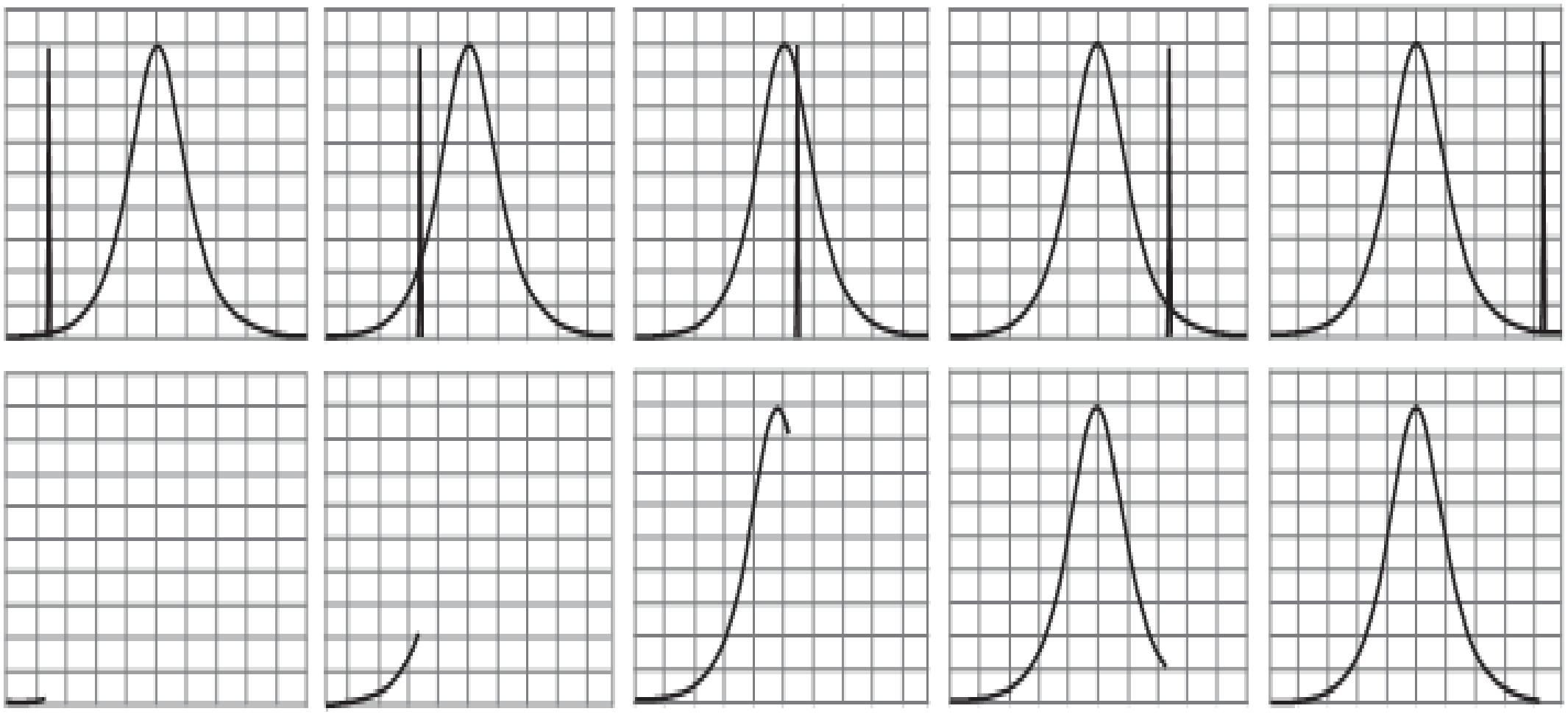




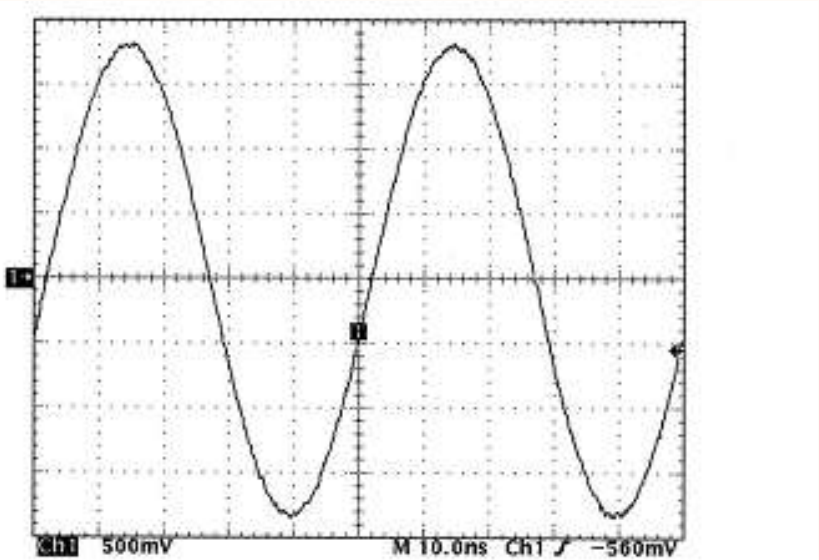
Отрисовка отклика АС на экране (спектрограмма)

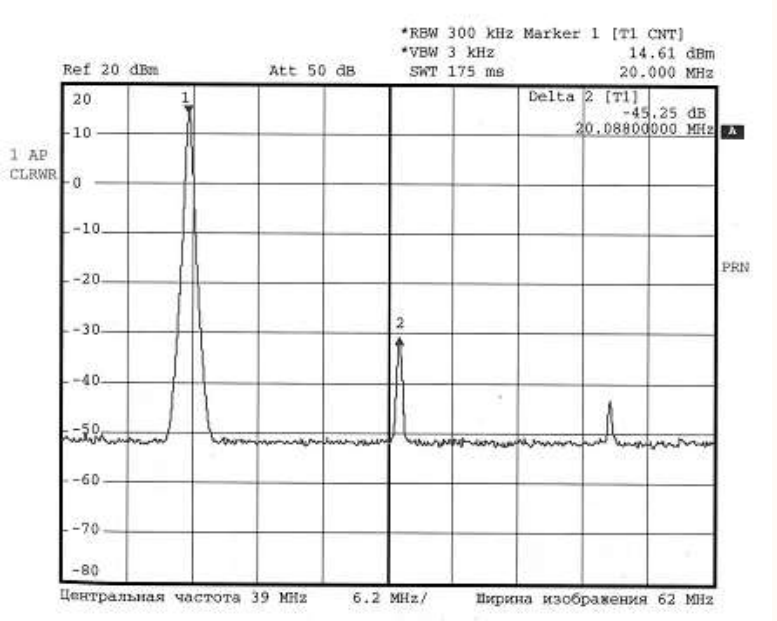
сверху – взаимное расположение сигнала и АЧХ фильтра ПЧ,

внизу – формирование спектрограммы гармонического сигнала

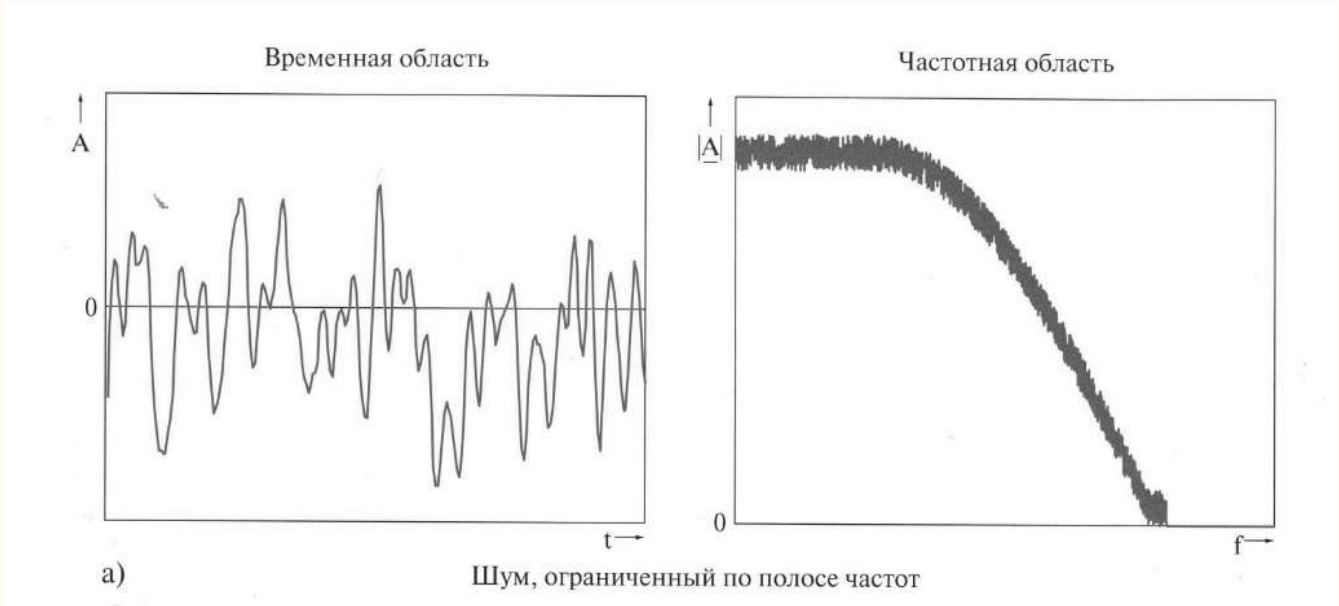


Вид спектрограмм для различных сигналов

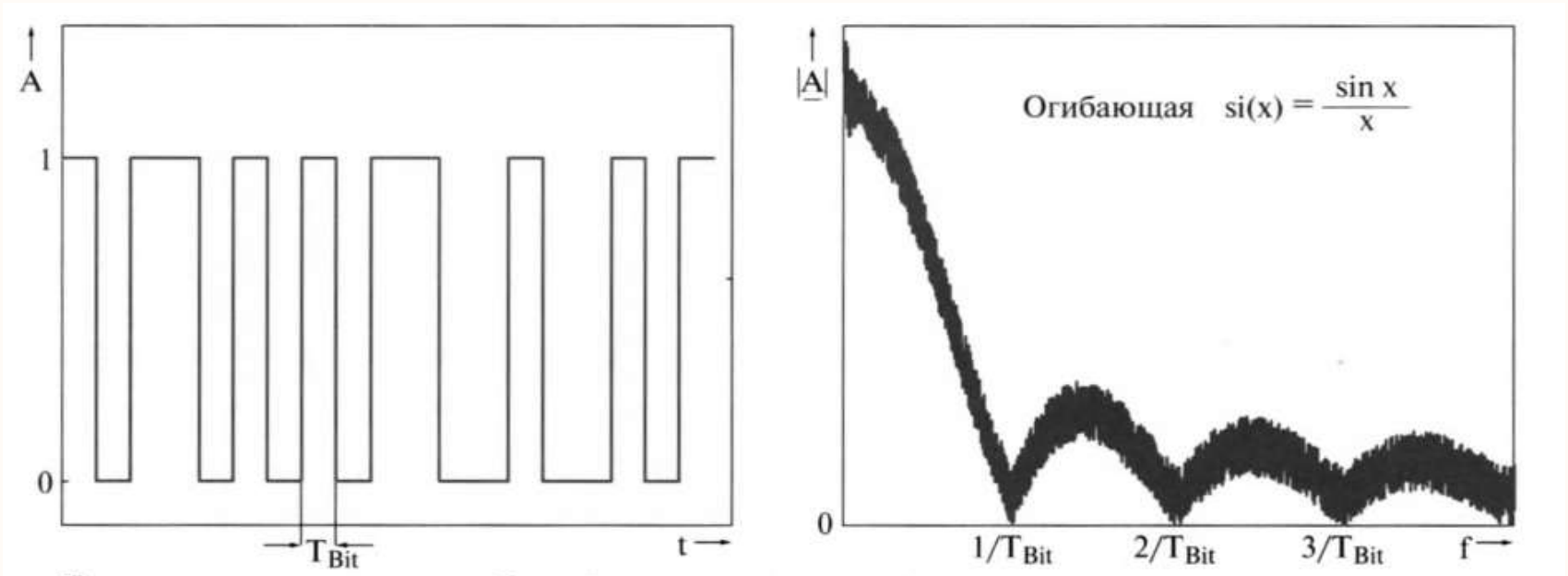




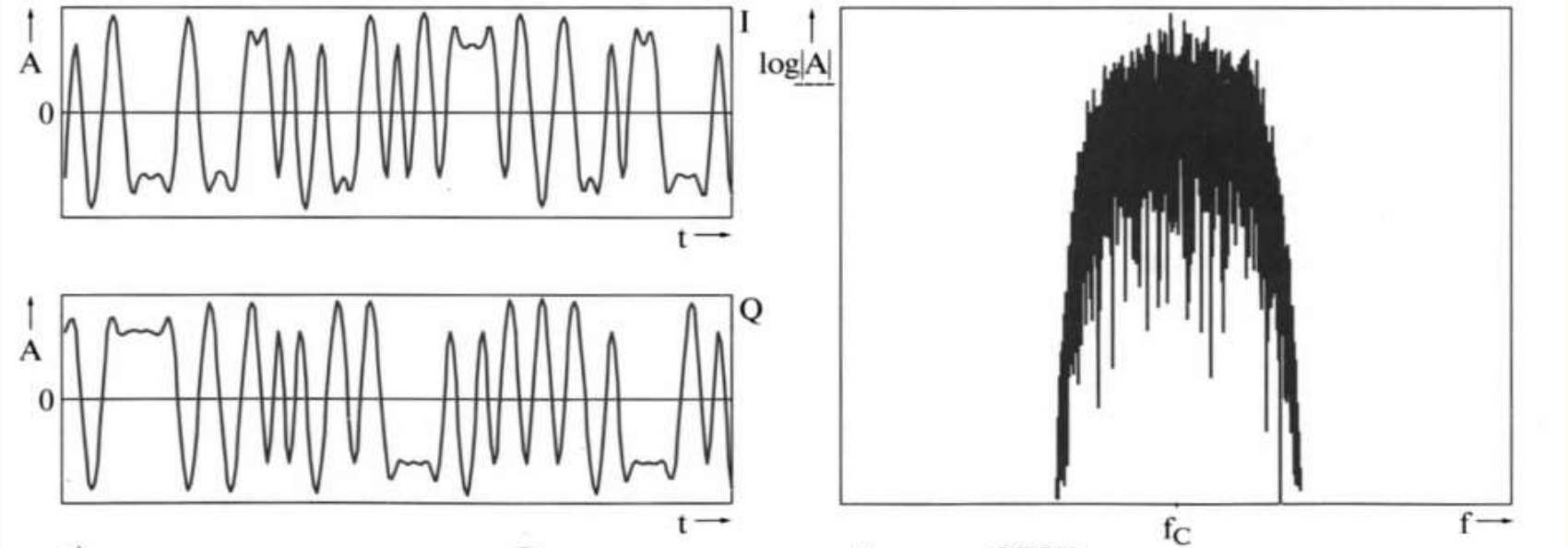
Квазигармонический сигнал, наблюдаемый на осциллографе (а) и результат измерения его спектра (б)



Шумовой случайный сигнал, ограниченный по полосе



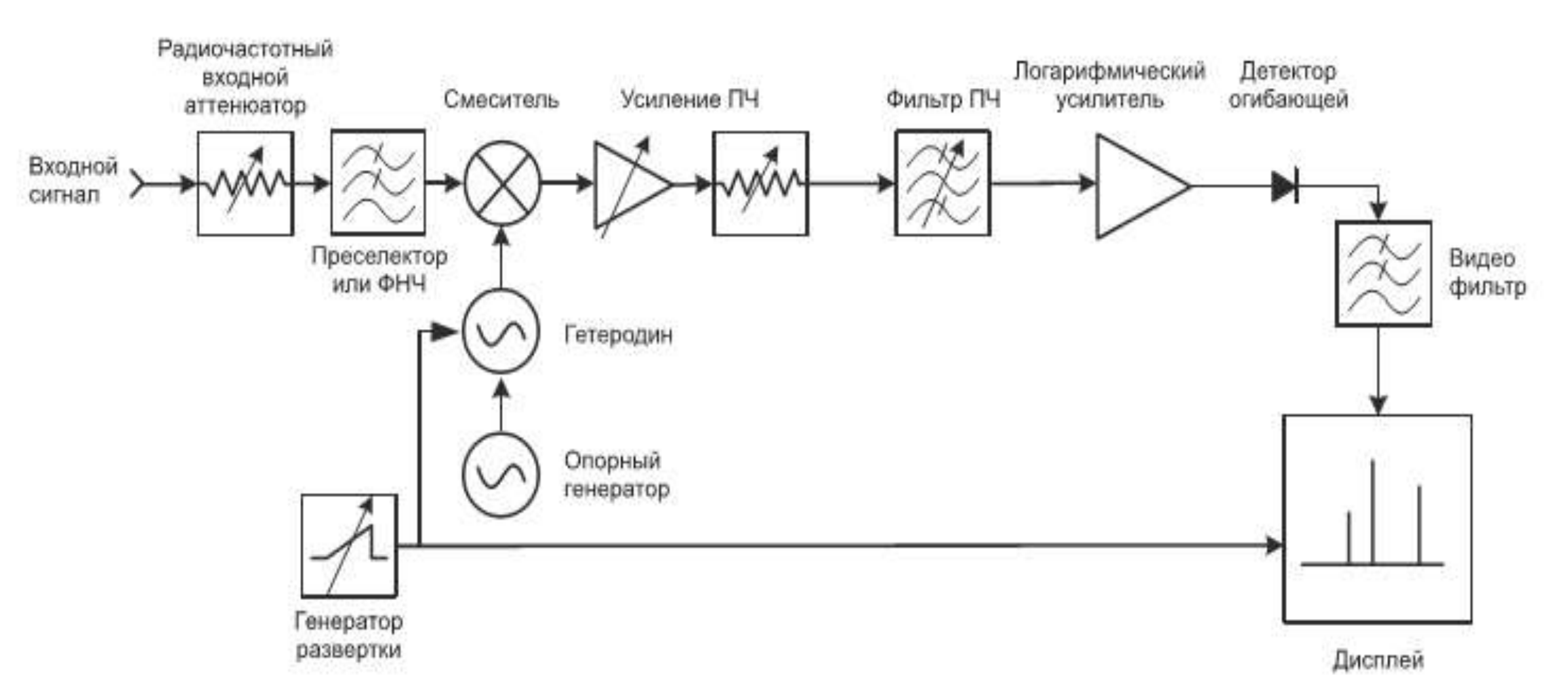
б) Случайная последовательность импульсов



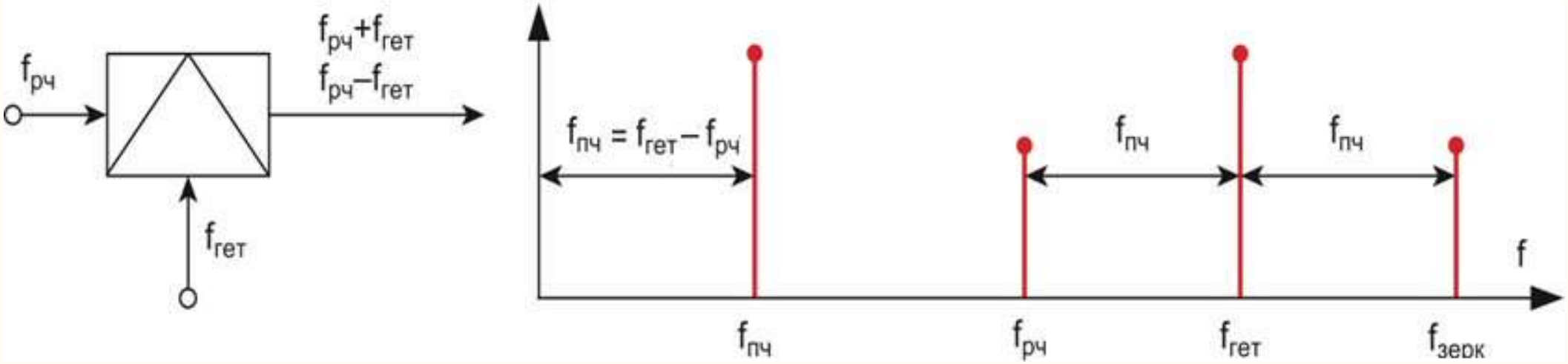
в) Фазоманипулированный сигнал QPSK

Случайная последовательность прямоугольных импульсов б) и фазоманипулированный сигнал с квадрупольной фазовой манипуляцией (QPSK) в).

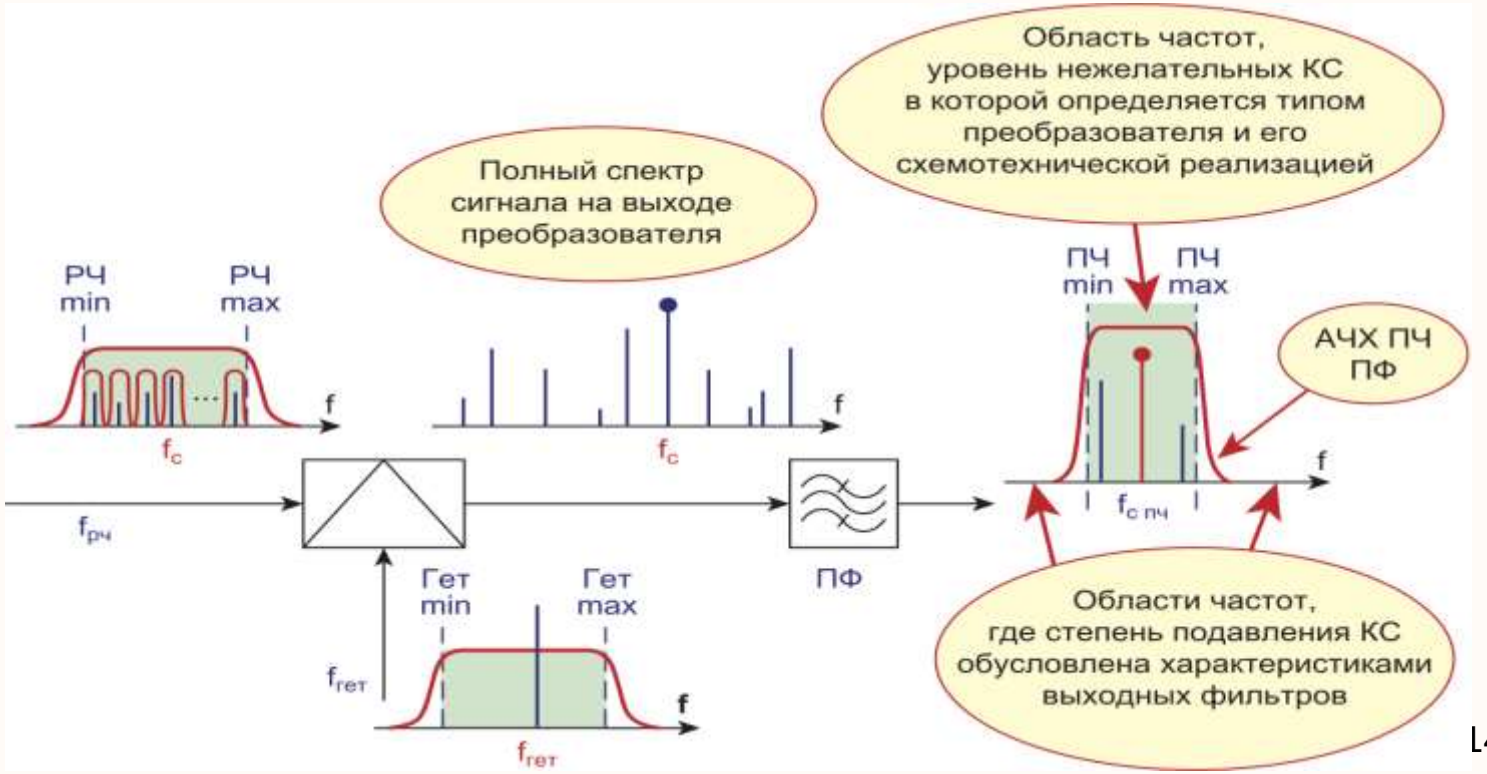
Структурная схема реального аналогового анализатора спектра с одним преобразованием частоты



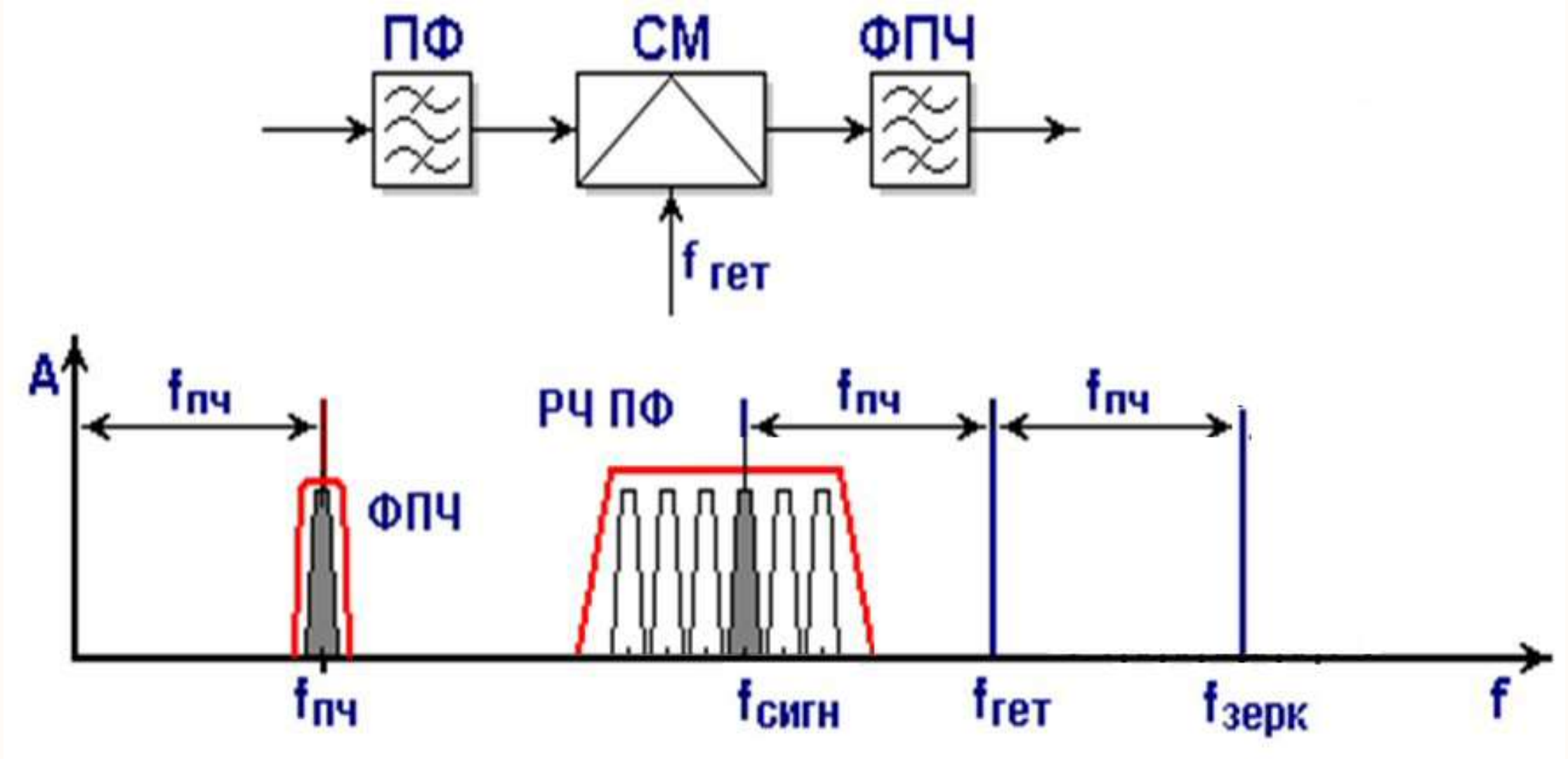
Основные каналы преобразователя частоты АС



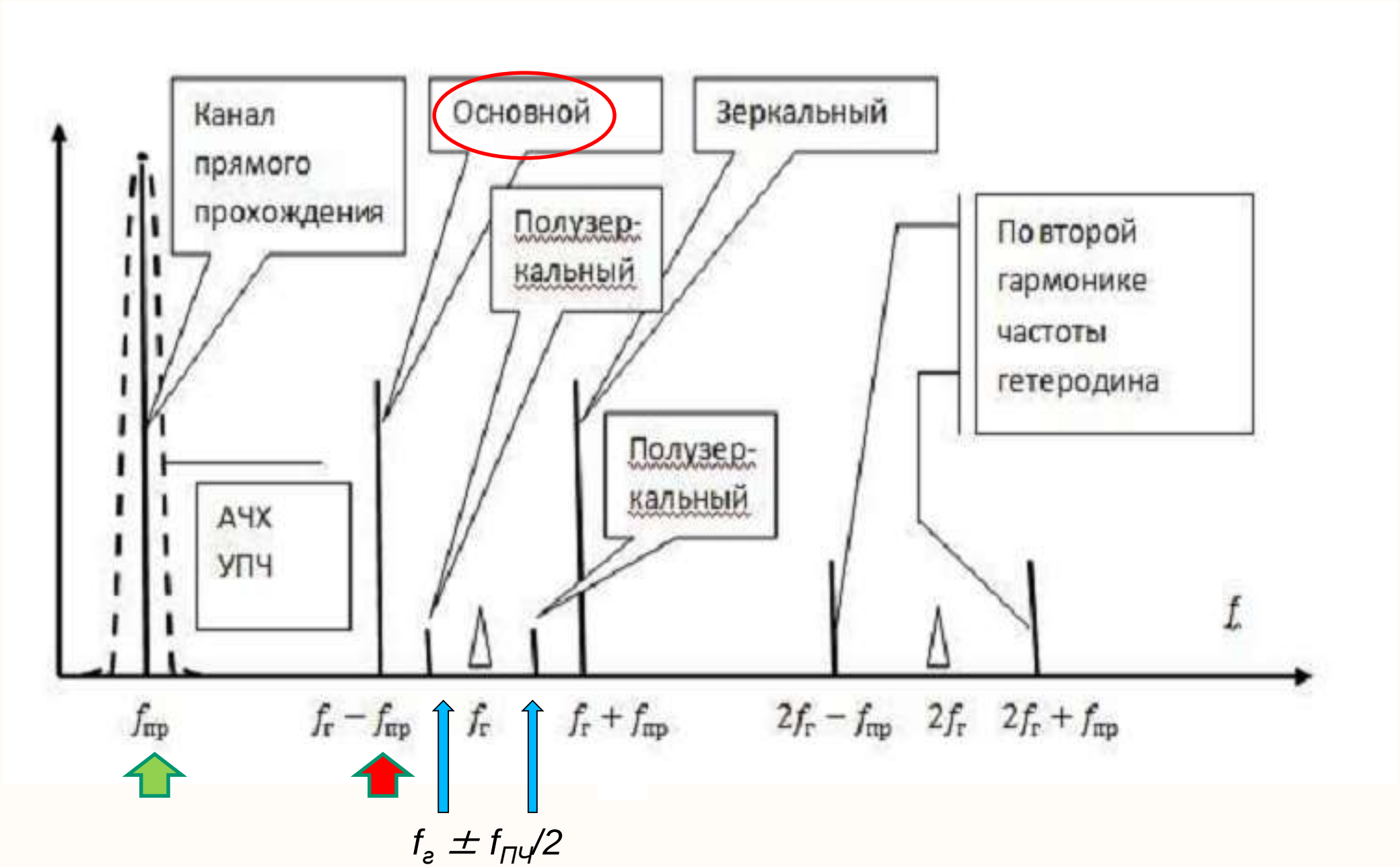
Выделение входного сигнала РЧ, сигнала гетеродина и сигнала ПЧ с помощью фильтров



Подавление «зеркального канала» преобразования сигнала в смесителе АС фильтром РЧ ППФ



Побочные каналы прохождения через реальный преобразователь частоты



Частоты комбинационных составляющих на выходе преобразователя:

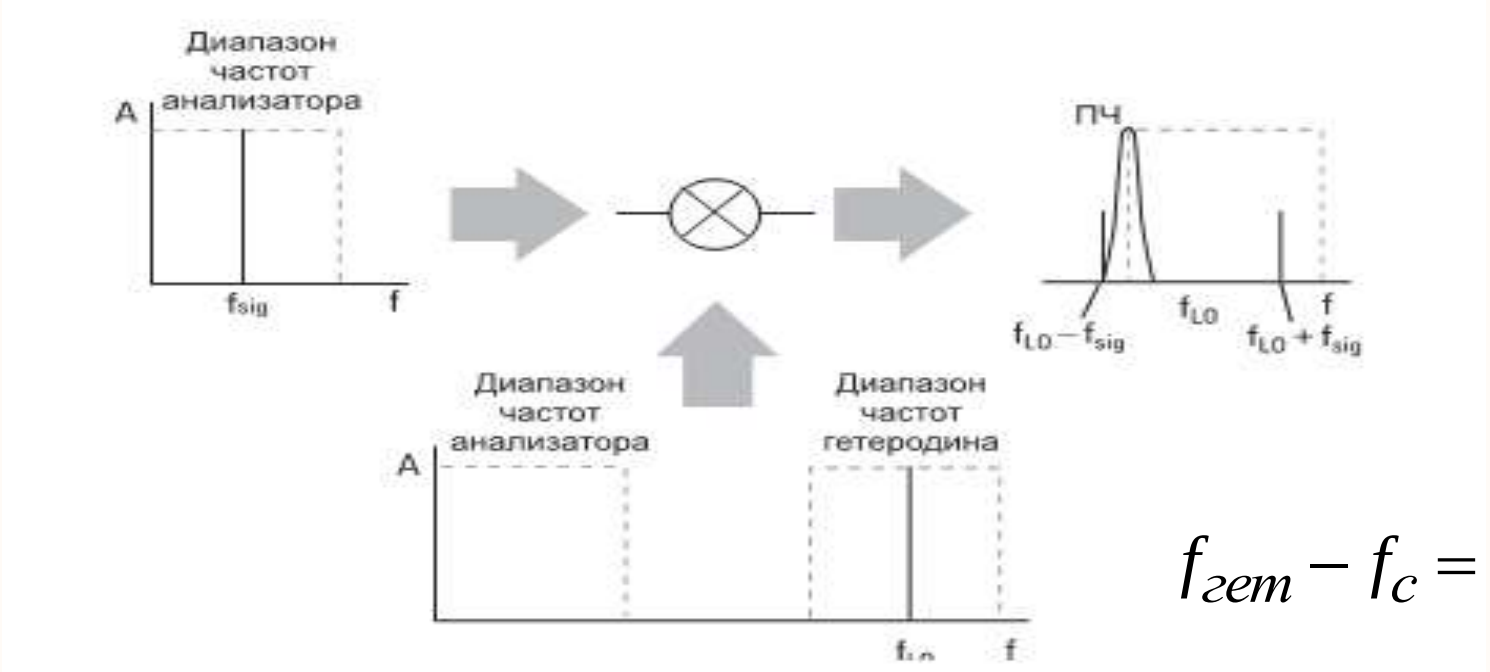
$\pm$ m fc $\pm$ n fгет, где m и n=0,1,2,3…

Каналы прохождения – частоты входного сигнала, которые преобразуются на ПЧ:

- Канал ***прямого прохождения***: m = 1, n = 0. Частота принимаемого по каналу прямого прохождения сигнала fc(1,0) = fпр .
- Каналы ***простого преобразования***: m = 1, n = 1. Частоты сигналов, преобразуемых на промежуточную частоту fc (1,1)= |fгет $\pm$ fпр |. (*основной* и *зеркальный* каналы)
- Каналы *преобразования основной* частоты сигнала *по гармоникам* частоты гетеродина: **fc = nfгет $\pm$ fпр.**
- Каналы, образованные преобразованием ***гармоник*** *входного* сигнала (m ≥ 2) *по гармоникам частоты* гетеродина (n ≥ 2). fc = (nfгет $\pm$ fпр)/m.

При m=2 и n=2 получаются “**полузеркальные**” “каналы приема по вторым гармоникам сигнала и гетеродина (fc = fг $\pm$0.5fпр). Полузеркальные каналы близки к частоте полезного сигнала, в 4 раза ближе зеркального канала и их сигналы очень трудно отфильтровать

Как правильно выбрать расположение частот сигнала, гетеродина и ПЧ?



$$f_{гет} - f_c = f_{ПЧ}$$

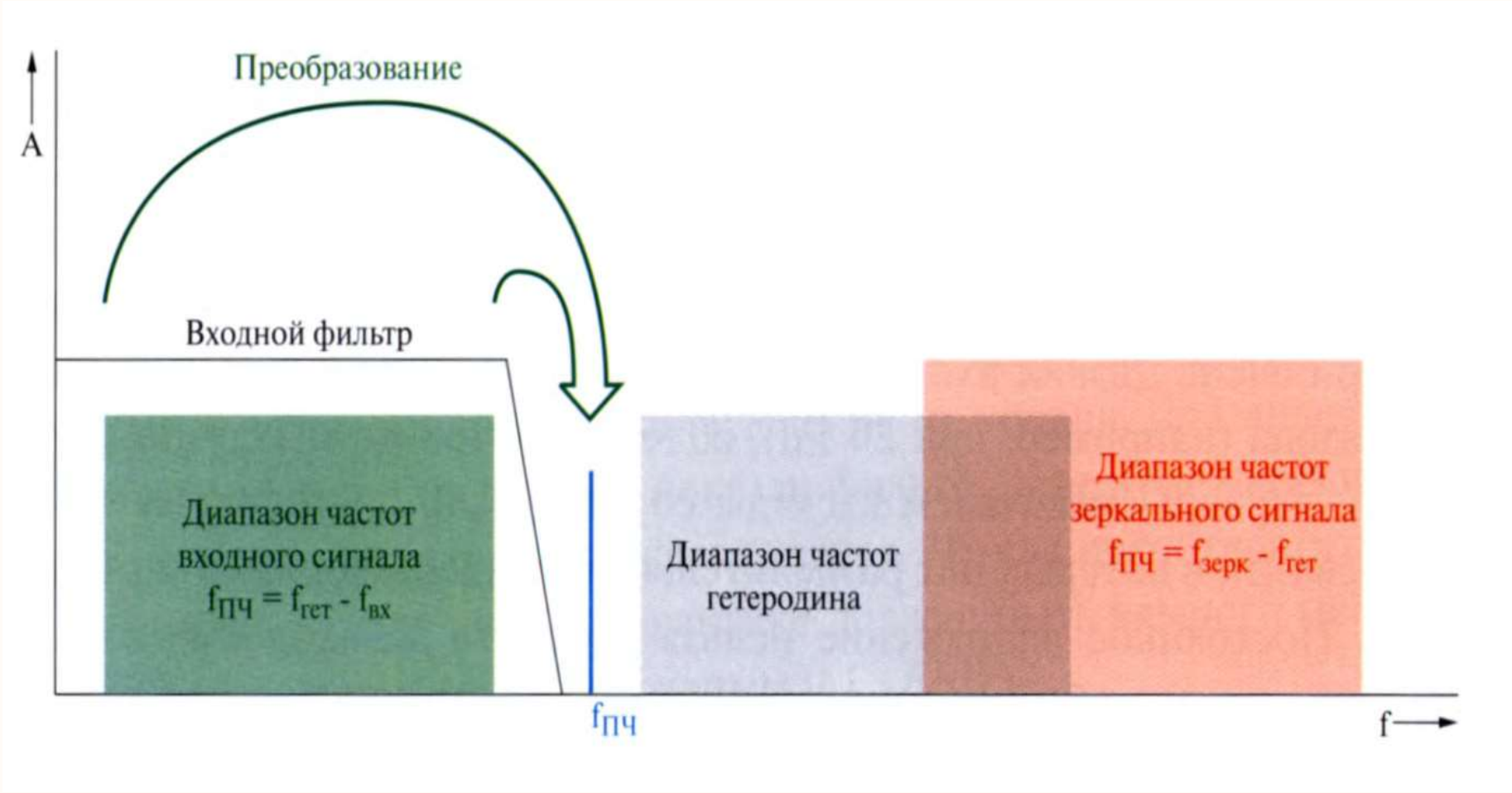
1. Частота ПЧ не должна не попадать в полосу частот сигнала, т.к. при этом входной сигнал просачивается на выход смесителя при любой частоте гетеродина («сквозное прохождение ПЧ»). Надо, чтобы $f_{ПЧ} > f_{c\max}$

2. Если частота ПЧ НИЖЕ полосы сигнала, то при малой частоте сигнала и сигнал гетеродина проходит через фильтр ПЧ. $f_{гет} \Rightarrow f_{ПЧ}$ Формируется ***нулевой*** отклик АС («сквозное гетеродинное просачивание») даже без сигнала на входе.

3. Поэтому в АС делают частоту гетеродина выше частоты ПЧ $f_{гет} > f_{ПЧ} > f_{c\max}$

Типовое расположение первой ПЧ, частот сигнала и гетеродина

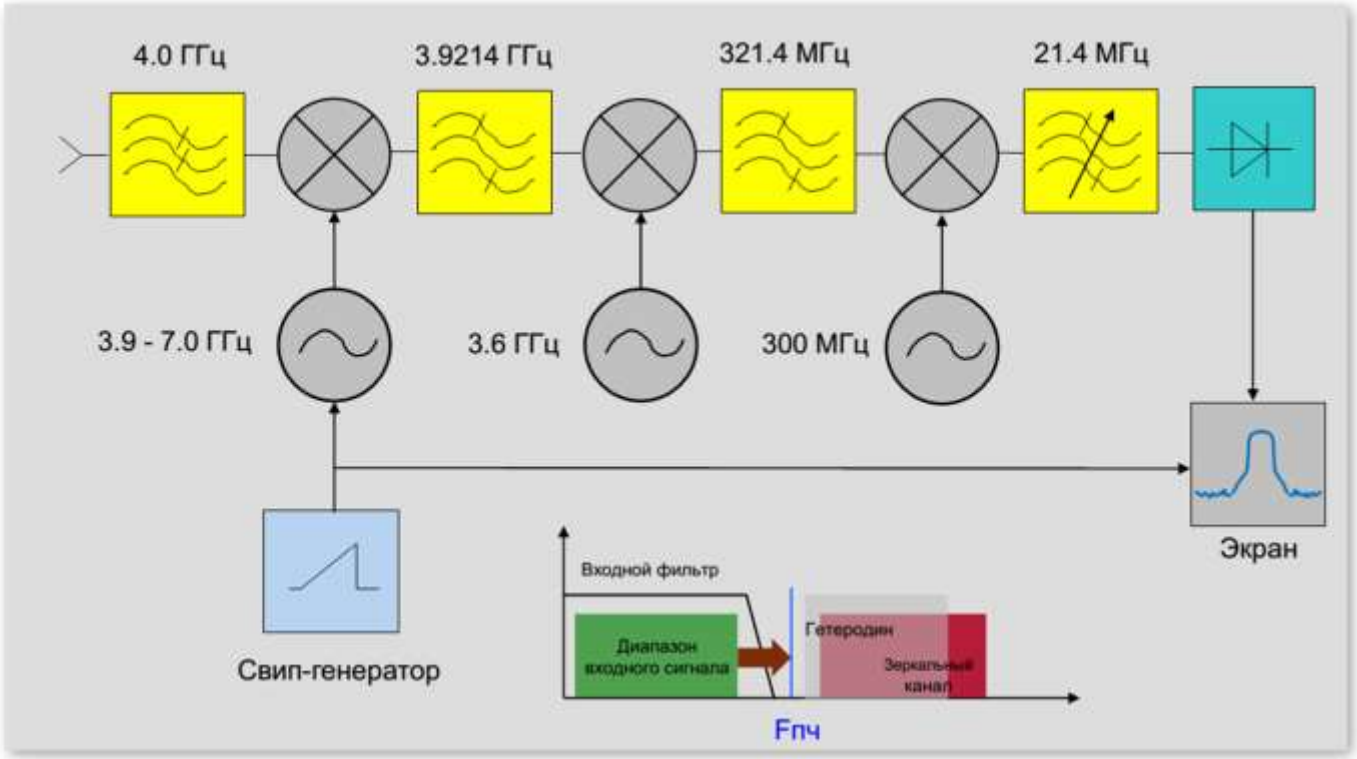
$$f_{гет} - f_c = f_{ПЧ} \Rightarrow f_{гет} > f_{ПЧ} > f_{c\,max}$$



$$f_{зерк} - f_{гет} = f_{ПЧ}$$

Подавление зеркального канала прохождения сигнала входным фильтром

АС диапазона до 4 ГГц с тройным преобразованием частоты



При выборе высокой первой ПЧ упрощается фильтрация помехи по зеркальному каналу (входной ППФ). Фильтрация сигнала осуществляется узкополосным фильтром на третьей ПЧ, где легче реализовать такой фильтр

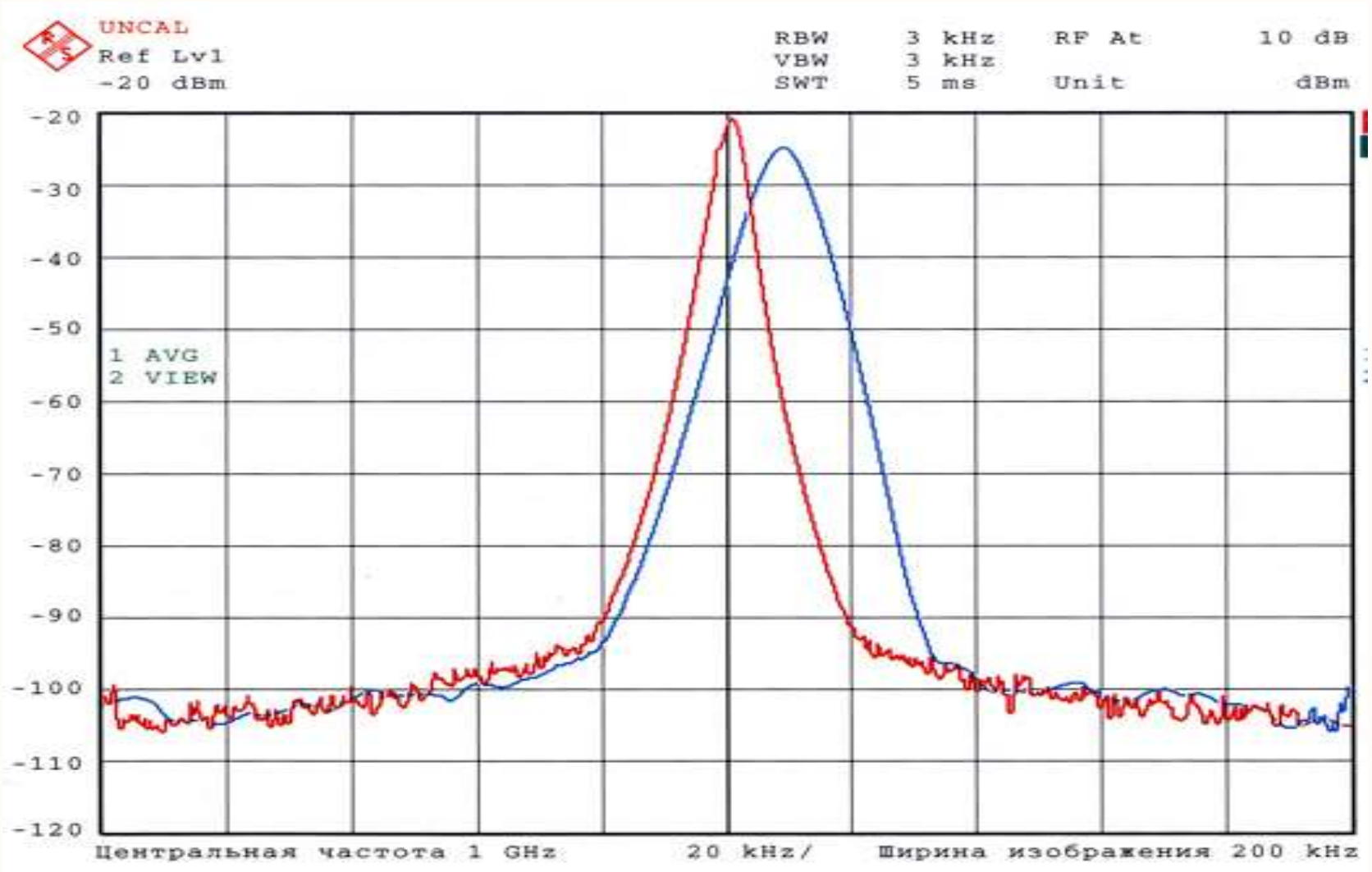
Условия неискаженного воспроизведения спектрограммы

- Длительность времени анализа Та >>Т – периода сигнала
- Минимизация *собственных шумов* АС- тепловые шумы, фазовые шумы гетеродина, шум смесителя и УПЧ
- Минимизация *нелинейных искажений* во входных цепях АС- ошибка амплитуды, появление гармоник и комбинационных составляющих
- Минимизация *помех* по *паразитным* каналам (зеркальный канал, соседний канал , сквозное прохождение сигнала гетеродина)
- Правильный выбор режима анализа для минимизации *динамических искажений спектрограммы*

Динамические искажения спектрограммы

Снижение динамических искажений при увеличении времени анализа Та

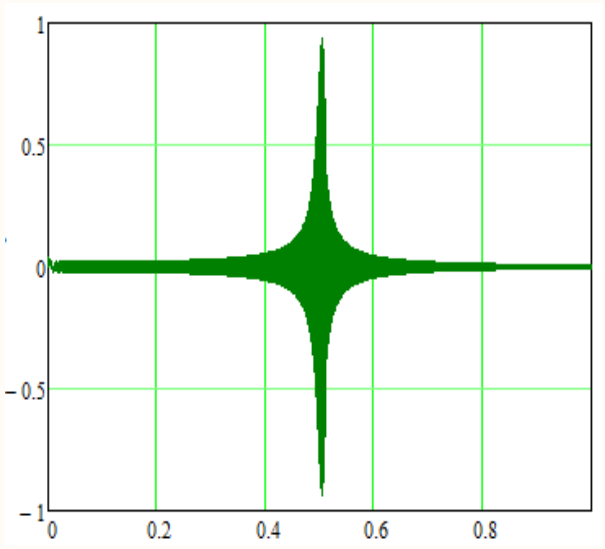
$$T_a \geq \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{УПЧ})^2}$$



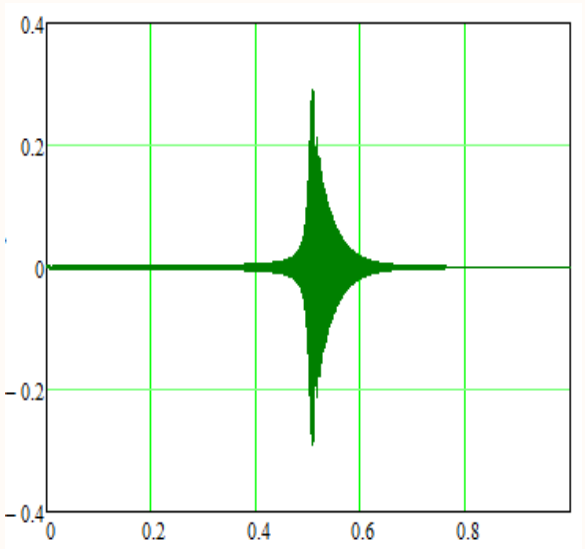
Моделирование динамических искажений в одиночном контуре при разной полосе пропускания (RBW – var)

Одиночный контур: резонансная частота 5 МГц.

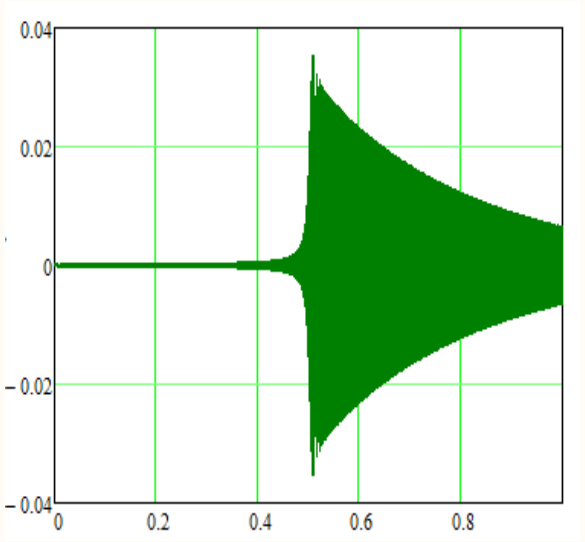
ЛЧМ сигнал: полоса качания 1Гц…10 МГц, амплитуда 1В.
Длительность ЛЧМ (время качания)=1 мс.



а)



б)



в)

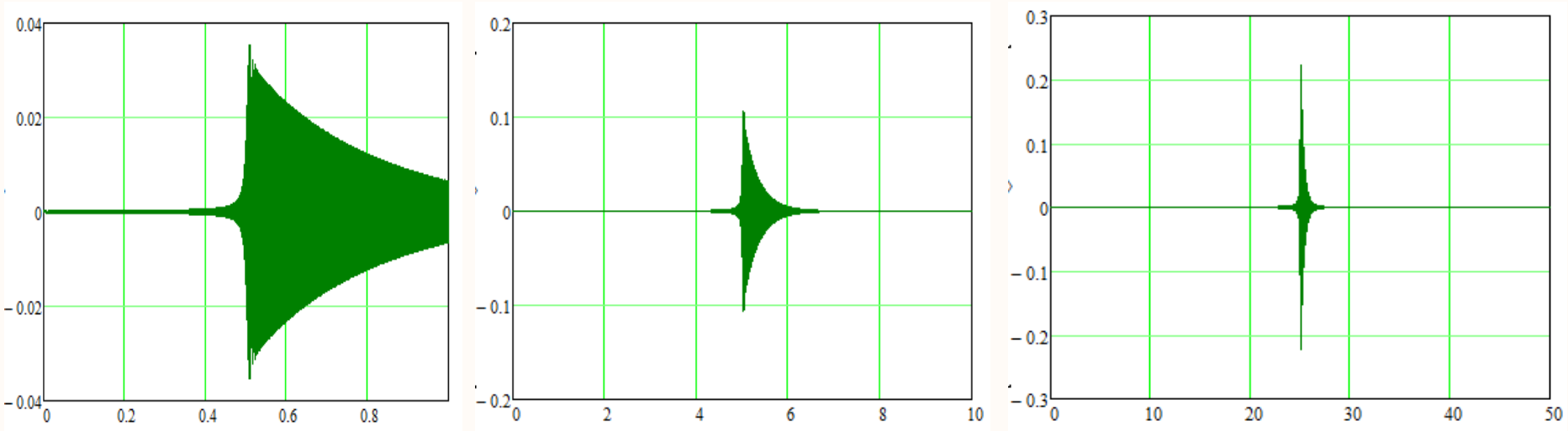
Полоса пропускания контура :

а) 100кГц (μ=1); б) 10 кГц (μ=100); в) 1 кГц (μ=10000).

Моделирование динамических искажений в одиночном контуре при разном времени качания (Та – var)

Одиночный контур: резонансная частота 5 МГц.

ЛЧМ сигнал: полоса качания 1 Гц…10 МГц, амплитуда 1В. Полоса пропускания контура 1кГц;



а) б) в)

Длительность ЛЧМ (время качания):

а) 1 мс (μ=10000); б) 10 мс (μ=1000); в) 50 мс (μ=200).

Детектирование сигнала с выхода фильтра ПЧ

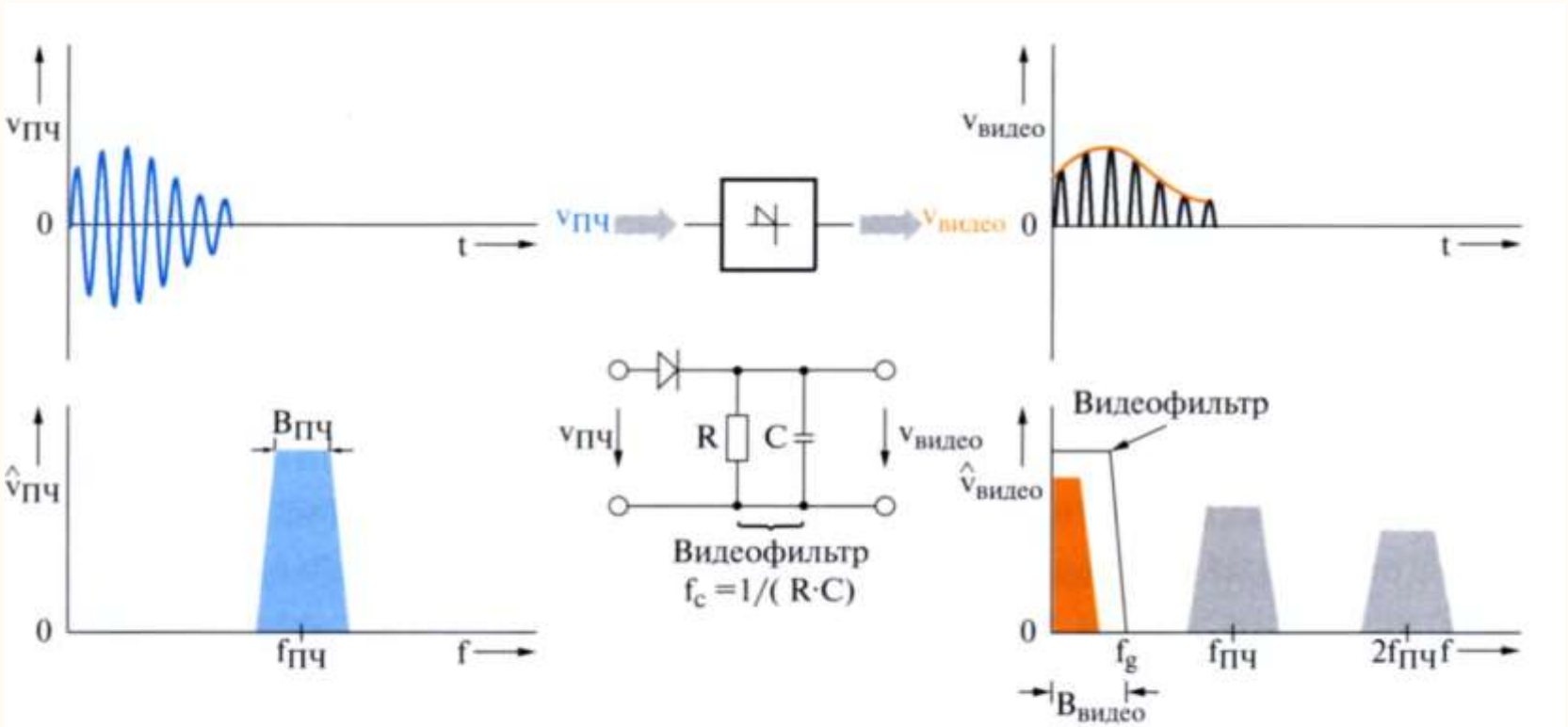


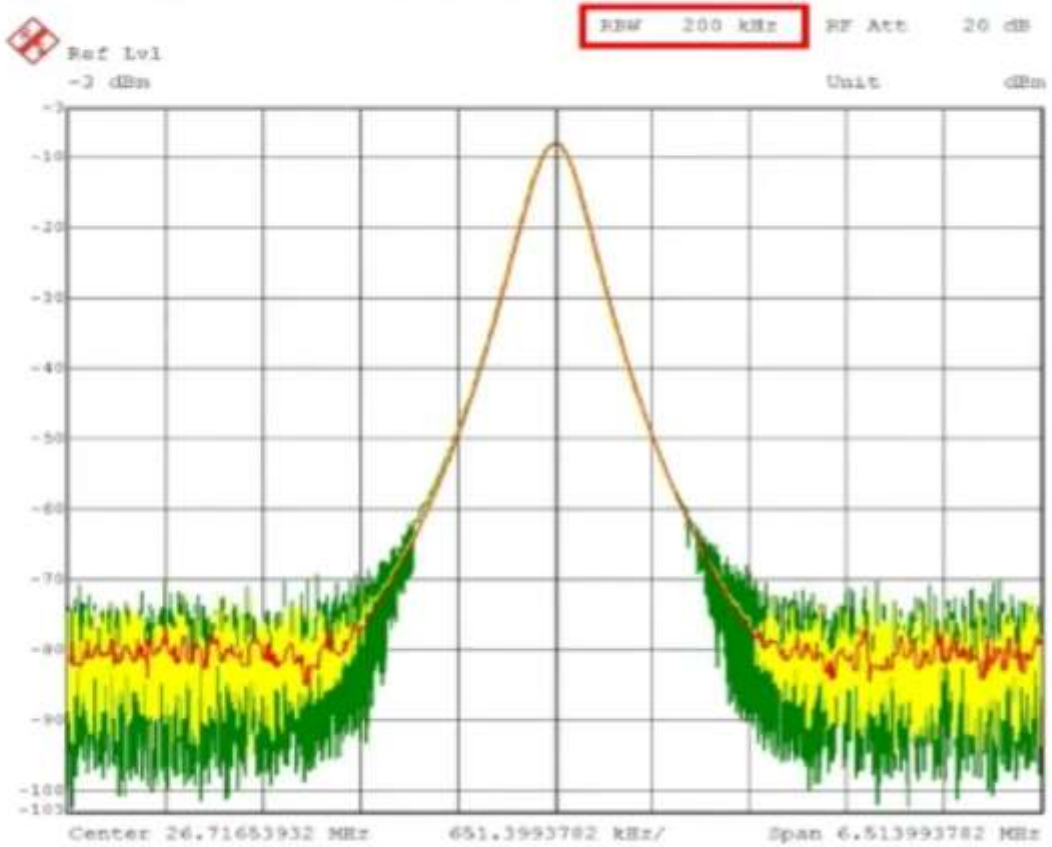
Рис. 4.16. *Детектирование огибающей ПЧ сигнала с помощью детектора огибающей*

Выбор полосы пропускания **видеофильтра** (постоянной времени детектора) определяет искажения огибающей. Полосу уменьшают для сглаживания шумовых сигналов и помех на огибающей сигнала

Выбор полосы пропускания видеофильтра VBW

Принцип работы видеодетектора и видеофильтра

эффекты НЧ фильтрации – преимущества – подавление шума

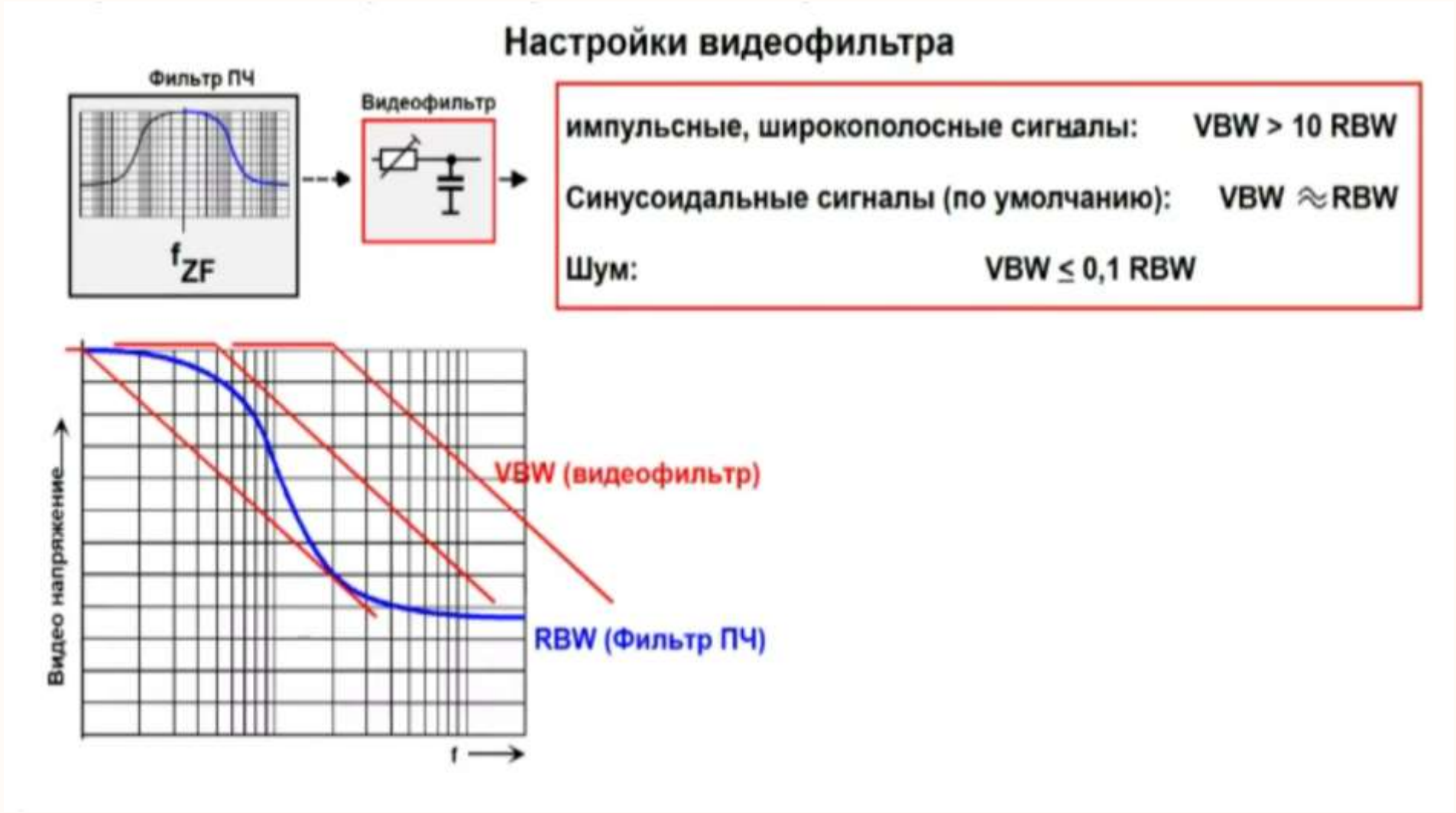


VBW = 20 kHz

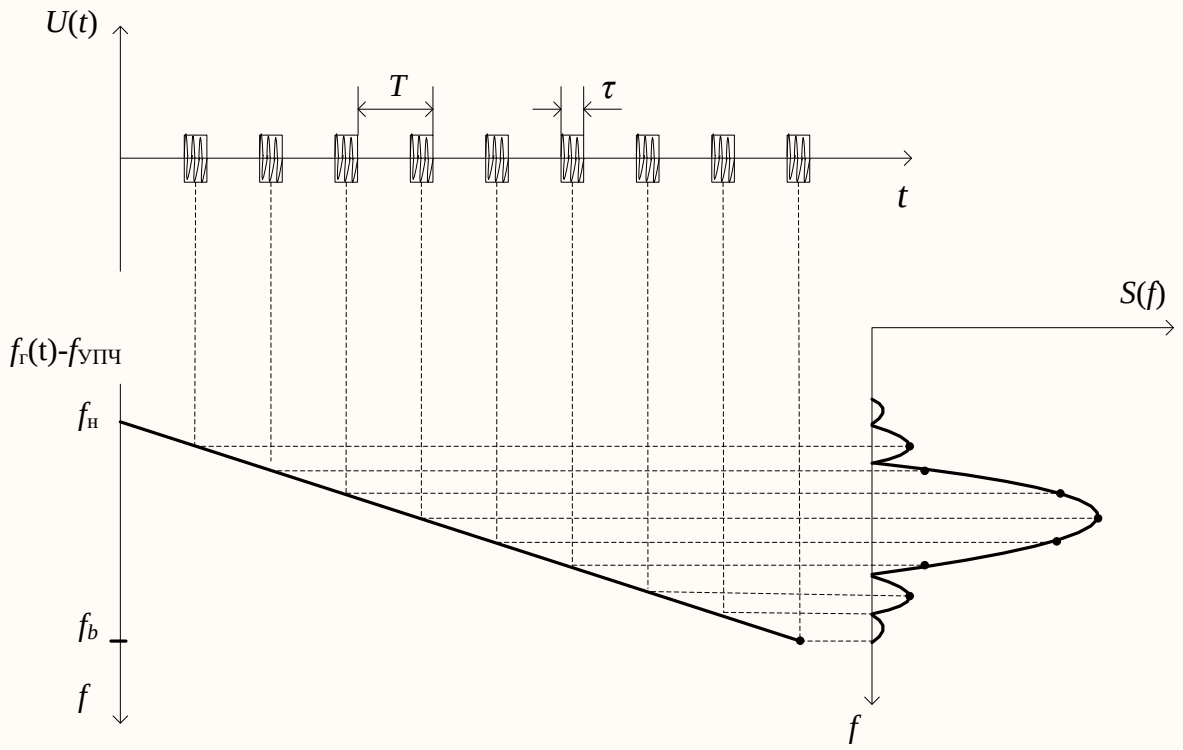
VBW = 200 kHz

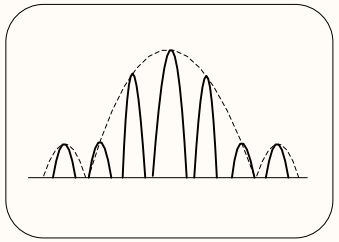
VBW = 2 MHz

Выбор соотношения RBW/VBW для разных сигналов



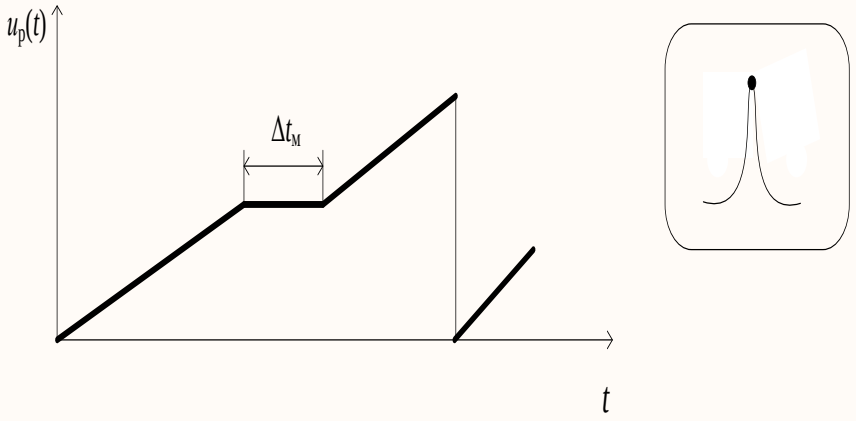
Исследование импульсов с большой скважностью. Время анализа соизмеримо с периодом повторения сигнала



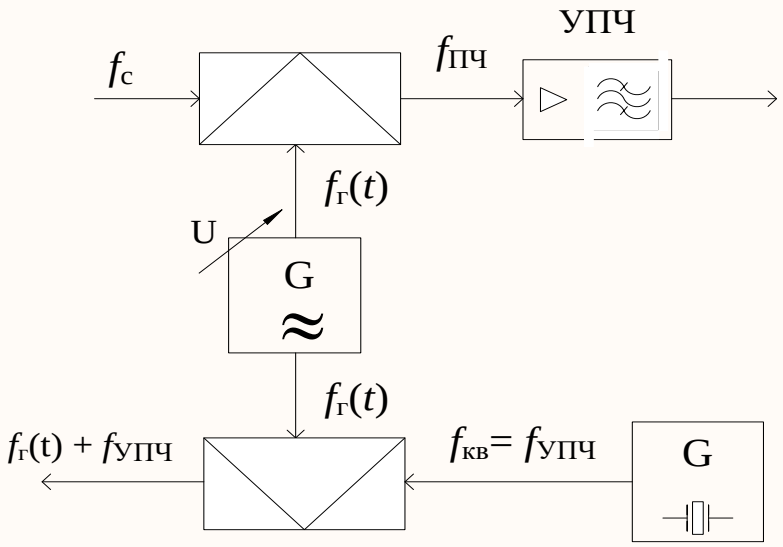


Измерение параметров спектра (уровень гармоник, частота гармоник)

- Метод калиброванных шкал
- Метод сравнения с эталонными сигналами (частотные метки)
- Метод стоп-метки



Измерение АЧХ с помощью следящего генератора (tracking generator)



Параметры последовательного анализатора спектра

- ***Рабочий диапазон*** частот - может быть разбит на поддиапазоны.
- ***Полоса анализа*** –диапазон частот, в котором производится обзор спектра сигнала за один ход развертки (регулируется от нуля до максимальной).
- ***Время анализа*** Та - это время свипирования полосы анализа (регулируется)
- ***Разрешающая способность*** - минимальная разность частот двух одинаковых гармонических составляющих, при которых их отклики на спектрограмме сливаются на уровне 0,5 или 0.7. Различают статическую и динамическую РС.
- ***Чувствительность*** - минимальный уровень входного синусоидального сигнала, при котором его отклик превышает уровень шумов на спектрограмме в заданное число раз (например, на 20 дБ).

•*Максимальный уровень входного сигнала* определяется уровнем допустимых искажений спектрограммы.

•*Динамический диапазон* - это соотношение максимального и минимального уровней гармоник, при котором искажения спектра пренебрежимо малы.

•*Метрологические параметры* - погрешность измерения уровня гармоник dU и погрешность измерения частоты гармоники df . Погрешность измерения амплитуды включает погрешность калибровки и погрешность неравномерности собственной АЧХ, погрешность калиброванного аттенюатора и пр. Погрешность измерения частоты определяется точностью калибровки шкалы, точностью совмещения метки с выбранной точкой спектрограммы, погрешностью частотомера.

Разрешающая способность АС

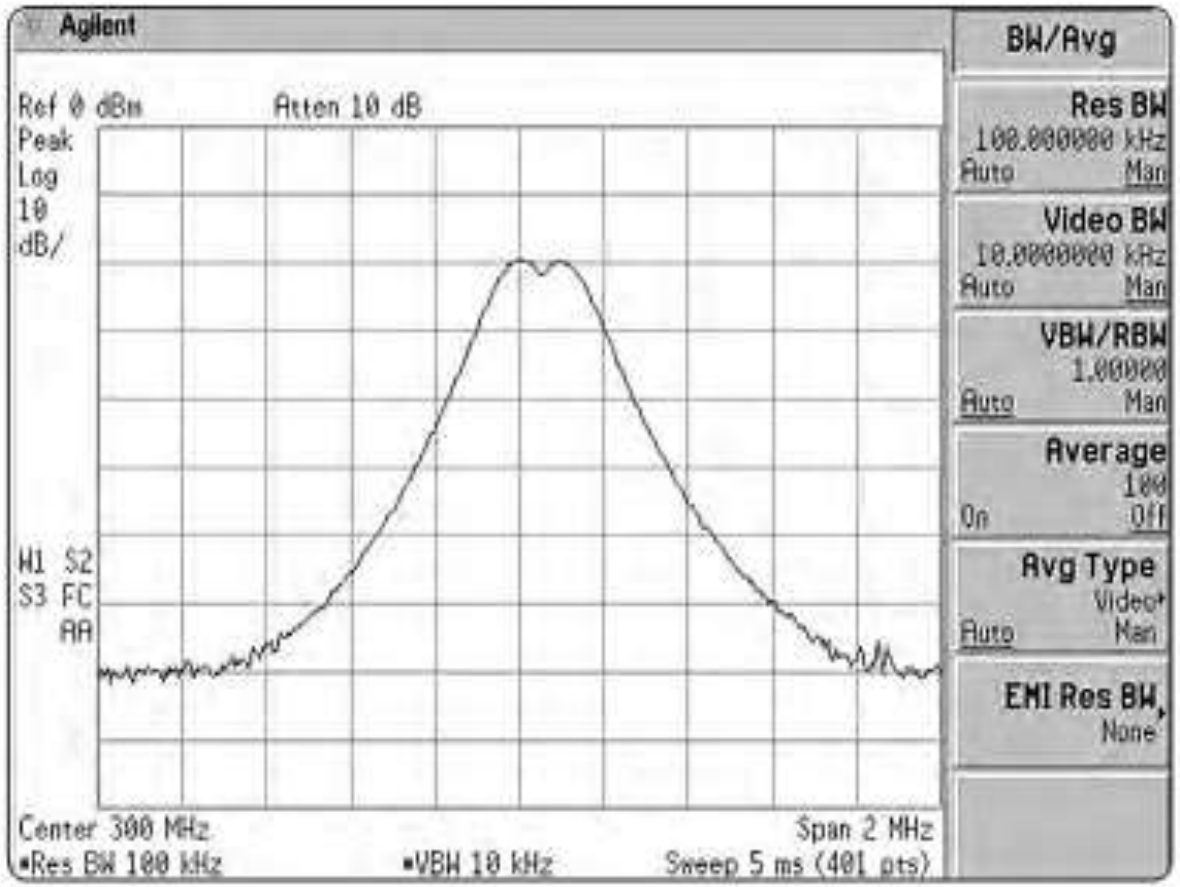


Рисунок 2-7. Две синусоиды равной амплитуды, разделенные по частоте на полосу по уровню 3 дБ выбранного фильтра ПЧ, могут быть разрешены

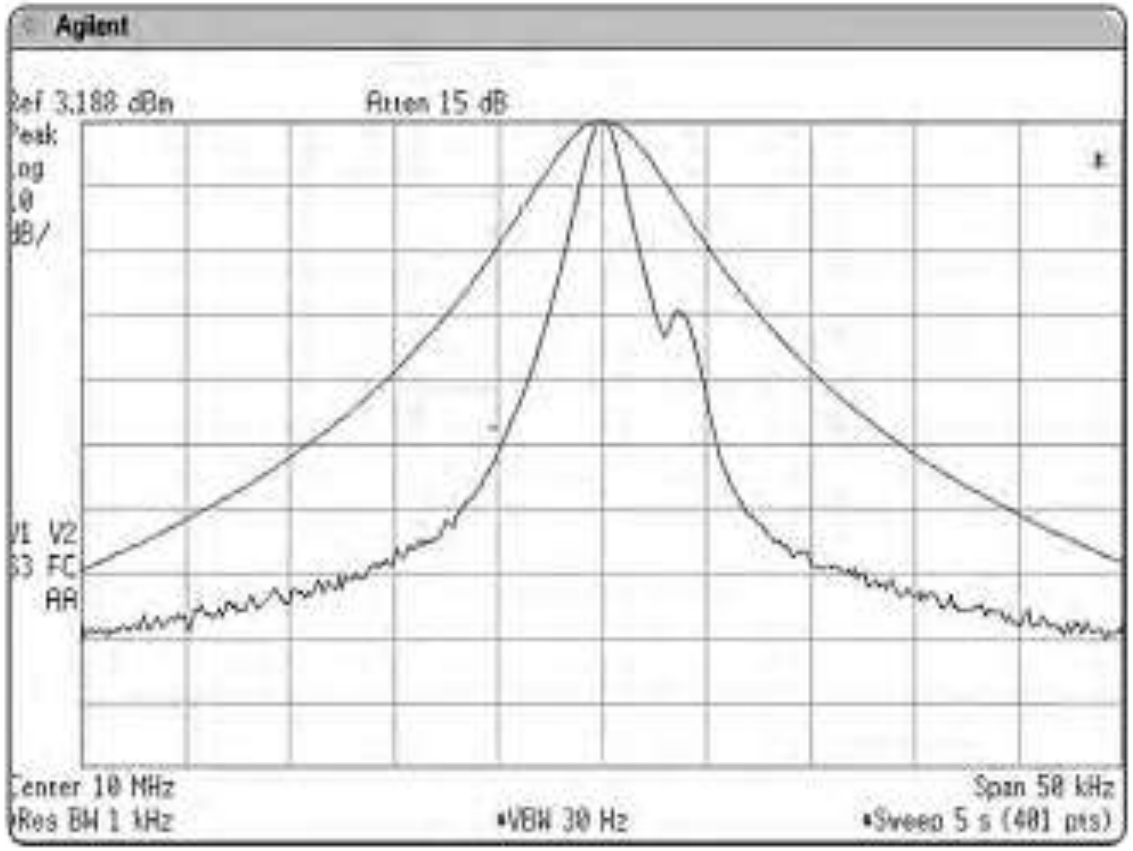


Рисунок 2-10. 3-кГц-вый фильтр (верхняя трасса) не позволяет различить меньший сигнал; уменьшение полосы разрешения до 1 кГц (нижняя трасса) позволяет это сделать

Шумы и чувствительность АС

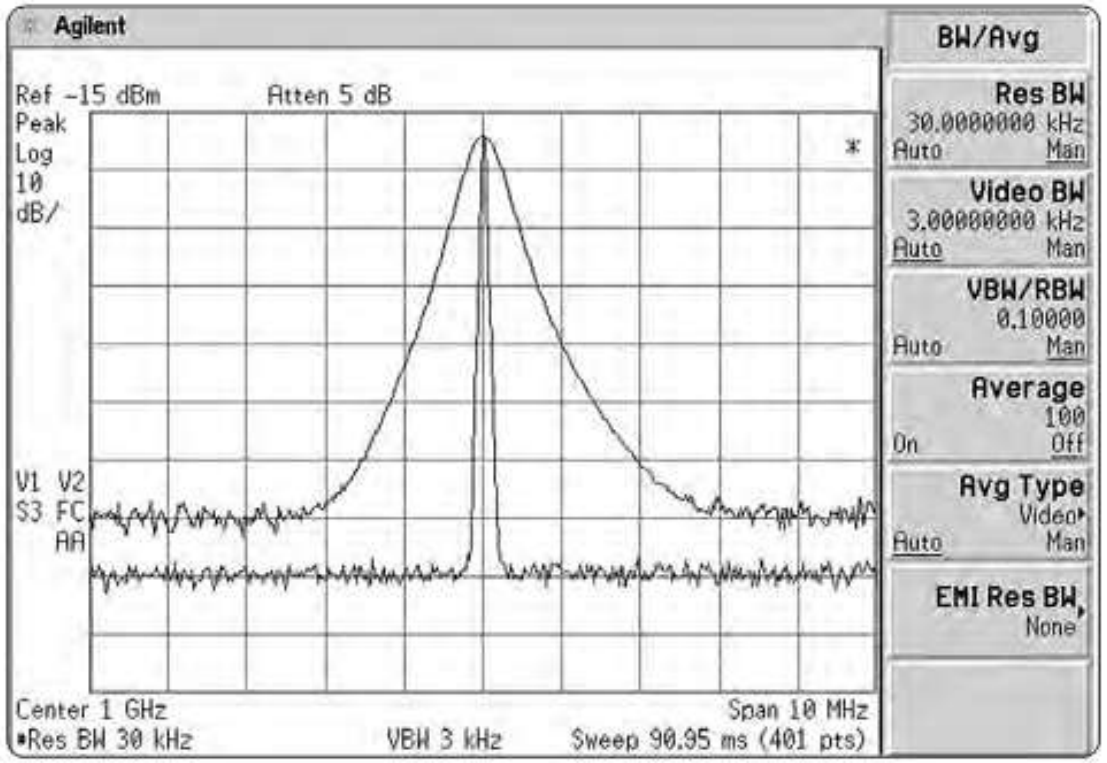


Рисунок 5-2. Отображаемый средний уровень шума изменяется как 10 log (BW_1/BW_2)

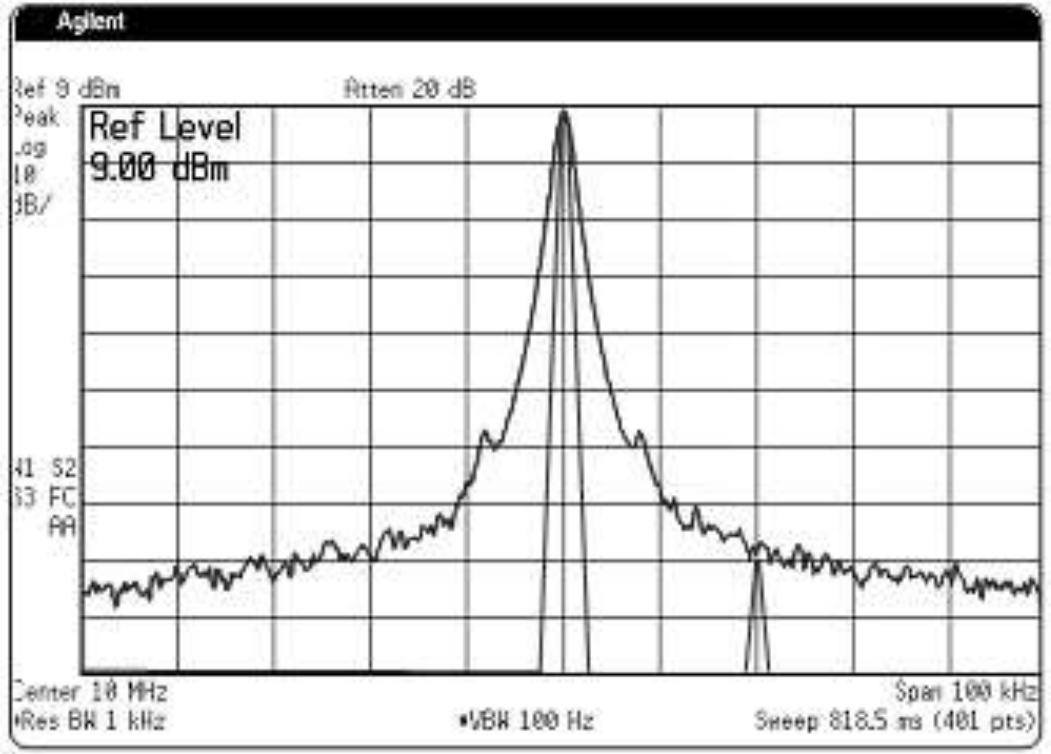


Рисунок 2-13. Фазовый шум может помешать разрешению неравных по амплитуде сигналов

Тепловой шум согласованной (50 Ом) нагрузки, пересчитанный на вход АС, зависит от полосы УПЧ (RBW)

$$P_{ш} = kT \cdot \Delta f_{УПЧ}$$

Для полосы 1 Гц минимальный уровень теплового шума при комнатной температуре составляет -174 дБм/Гц. Входные блоки АС и гетеродин увеличивают шум

Спектрограммы сигнал/шум при разных полосах видеофильтра – правильный выбор улучшает чувствительность АС

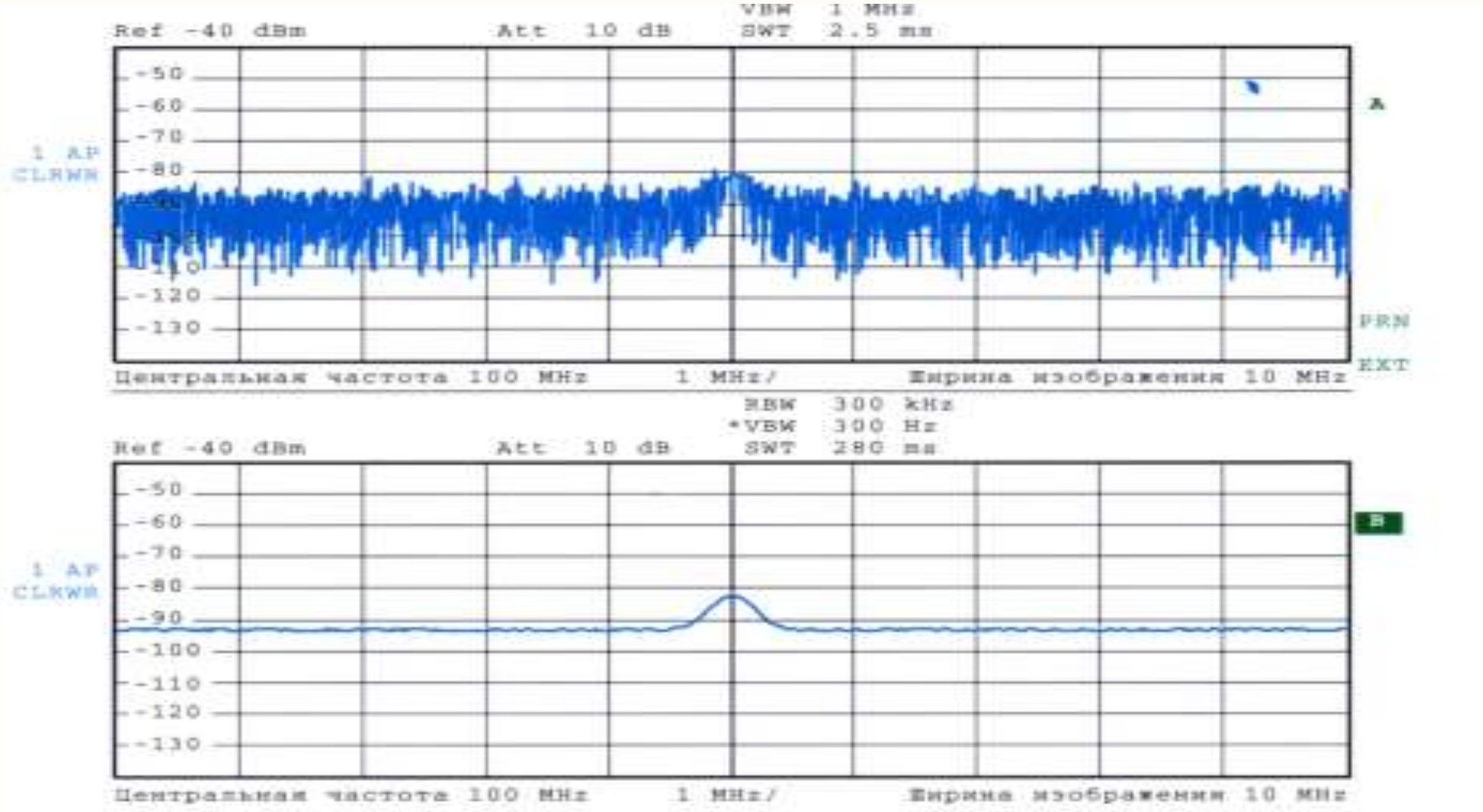
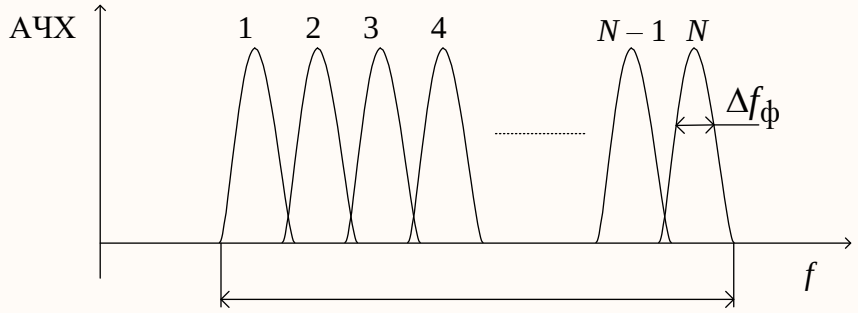


Рис. 4.19. *Синусоидальный сигнал с низким отношением сигнал/шум при больших (сверху) и малых (нижняя половина экрана) полосах видеосигнала*

Основные области применения анализаторов спектра

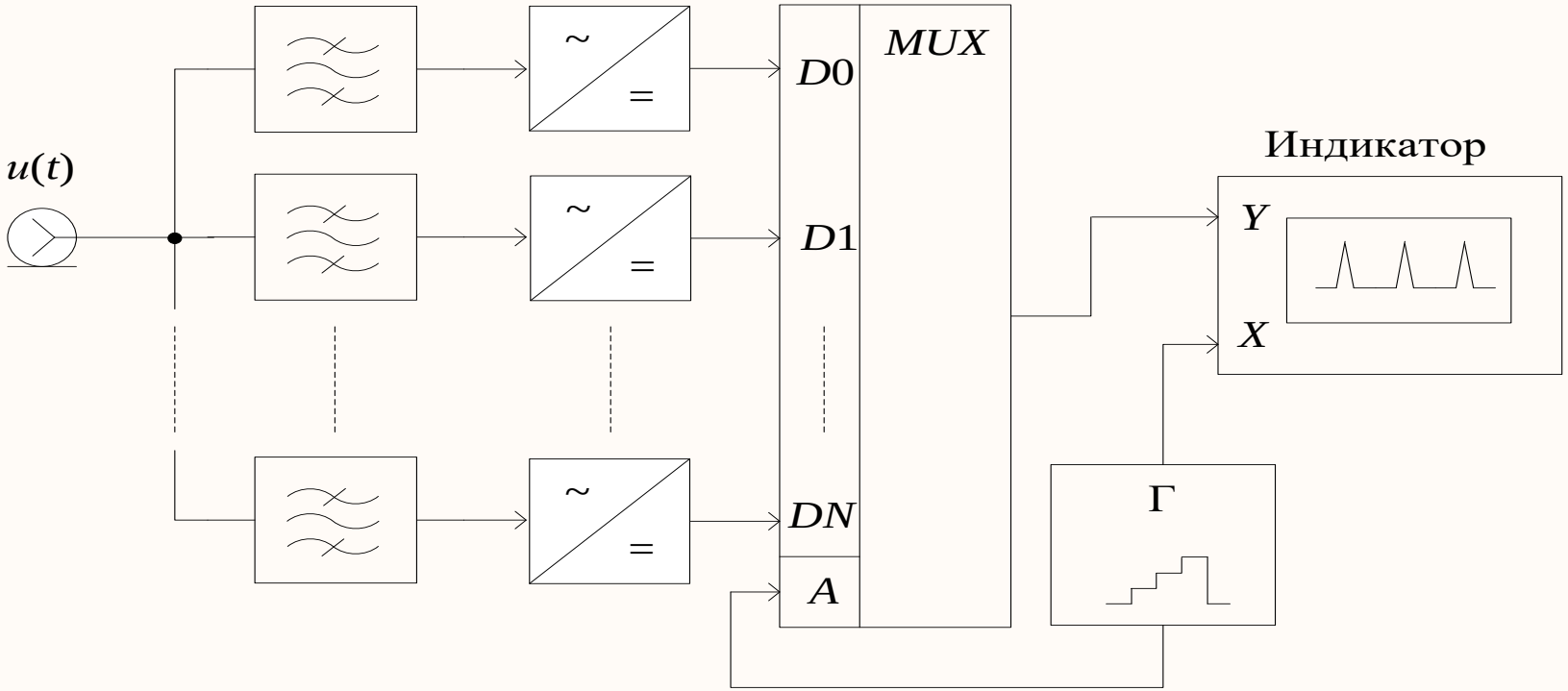
- *Измерение амплитуд и частот линейных спектров.* Спектроанализаторы имеют погрешность измерения амплитуды порядка 0,5-2 дБ, частоты – 10-3…10-6 (в зависимости от метода).
- *Измерение параметров модуляции.*
- *Измерение шумовых спектров и соотношения сигнал/шум.* Для измерения спектров шумовых (случайных) сигналов используется режим усреднения откликов спектроанализатора и детектор среднеквадратических значений.
- *Измерение спектров квазисинусоидальных сигналов.* Для генераторов с высокой стабильностью частоты (синтезаторов частоты и пр.) (остаточный ФМ шум).
- *Измерение нелинейных и интермодуляционных искажений.* Такие искажения оцениваются коэффициентом гармоник и коэффициентом интермодуляционных искажений.
- *Исследование паразитных модуляций радиоимпульсов* по виду их спектра.
- *Измерение амплитудно-частотных характеристик.* Это возможно в спектроанализаторах со следящим генератором по сравнению со стандартными измерителями АЧХ -большой динамический диапазон и низкий уровень шумов.

Параллельные спектроанализаторы



Частотные характеристики фильтров с одинаковой полосой пропускания

Примерная схема параллельного спектроанализатора реального времени



Разрешающая способность примерно равна полосе пропускания фильтров. Если их АЧХ частично *перекрываются*, то на спектрограмме появляются паразитные отсчеты, обусловленные прохождением сигнала гармоники одновременно в два соседних фильтра.

Для одной и той же разрешающей способности по диапазону фильтры приходится делать с одинаковой *абсолютной* полосой пропускания. При этом у каждого фильтра разная относительная полоса и неодинаковая эквивалентная добротность. На НЧ потребуются фильтры с добротностями сотни и тысячи, что физически нереализуемо. Поэтому применяют фильтры с одинаковой относительной полосой (добротностью). Тогда абсолютная полоса пропускания и разрешающая способность АС зависит от центральной частоты фильтра.

Принято указывать полосу фильтров в долях октавы. Доля октавы – это корень соответствующей степени из 2. Для отношения граничных частот полосы пропускания f1, f2 октавный, полуоктавный или третьоктавный фильтры соответствуют соотношению:

$$f_2 / f_1 = \sqrt[1]{2} = 2,\ \sqrt[2]{2} = 1.41,\ \sqrt[3]{2} = 1.26,\ \ldots$$

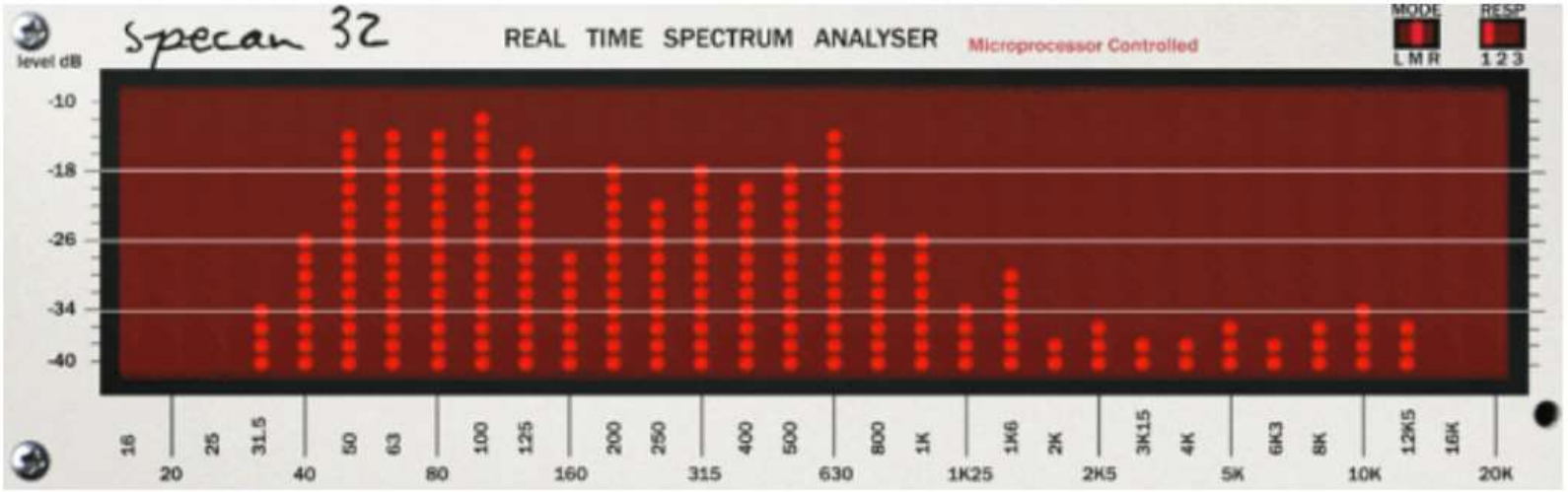
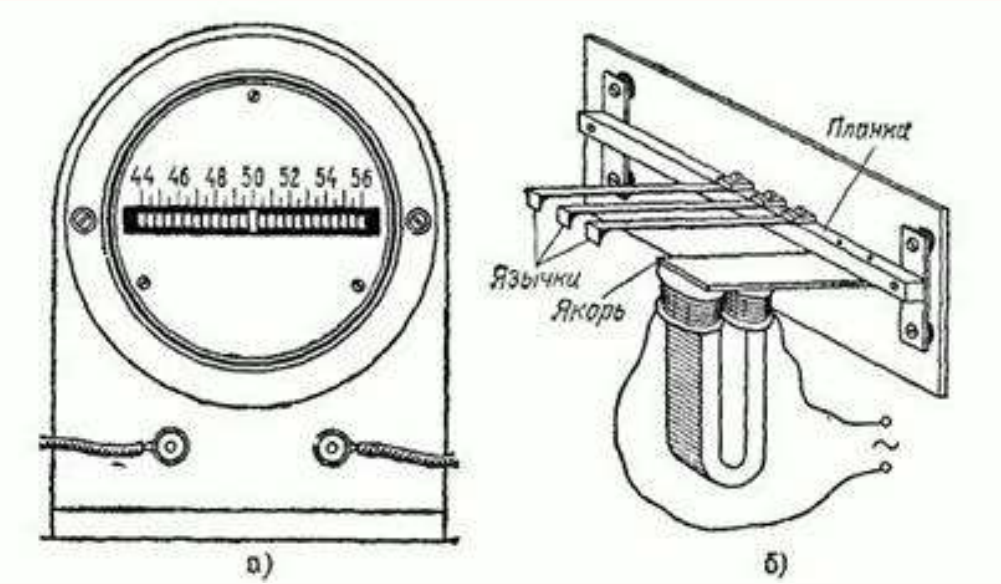


Рис. 1. Третьоктавный анализатор Specan32, эмулирующий известный прибор KlarkTeknik DN60



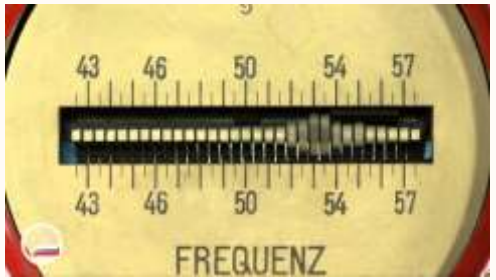
Третьоктавный фильтр. На одну октаву спектра сигнала (отношение частот 2:1) надо три фильтра. Полосы пропускания у фильтров будут разные, а добротность их - одинаковая

Электромеханический вибрационный частотомер как пример параллельного АС



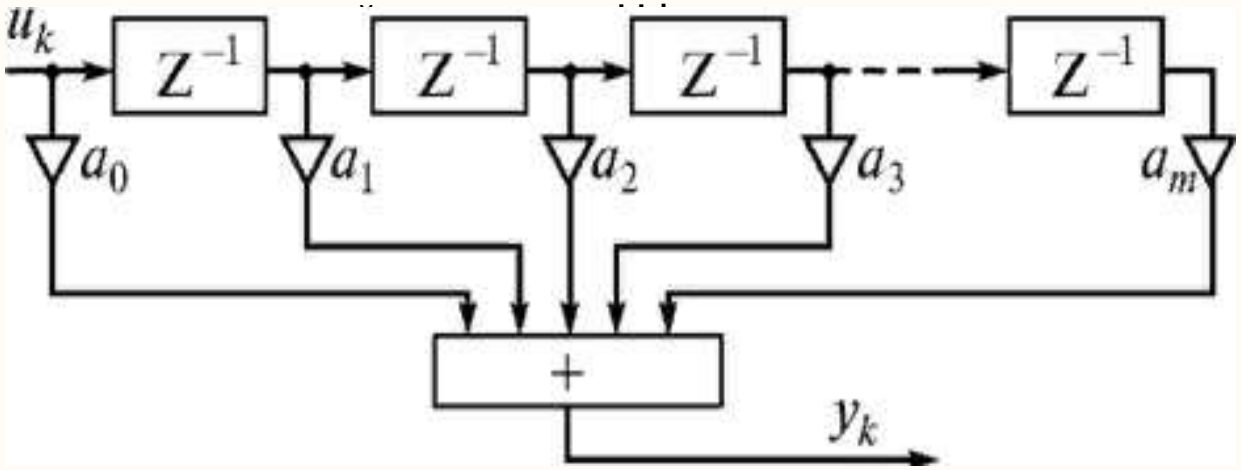


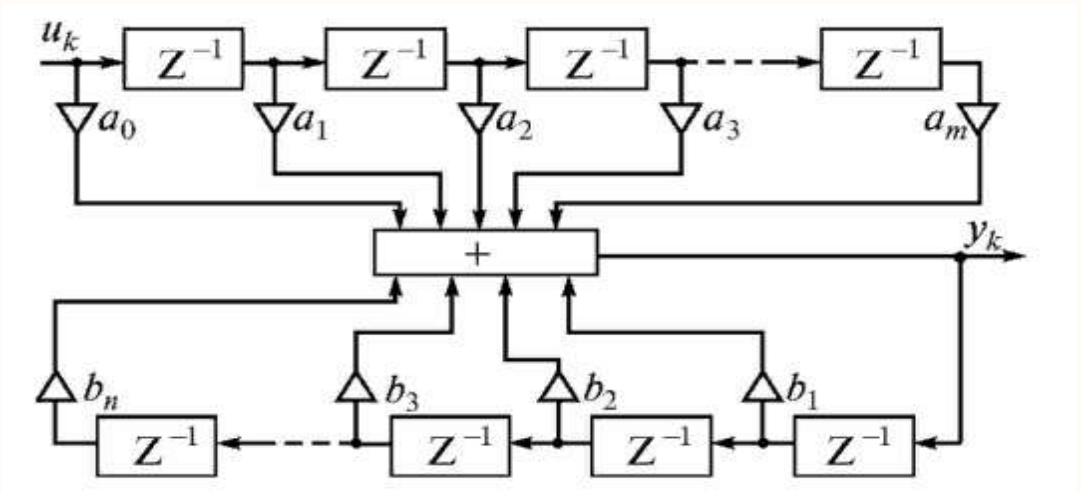
Частотомер – совокупность резонаторов- язычков (как в губной гармошке), имеющих разные резонансные частоты. Возбуждение язычков электромагнитом, по которому протекает ток с неизвестной частотой, приводит к возбуждению одного из язычков. Визуально это видно по вибрации конца язычка. Отчет частоты ведется по шкале прибора (градуированной в резонансных частотах язычков)



Спектроанализаторы на цифровых фильтрах (ЦФ)

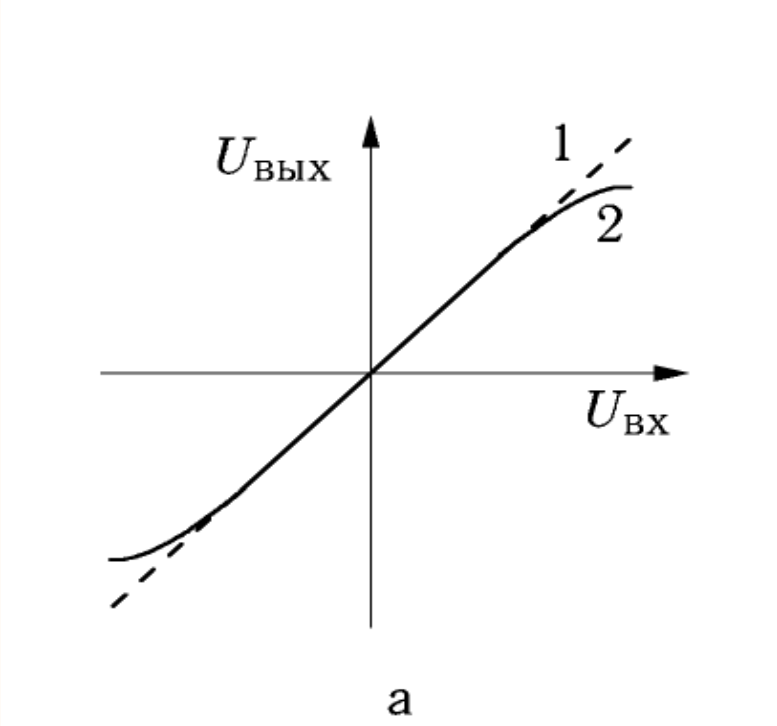
На входе анализатора с ЦФ ставят АЦП для дискретизации входного сигнала. Отсчеты сигнала обрабатываются (последовательно или параллельно) программами цифровых фильтров, настроенных на разные частоты в пределах полосы анализа. Выходные последовательности подают на программные цифровые детекторы огибающей с ФНЧ на выходе (программный интегратор). Цифровой детектор измеряет истинное среднеквадратическое значение RMS сигнала без ограничений, связанных с его амплитудным значением. Цифровой фильтр имеет стабильную частотную характеристику, не нуждается в подстройке. При перестройке цифрового фильтра достаточно его перепрограммировать. Выходные значения соответствуют уровню сигнала на

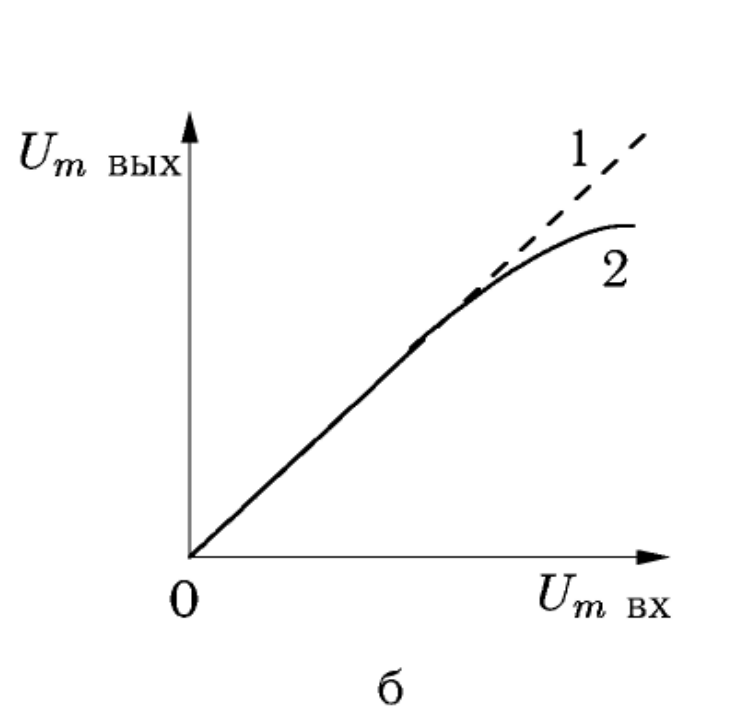




Структурные схемы нерекурсивного и рекурсивного цифровых фильтров

Измерение нелинейных искажений





Амплитудные характеристики:

1 — линейное устройство; *2* — квазилинейное устройство.

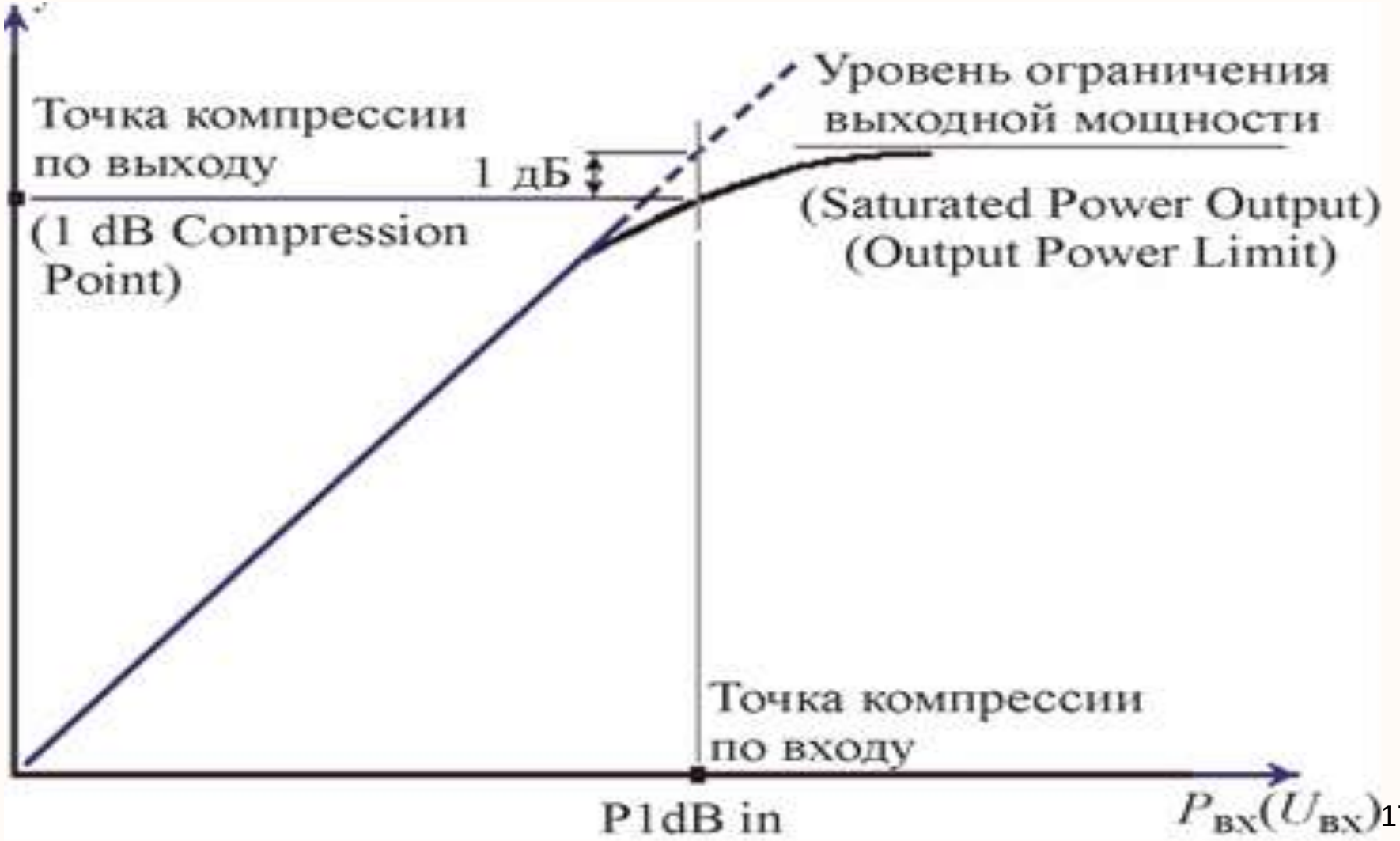
Зависимости между:

а — мгновенными значениями сигналов на входе и выходе;

б — амплитудами гармонических напряжений

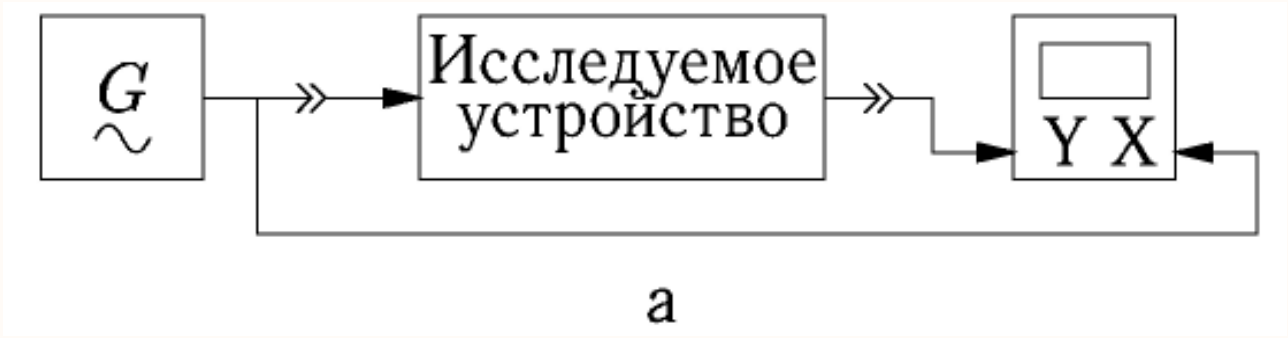
Амплитудная характеристика (АХ) – это зависимость амплитуды выходного гармонического сигнала от амплитуды входного сигнала (как правило, на частоте, соответствующей середине частотного диапазона квазилинейного устройства).

Пример: амплитудная характеристика транзисторного ВЧ-усилителя. Масштаб по осям графика - логарифмический (дБм)

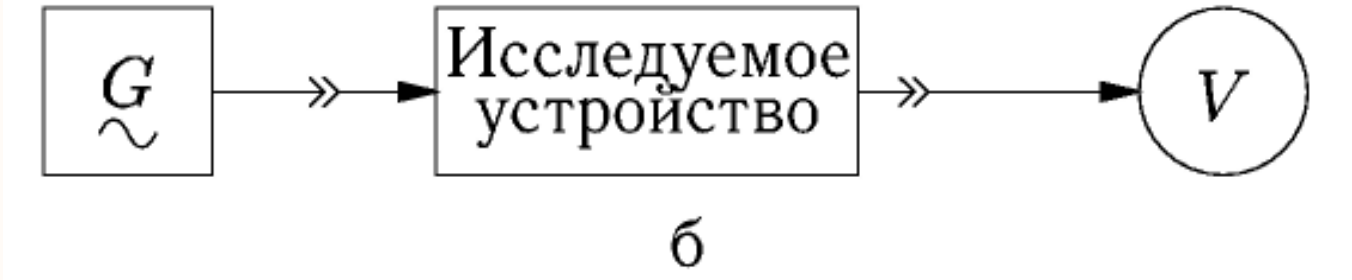


Характеристика **нелинейности** через амплитудную характеристику

В области ограничения (компрессии сигнала) АХ имеет загиб. Точка P1dB, где отклонение амплитудной характеристики устройства от линейной зависимости составляет 1 дБ, называется *точкой компрессии* (однодецибельной точкой компрессии, 1 dB compression point, P1dB). Численно точку компрессии задают соответствующим уровнем входного сигнала (input compression point P1dB in). Чем больше значение сигнала в точке компрессии, тем выше линейность устройства.



а



б

Структурные схемы установок для измерения амплитудных характеристик:

а – с помощью осциллографа;

б – с помощью амплитудного вольтметра.

Степень нелинейности, чаще *гармоническими* нелинейными искажениями. При подаче на вход нелинейного устройства гармонического напряжения спектр выходного напряжения наряду с колебанием основной частоты содержит высшие паразитные гармоники.

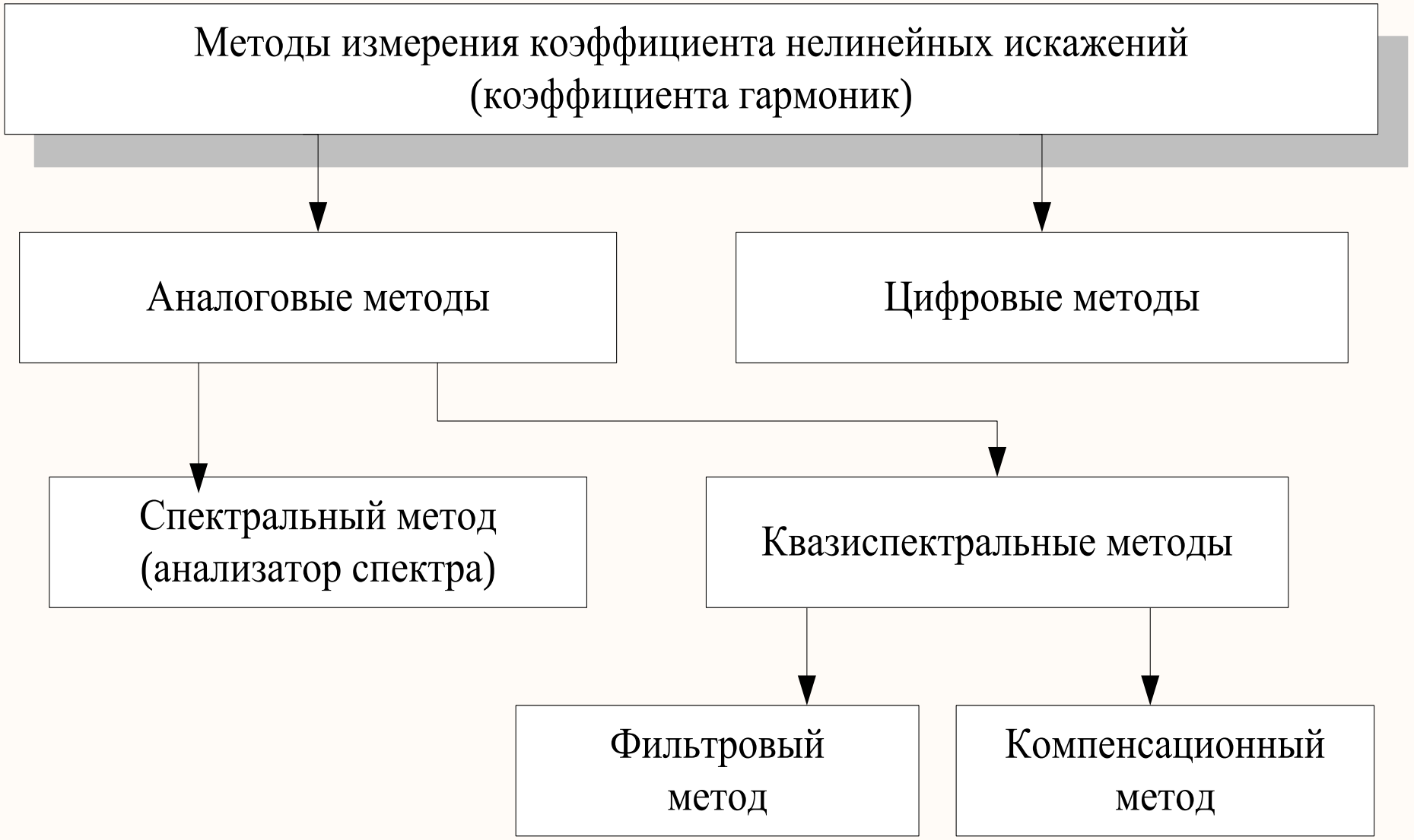
Численно нелинейные искажения ВЧ- и СВЧ устройств обычно характеризуются *коэффициентом гармоник* $K_г$ (англ. THD – Total Harmonic Distorsion):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + ... + U_n^2}}{U_1}$$

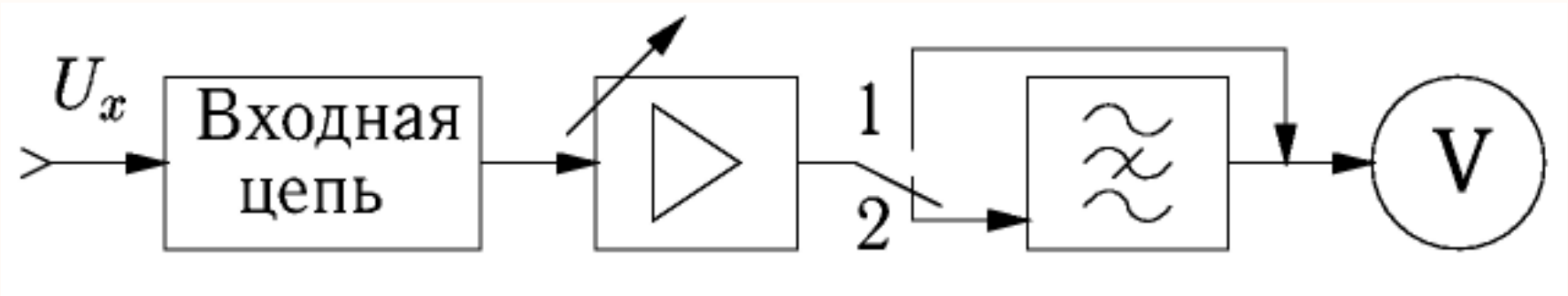
где U1, U2, U3, ..., Un – среднеквадратические значения гармоник на выходе исследуемого устройства.

На низких частотах проще измерить *коэффициент нелинейных искажений (КНИ):*

$$КНИ = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + ... + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + ... + U_n^2}} = \frac{K_{\Gamma}}{\sqrt{1 - (K_{\Gamma})^2}}$$



Классификация методов измерения нелинейных искажений



Структурная схема измерителя нелинейных искажений:
1 – калибровка; 2 – измерение

Цифровой (вычислительный) метод измерения КНИ

$$K_{\Gamma} = \sqrt{(U^2 - U_0^2 - U_1^2)} / U_1 \qquad U = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} U_i^2}$$

$$U_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} U_i \qquad U_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left[\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1} U_i \cos(\frac{2\pi i}{N})\right]^2 + \left[\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1} U_i \sin(\frac{2\pi i}{N})\right]^2}$$

Измеритель нелинейных искажений АКИП-4501



Измеритель нелинейных искажений АКИП-4501

Частотный диапазон измерений КНИ	от 20 Гц до 20 кГц
Диапазон измерений коэффициента нелинейных искажений в пределах от 20 Гц до 20 кГц	от 0,01% до 50%
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений коэффициента нелинейных искажений	±(0,1·Кни + 0,03),% где Кни - измеренное значение коэффициента нелинейных искажений, %
Диапазон измерений частоты входного сигнала	от 10 Гц до 200 кГц
Разрешение при измерении частоты входного сигнала	4 десятичных разряда
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений частоты входного сигнала, Гц	±2·k, где k - значение единицы младшего разряда, Гц
Минимальный уровень сигнала при измерении коэффициента нелинейных искажений и частоты	100 мВ
Диапазон измерений напряжения входного сигнала	от 3 мВ$_3$ до 300 В
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений напряжения входного сигнала, В	±0,04·Uизм, где Uизм - измеренное значение напряжения входного сигнала, В
Входное сопротивление прибора	100 кОм

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

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

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

http://kepstr.eltech.ru/tor/ptri

Кафедра Теоретических основ радиотехники

А.А. Данилин

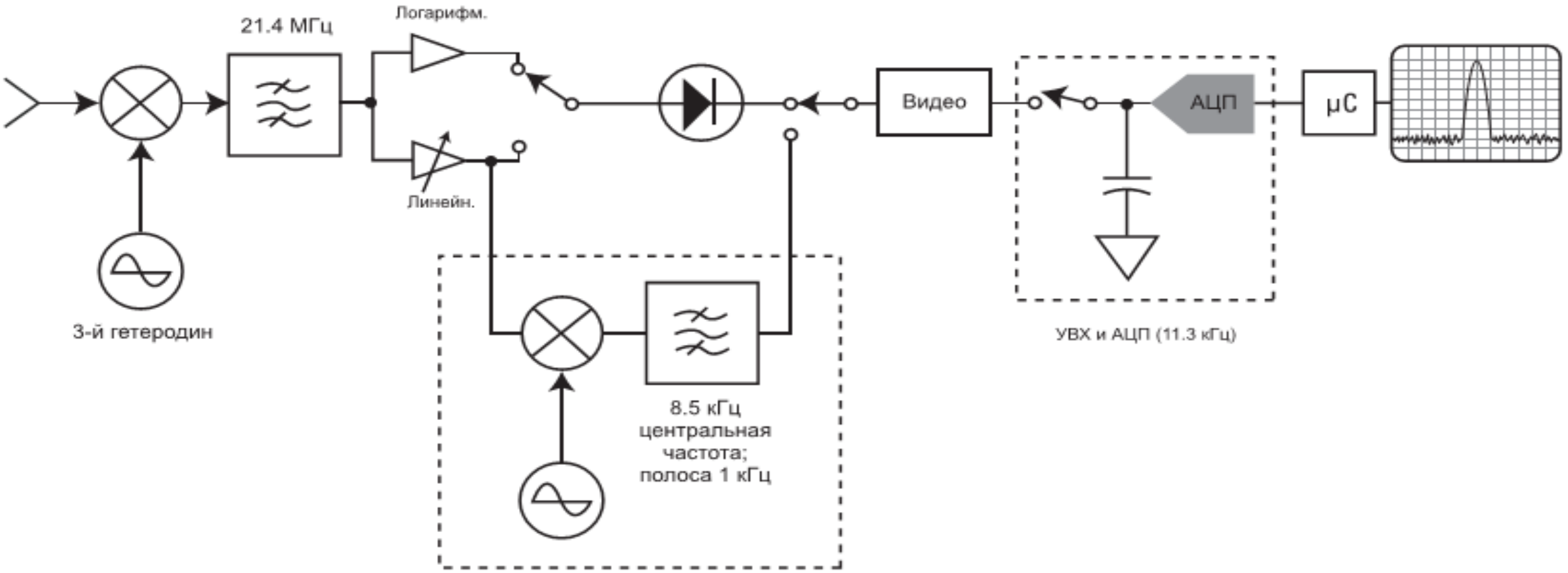
«Приборы и техника радиоизмерений»

(электронный конспект лекций)

Цифровые анализаторы спектра

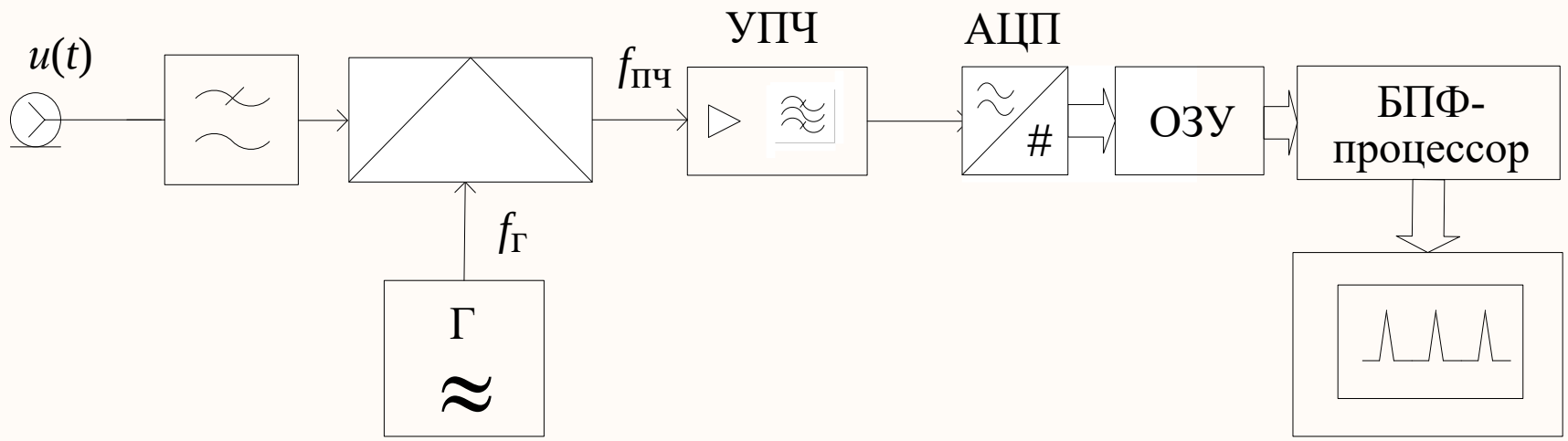
Санкт-Петербург
2025 г.

Комбинированный «гибридный» АС с аналоговой и цифровой фильтрацией



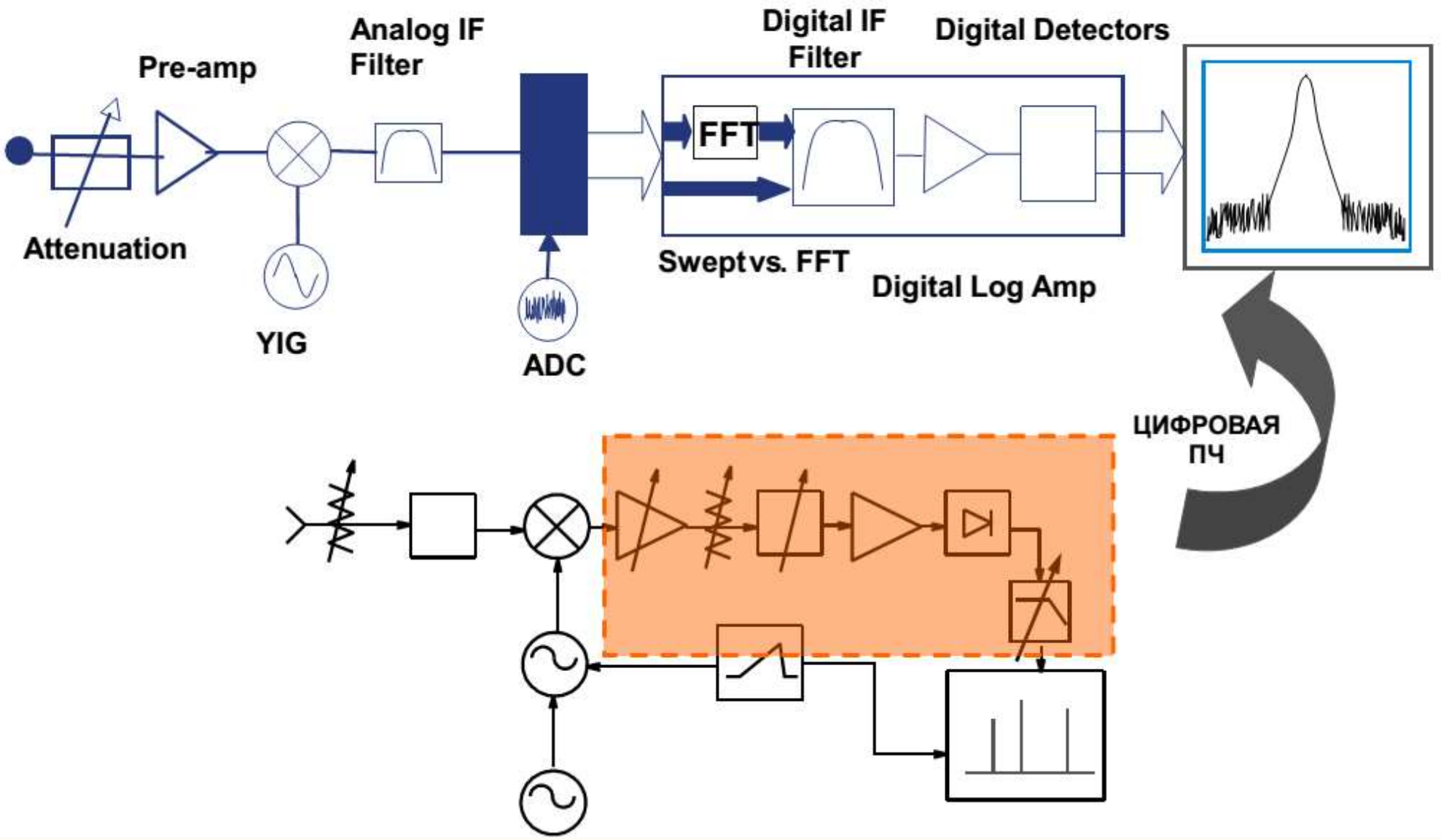
АЦП и дисплей – это цифровой осциллограф для показа видеосигнала с выхода детектора с RBW от 1 кГц (аналоговые фильтры и детектор). Полосы RBW от 1 Гц до 300 Гц реализуют оцифровкой сигнала ПЧ, сдвинутого вниз и дальнейшей его БПФ-обработкой после АЦП. Используют ступенчатый закон изменения частоты основного гетеродина (шаг - 900Гц)

БПФ-анализатор спектра с «цифровой ПЧ»

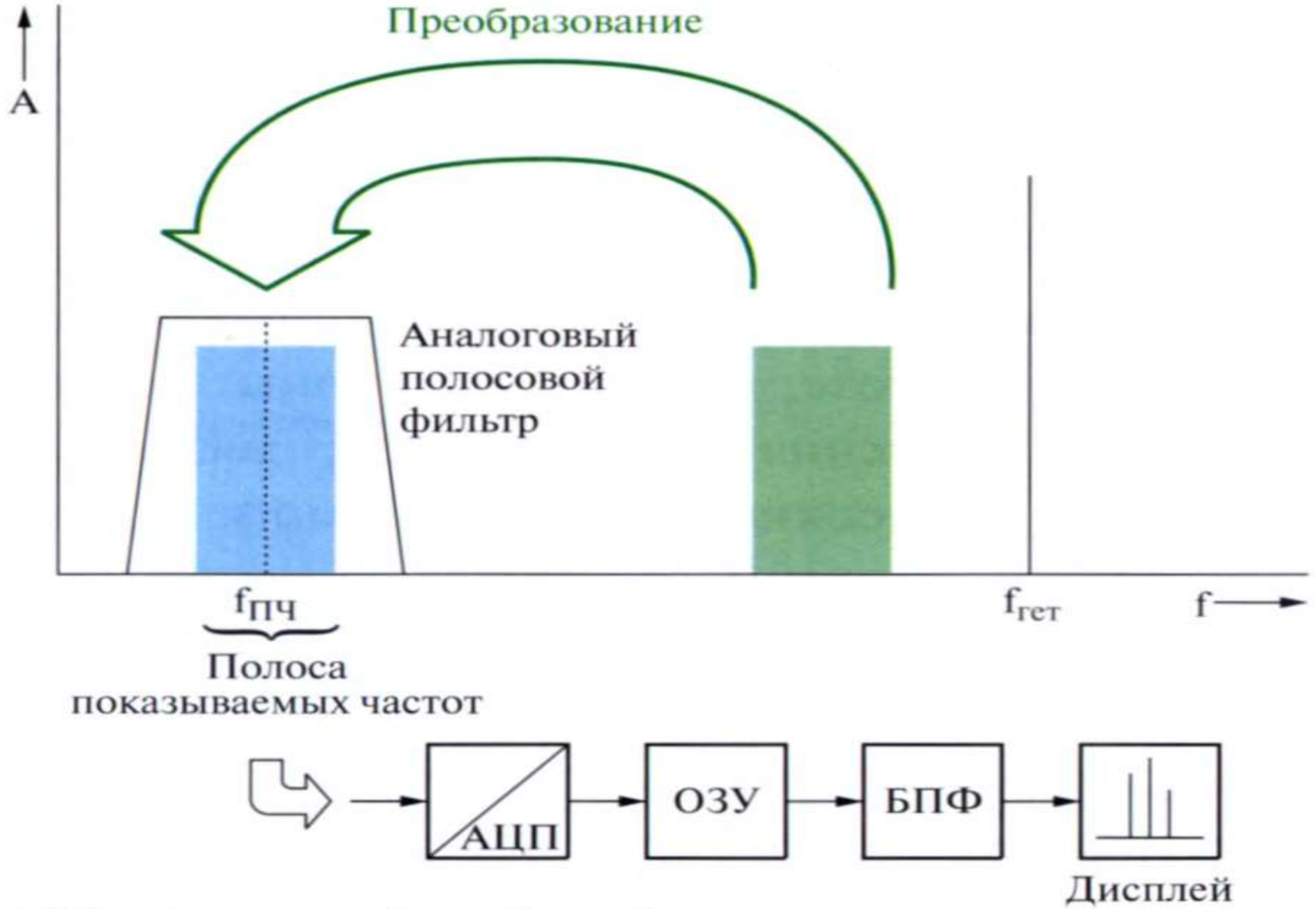


Спектр входного сигнала ограничивается ФНЧ для подавления *зеркального* канала. Часть полосы обзора входного сигнала смещают в область рабочего диапазона частот АЦП. Далее сигнал усиливается и фильтруется в УПЧ с *широкой* полосой пропускания (полоса захвата сигнала). После АЦП спектр вычисляется в блоке БПФ. Гетеродин перестраивается по ступенчатому закону. БПФ-анализаторы дают как *амплитудный, так и фазовый* спектры. Такие приборы иногда называют ***«анализаторами сигналов».***

Структурная схема современного анализатора



Концепция «цифровой ПЧ» - замена аналоговых блоков (фильтрация, детектор и пр.) программными алгоритмами. Требует быстродействующего широкополосного АЦП , работающего на относительно высокой ПЧ,



АЦП – Аналого-цифровой преобразователь,
ОЗУ – Оперативное запоминающее устройство,
БПФ – Быстрое преобразование Фурье

Преобразование с фиксированным гетеродином. полосы частот сигнала в рабочую полосу АЦП Цифровая ПЧ и цифровая фильтрация с помощью БПФ. Затем процесс повторяется для другой полосы частот.

Принципы построения спектрограммы - выбор типа «детектора трассы» в цифровых АС

Блок цифровых данных = число отсчетов огибающей, приходящихся на **одну** точку спектрограммы (на один пиксел дисплея).
Методы обработки блока называют **«детекторами» трассы** (детектор спектрограммы)

- Детектор ***выборки*** (Samples) – блока берется один отсчет (первый, в центре или последний)
- ***Максимально-пиковый*** детектор (Max Peak) – берется максимальный отсчет. Не будет пропущен ни один сигнал над уровнем шума
- ***Минимально-пиковый*** детектор (Min Peak) – выбирается минимальный отсчет
- ***Среднее значение (Average)*** – выборка усредняется – сглаживание шумаыбирается минимальный отсчет



- ***Нормальный*** , ***автопиковый*** (Auto Peak) – или ***«розенфелл»*** - нарастание (rose) и спад (fell)

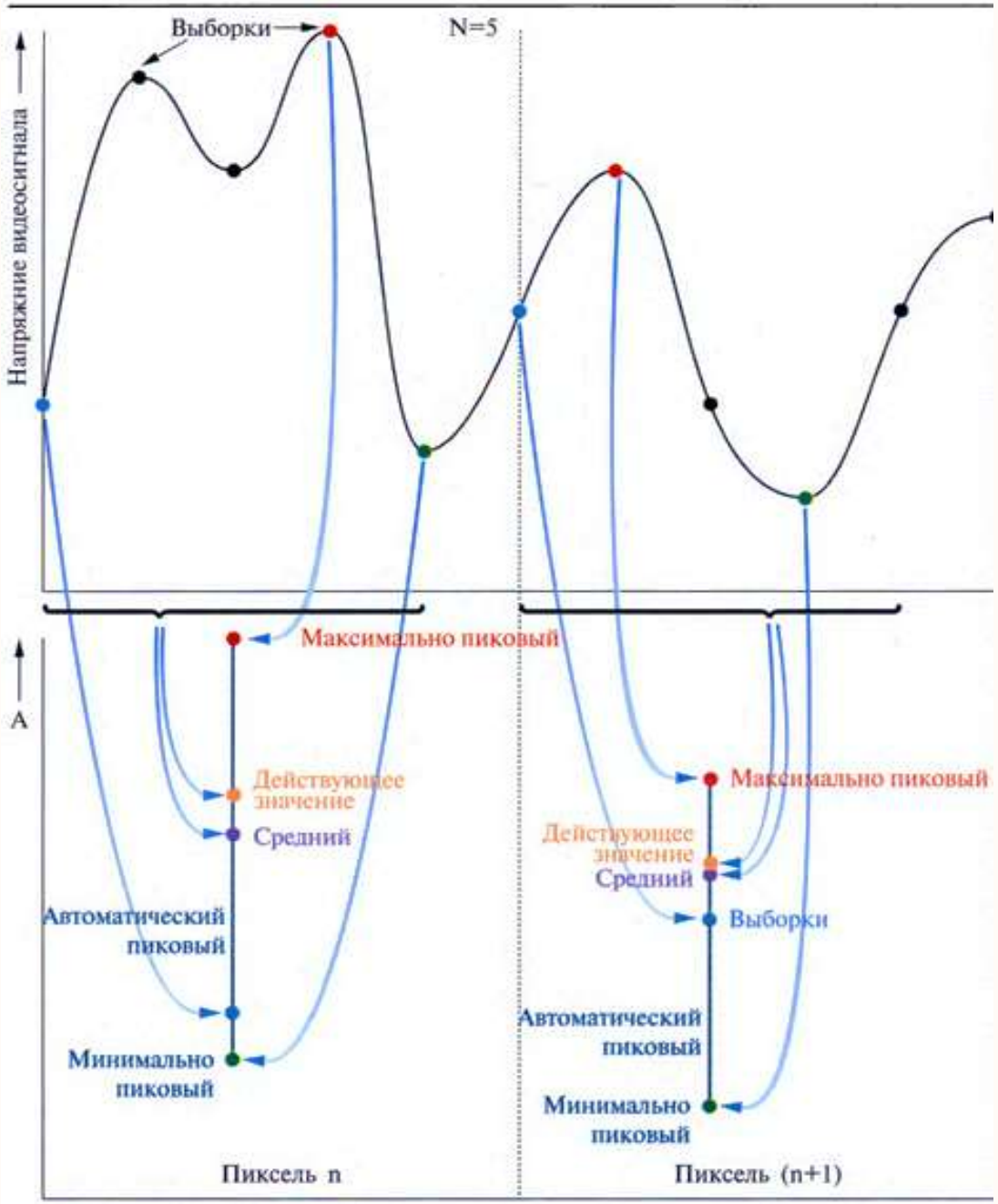
  Наиболее пригоден для наблюдения сигнала с шумом.

  Если сигнал растет и спадает в рамках блока:

  Четные блоки отображают минимум (отрицательный пик). Максимум запоминается.

  Нечетные блоки отображают максимум (положительный пик), определяемый сравнением пика текущего блока с пиком предыдущего (запомненным).

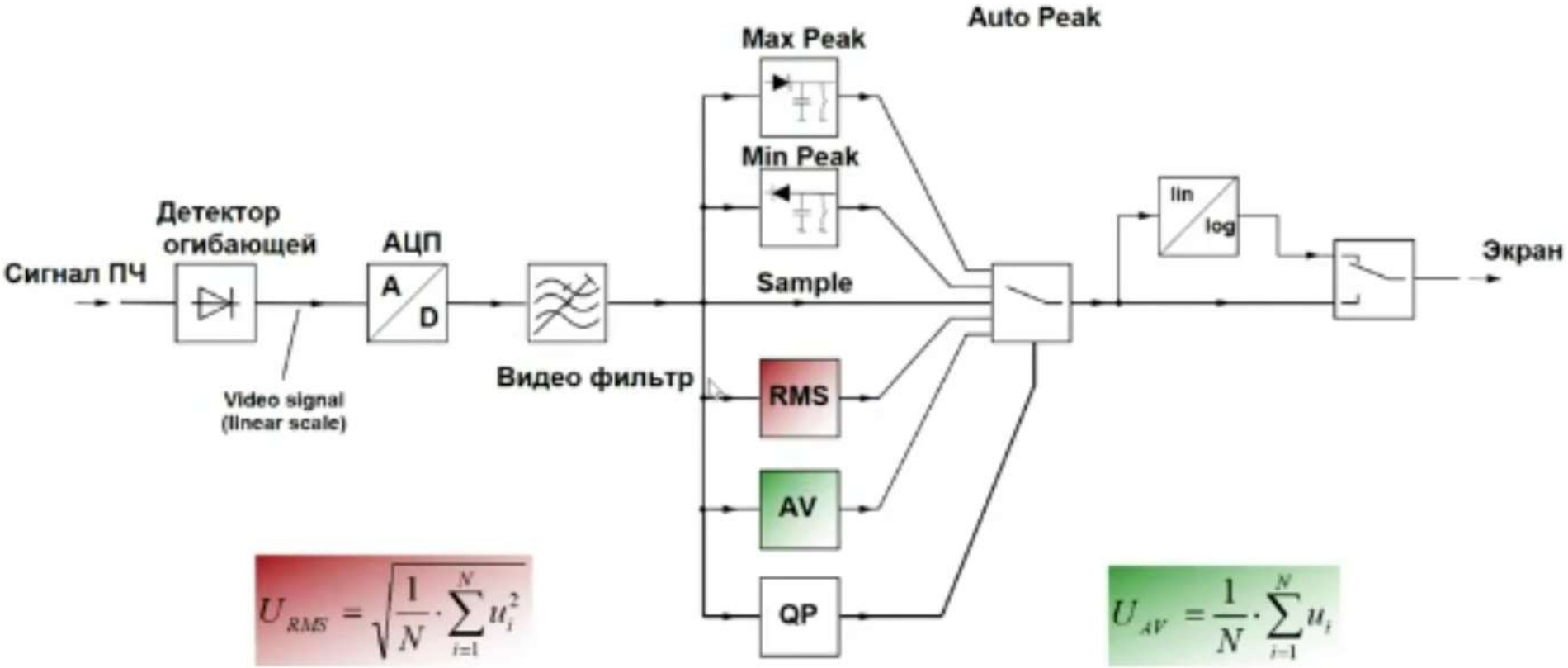
  Если сигнал *только растет или только спадает* в рамках блока, отображается пик.
- Детектор ***среднего*** (AV-детектор) – позволяет усреднять уровень отсчетов в пределах блока (сглаживание шума)
- ***Среднеквадратический детектор RMS*** – позволяет измерять среднюю мощность в полосе частот, соответствующей блоку отсчетов (одному пикселю спетрограммы).



Реализация детекторов трассы

параллельная реализация детекторов трассы в современных приборах

- Реализация детектора трасс в современном анализаторе спектра - принципиальная блок-схема



Сравнение нормального режима детектирования (автопиковый детектор) и режима выборки (один отсчет) при измерении шума

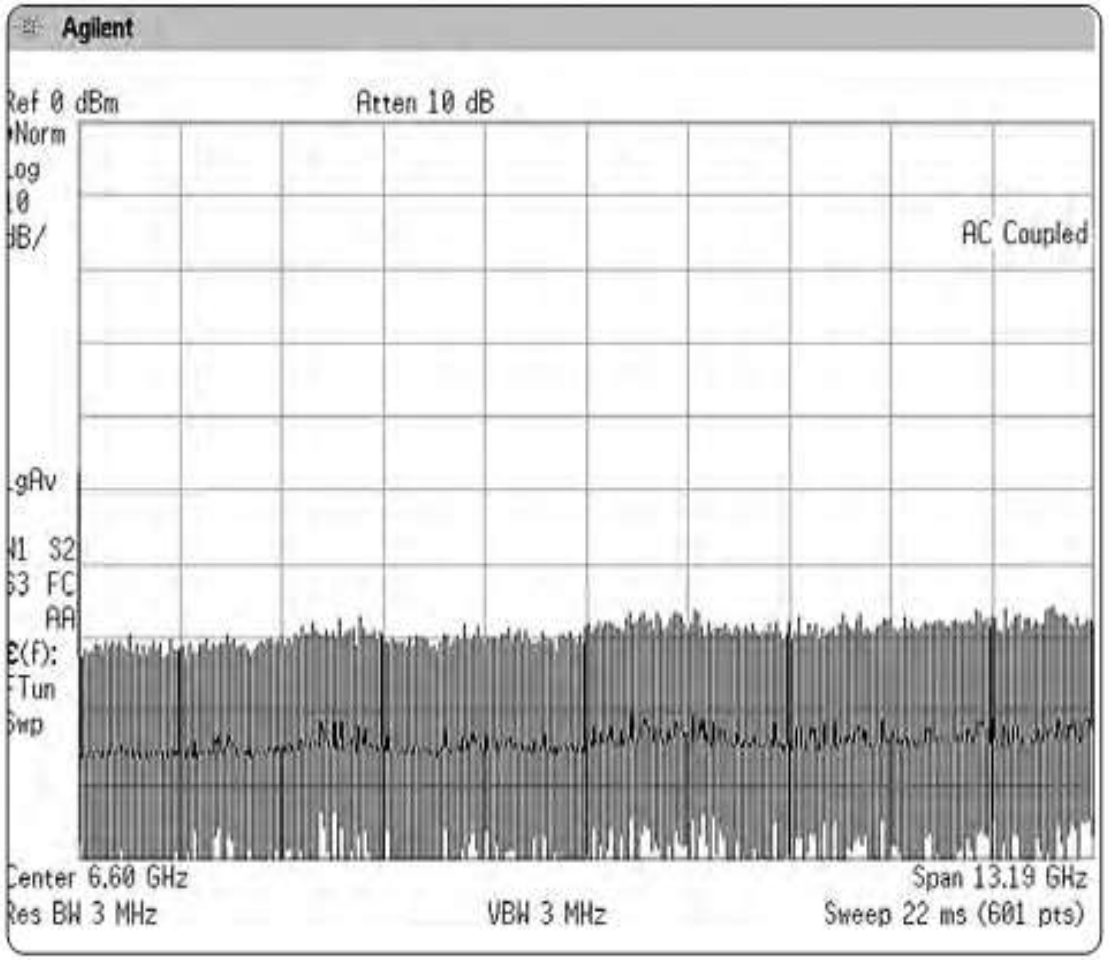


Рисунок 2-23а. Нормальный режим

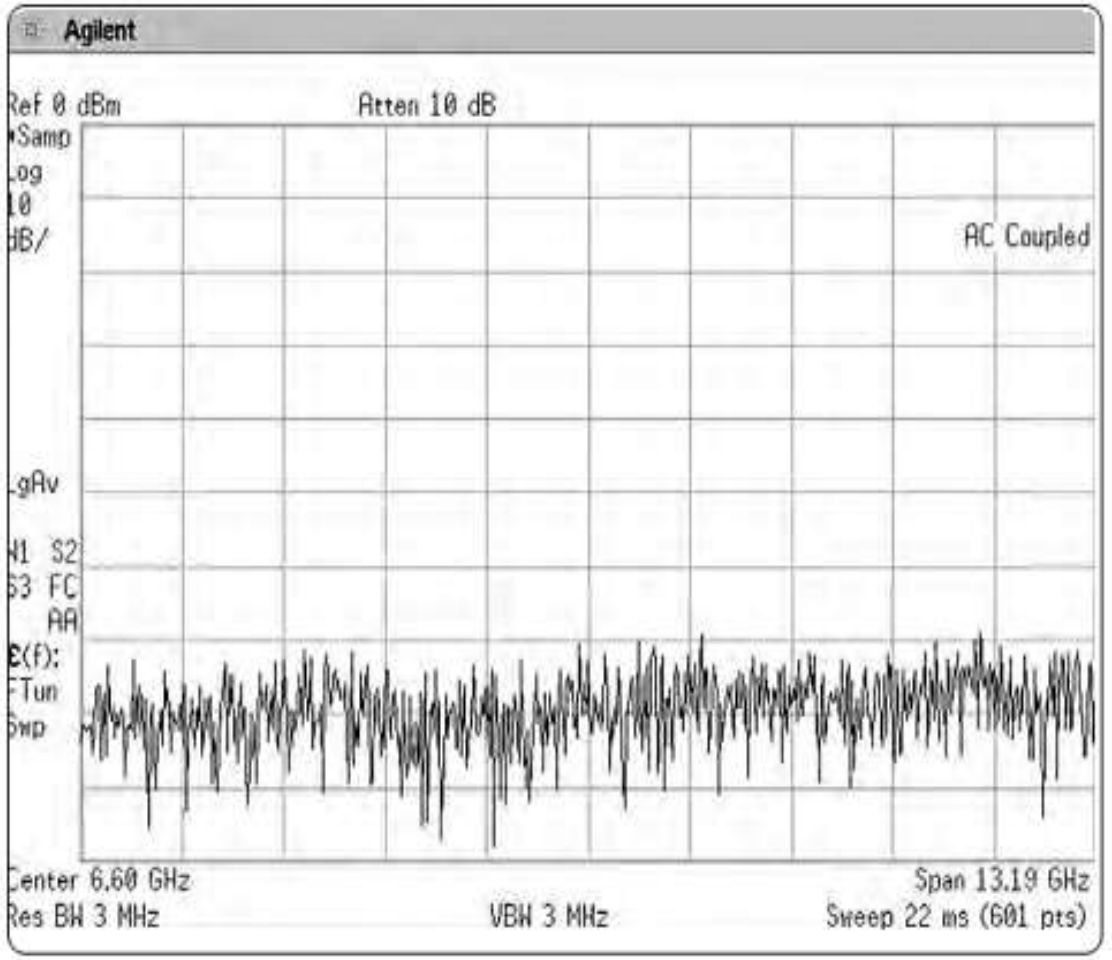


Рисунок 2-23б. Режим выборки

Дискретное преобразование Фурье в цифровых АС

1. Выборку сигнала длительностью Tc=NΔt (Δt – шаг дискретизации во времени, N – количество отсчетов) рассматривают как периодический сигнал с периодом Tc, ***дополняя*** его копиями отсчетов, сдвинутых во времени на NΔt.

Последовательность пронумерованных от 0 до (N-1) отсчетов сигнала {*u*(*k*)} является ***периодической*** (с периодом *N*): *u*(*k* + *N*) = *u(k)* для любого k. Ее можно рассматривать как ***дискретный сигнал*** в виде последовательности дельта-функций, смещенных во времени

$$\hat{u}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} U(k\Delta t) \cdot \delta(t - k\Delta t)$$

Дискретное преобразование Фурье -2

2. Раскладывая периодический сигнал в ряд Фурье, получаем ***периодический*** по оси частот дискретный спектр (дискретное преобразование Фурье – ДПФ)

$$S(f_n) = \frac{1}{Tc}\int_0^{Tc} u(t)\cdot\exp(-i\frac{2\pi n}{Tc}t)dt = \frac{1}{N\Delta t}\sum_{k=0}^{N-1} U(k\Delta t)\cdot\exp(-i\frac{2\pi n\cdot k}{N})$$

Дискретный спектр сигнала соответствует N отсчетам спектральной функции на частотах

$$f_n = n/T_c = n/(N\Delta t).$$

Принято нормировать ДПФ, перенося множитель 1|N в формулу для обратного преобразования Фурье и задавая $\Delta t = 1$

$$S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U(k)\exp\left(-i\frac{2\pi nk}{N}\right)$$

Дискретное преобразование Фурье -3

Каждая n-ная составляющая спектра вычисляется суммированием всех k- тых временных отсчетов, умноженных на комплексную экспоненту. Количество *гармоник* в одном периоде спектра равно количеству *отсчетов* сигнала N.

3. Периодичность сигнала во времени соответствует дискретному спектру с расстоянием между гармониками, равным ***разрешению ДПФ***

$$\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_д}{N}$$

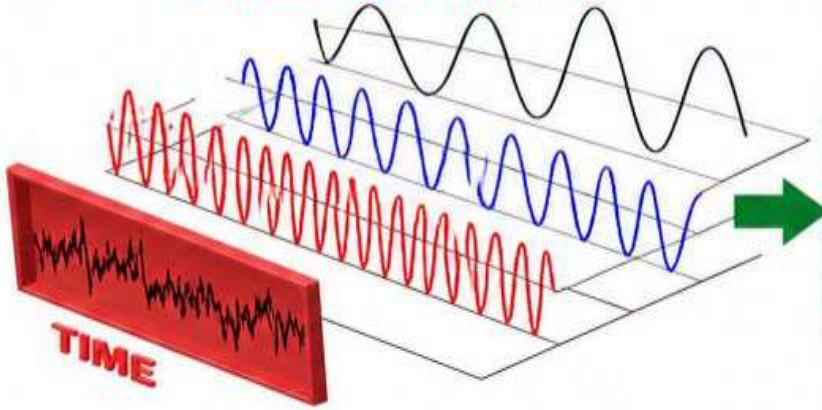
Спектр ДПФ периодичен по частоте с периодом, равным ***частоте дискретизации*** сигнала

$$\Rightarrow \quad f_д = \frac{1}{\Delta t}$$

WHAT IS FFT?

FFT (FAST FOURIER TRANSFORM) converts a time-domain signal into its frequency components.

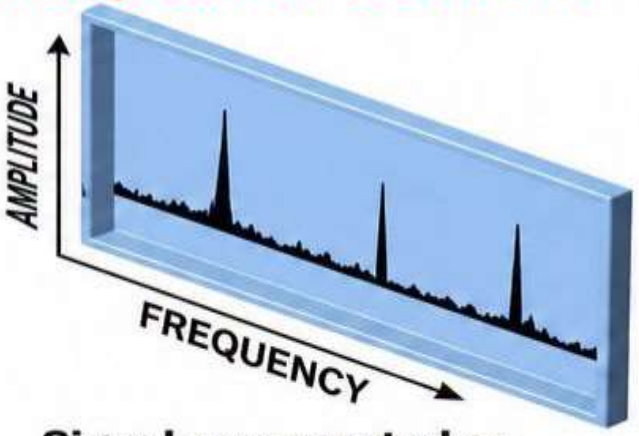
TIME DOMAIN



Complex Signal in Time Domain

FFT
FAST FOURIER TRANSFORM

FREQUENCY DOMAIN



Signal represented as Amplitude vs. Frequency

1. TIME DOMAIN

Signal is measured over time.



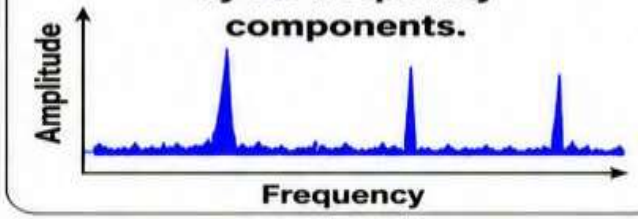
2. FFT PROCESS

FFT analyzes the signal and calculates its frequency components.



3. FREQUENCY DOMAIN

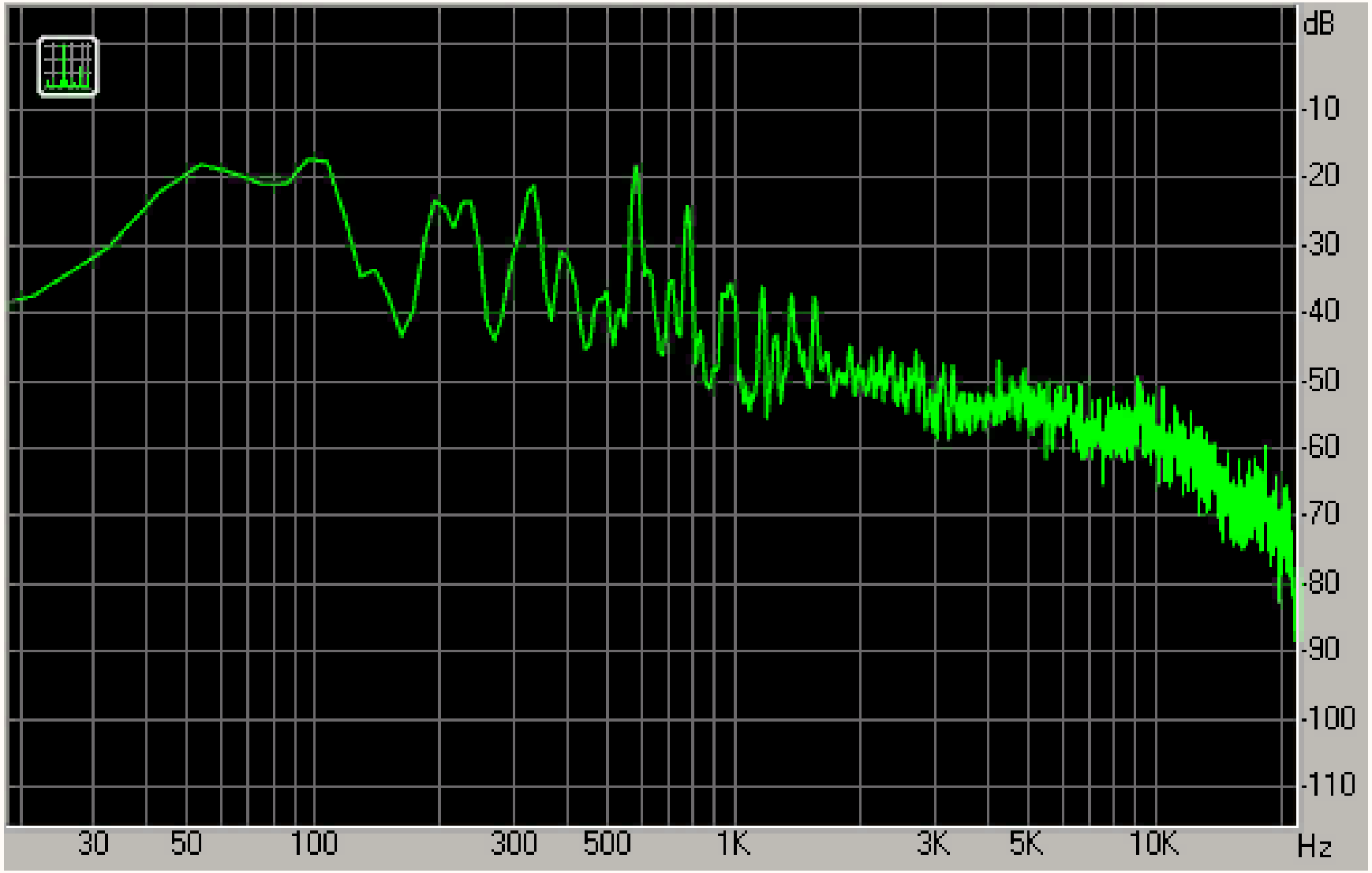
Signal is represented by its frequency components.



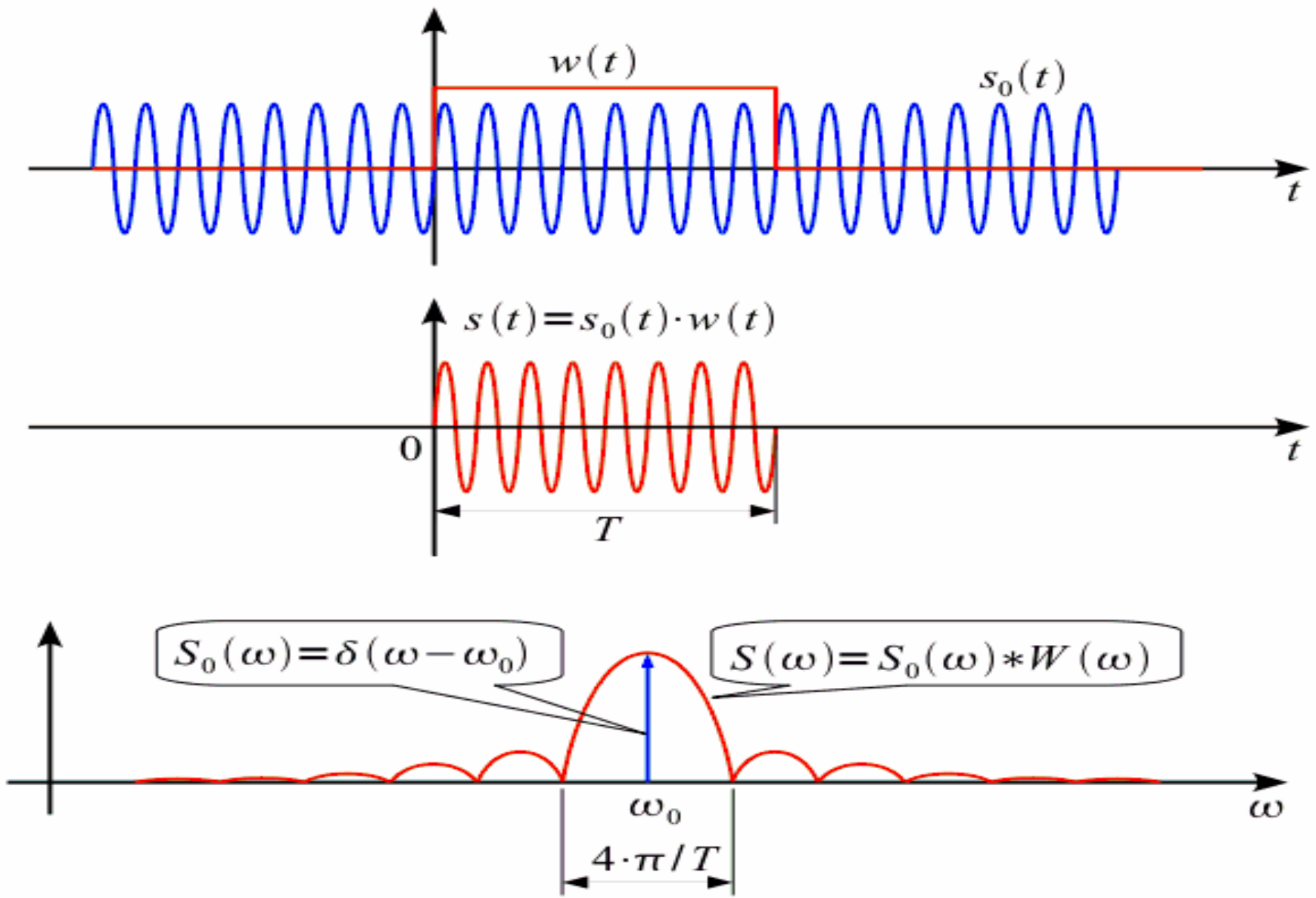
FFT IS USED FOR: SPECTRUM ANALYSIS | SIGNAL PROCESSING | NOISE DETECTION | SYSTEM MONITORING

Результат применения БПФ для сложного звукового сигнала

Вычисленный спектр отображается в виде графика зависимости амплитуды от частоты Используется **логарифмический** масштаб по осям частот и амплитуд. Но из-за **линейного** расположения полос FFT по частоте спектр может выглядеть недостаточно детальным на нижних частотах или излишне осциллирующим на верхних частотах.

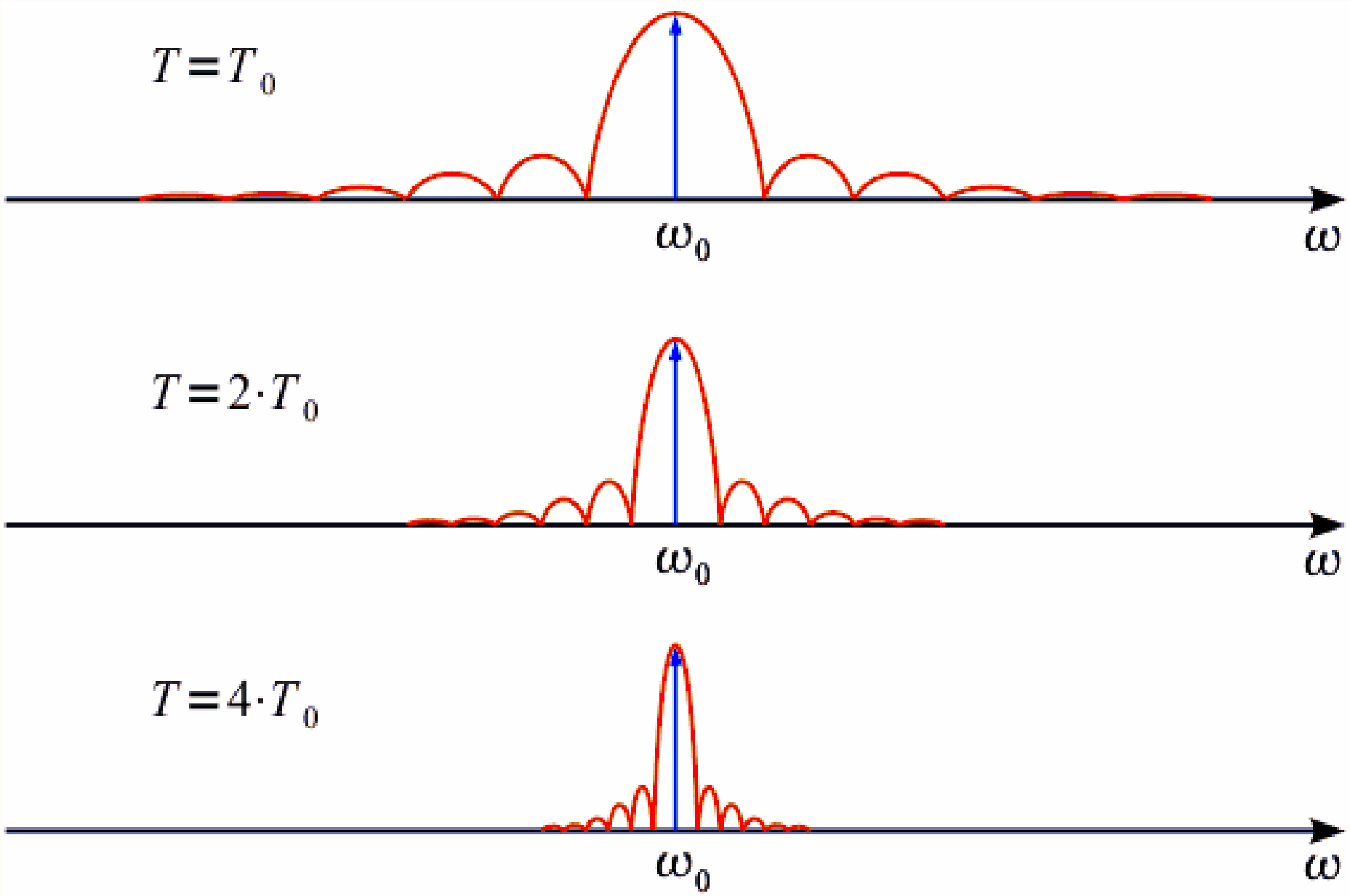


Спектральная функция выборки гармонического сигнала



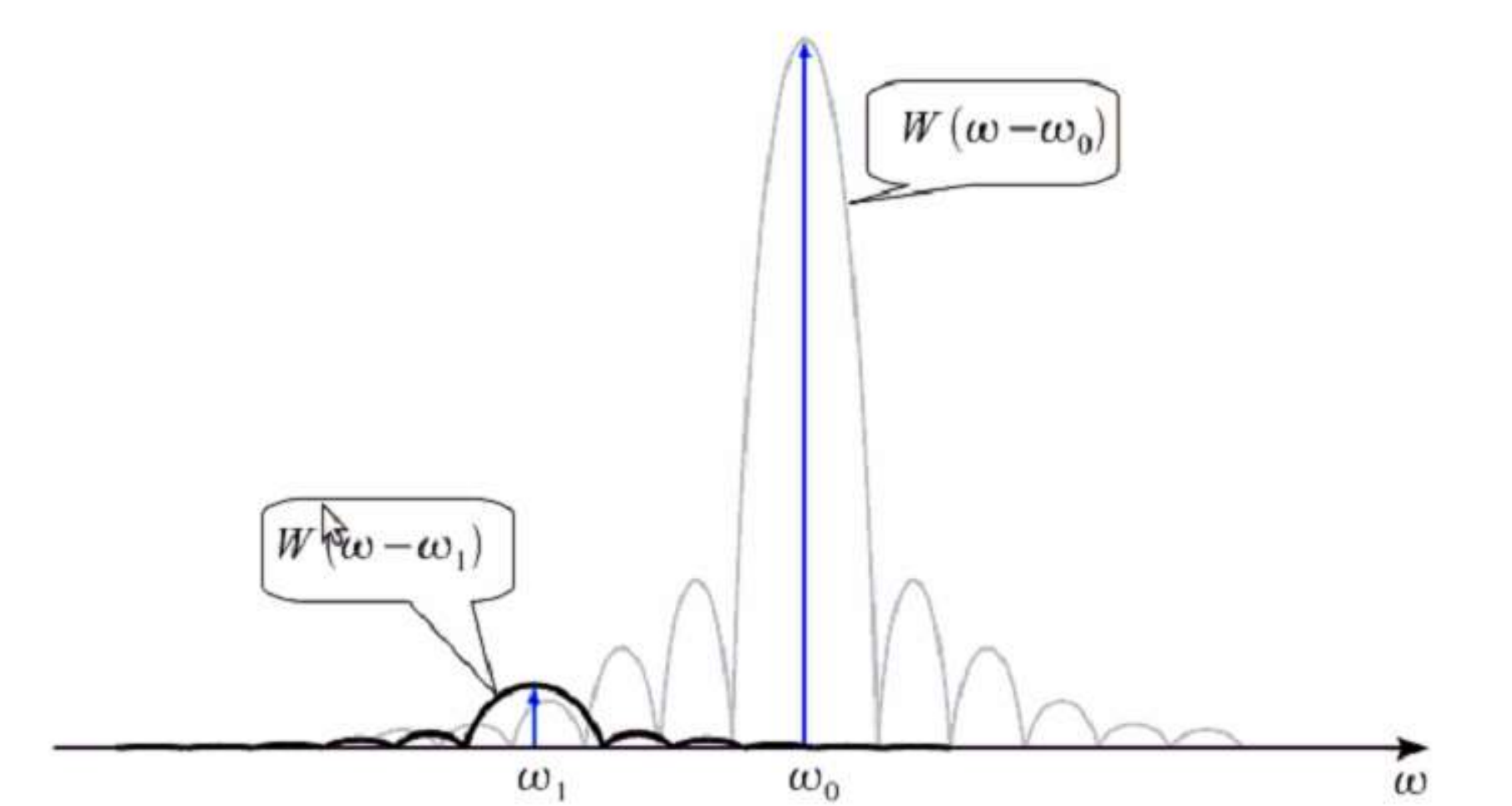
Спектр выборки есть **свертка** спектра синусоидального сигнала (дельта-функция) и спектра временного окна (функция sinc(w))

Зависимость спектра выборки гармонического сигнала от ее длины



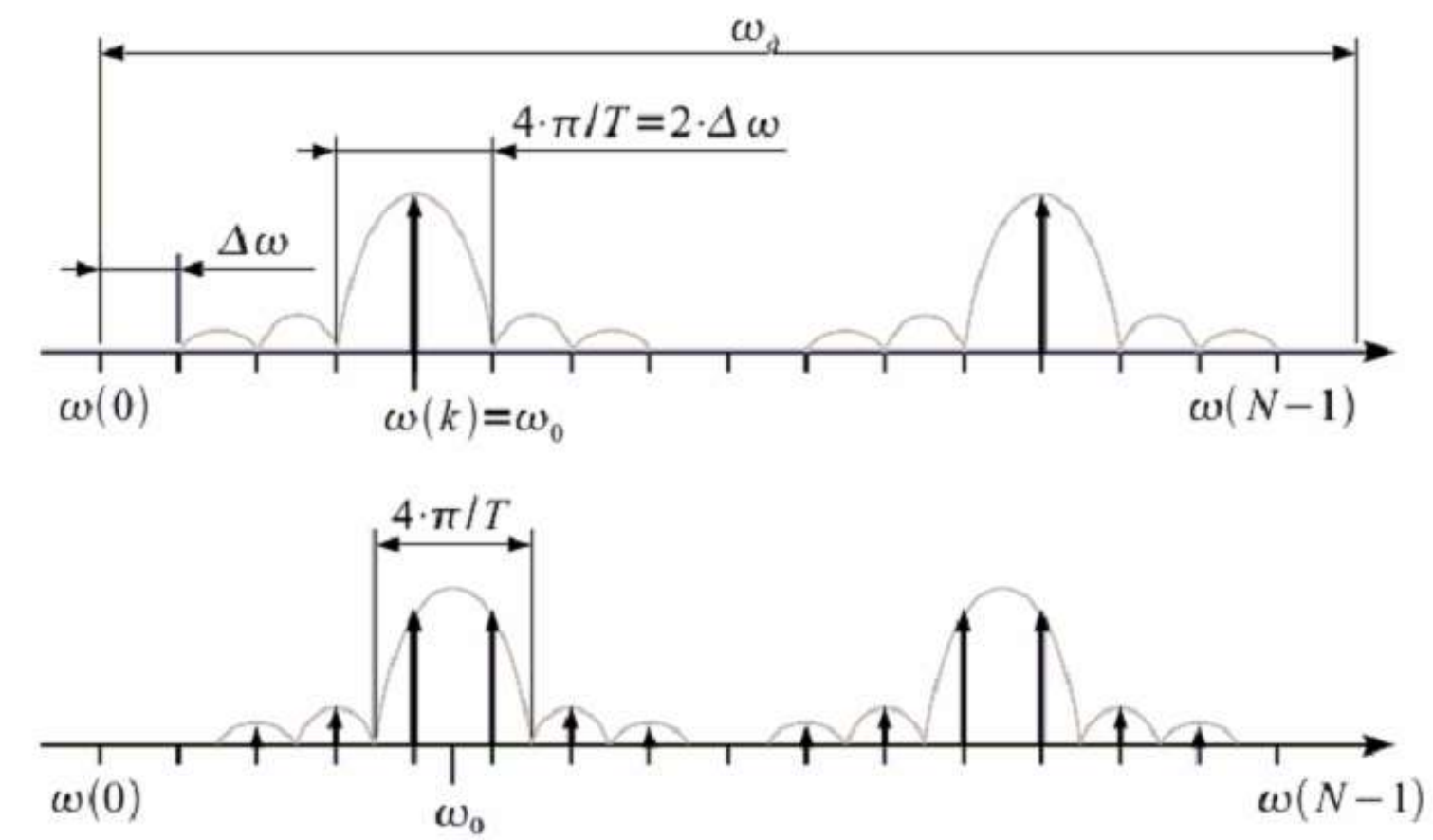
Чем длиннее выборка T, тем уже спектр сигнала => в пределе – дельта-функция на частоте сигнала. Случай кратности длины выборки периоду сигнала T0

Маскировка слабого сигнала спектральной функцией сильного сигнала



Спектр слабого сигнала маскируется большим уровнем боковых лепестков сильного сигнала. Надо менять оконную функцию!

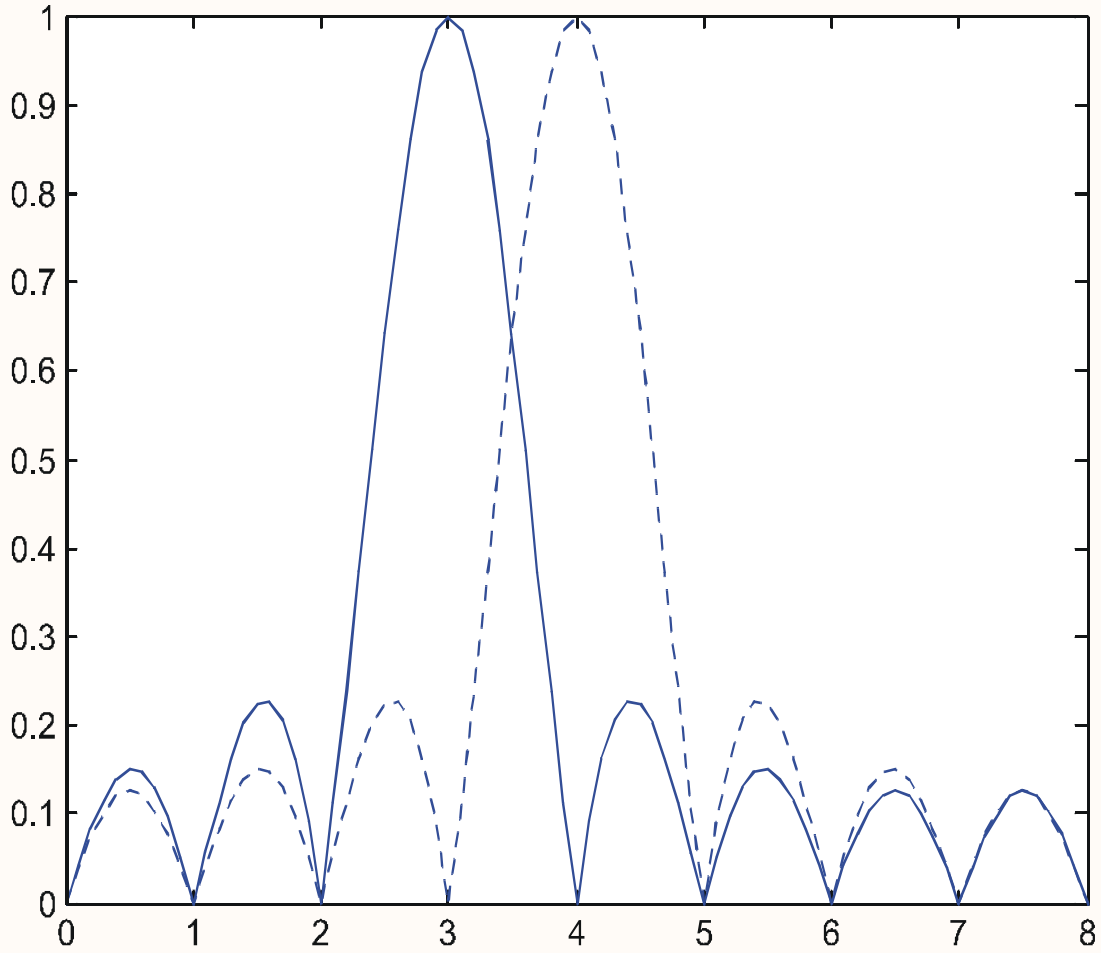
Растекание спектра гармонического сигнала при некратности длины выборки и периода сигнала



Дискретный спектр сигнала совпадает с частотой сигнала только при равенстве его частоты n-ной частоте дискретизации спектра

$$n\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_c} n = n\frac{\omega_д}{N}$$

ДПФ как параллельный АС



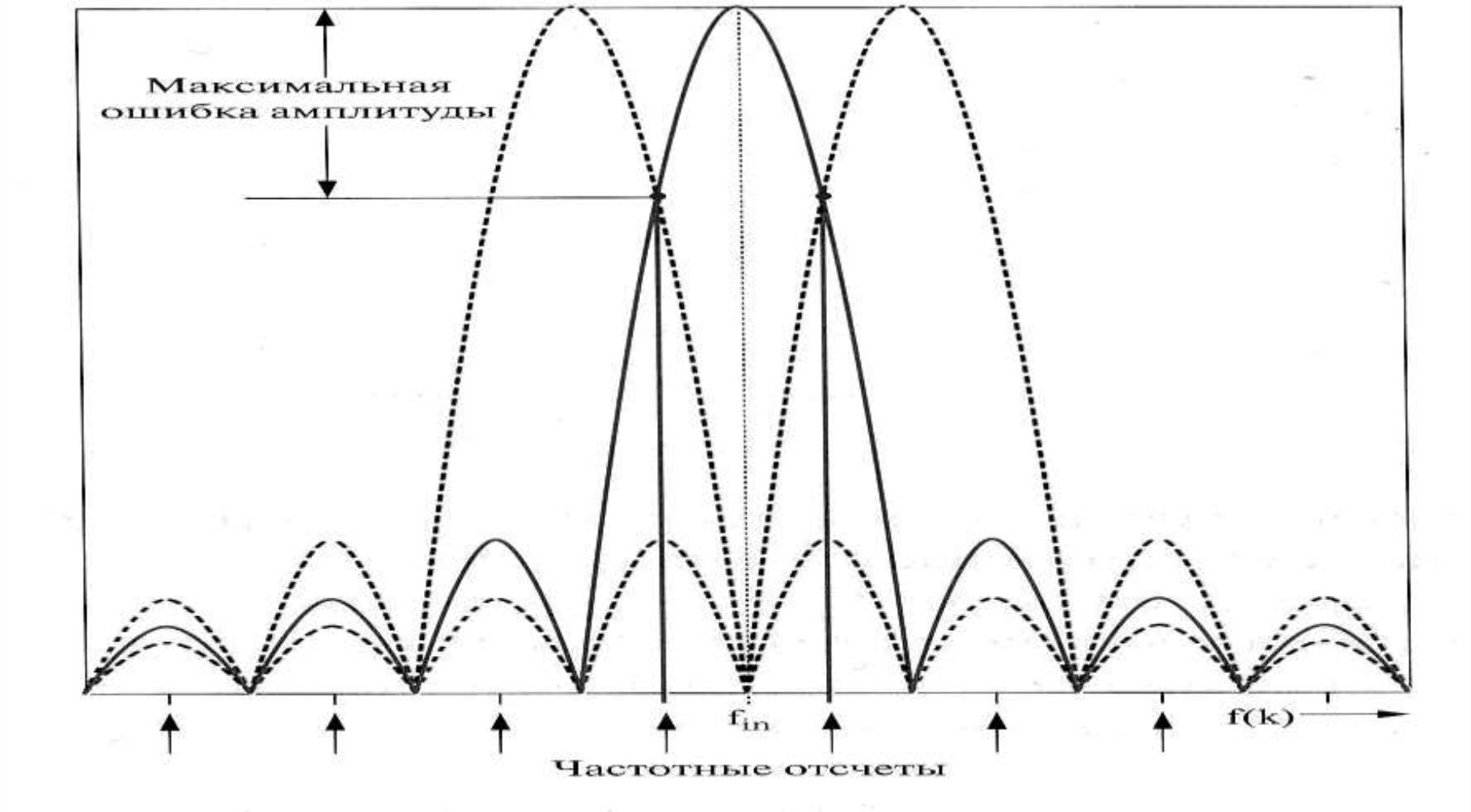
АЧХ каждого такого фильтра описывается функцией sinc(x)

ДПФ можно представить как обработку сигнала системой из N узкополосных фильтров, настроенных на частоты дискретизации спектра

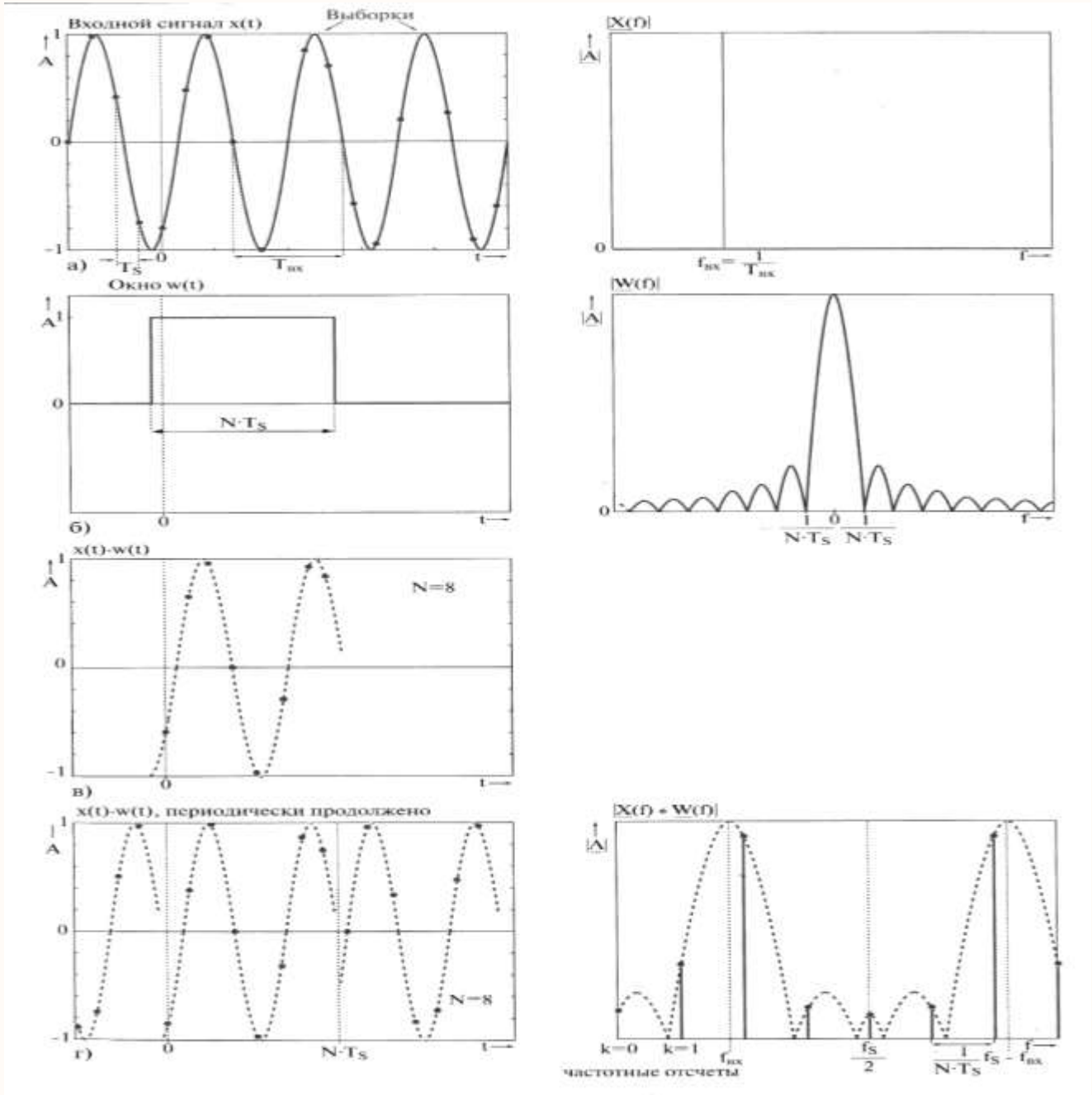
$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} = \frac{nf_\partial}{N},\ n = 0,1,2...(N-1)$$

$$K_n(f) = \frac{\sin(\pi \cdot N \cdot \frac{f - f_n}{f_д})}{\sin(\pi \frac{f - f_n}{f_д})}$$

Погрешность анализа спектра при смещении частот гармоник сигнала от центров частотных каналов



Частота сигнала не совпадает с частотами дискретизации спектра (центрами частотных каналов). Разрешающая способность ухудшается, появляется амплитудная ошибка

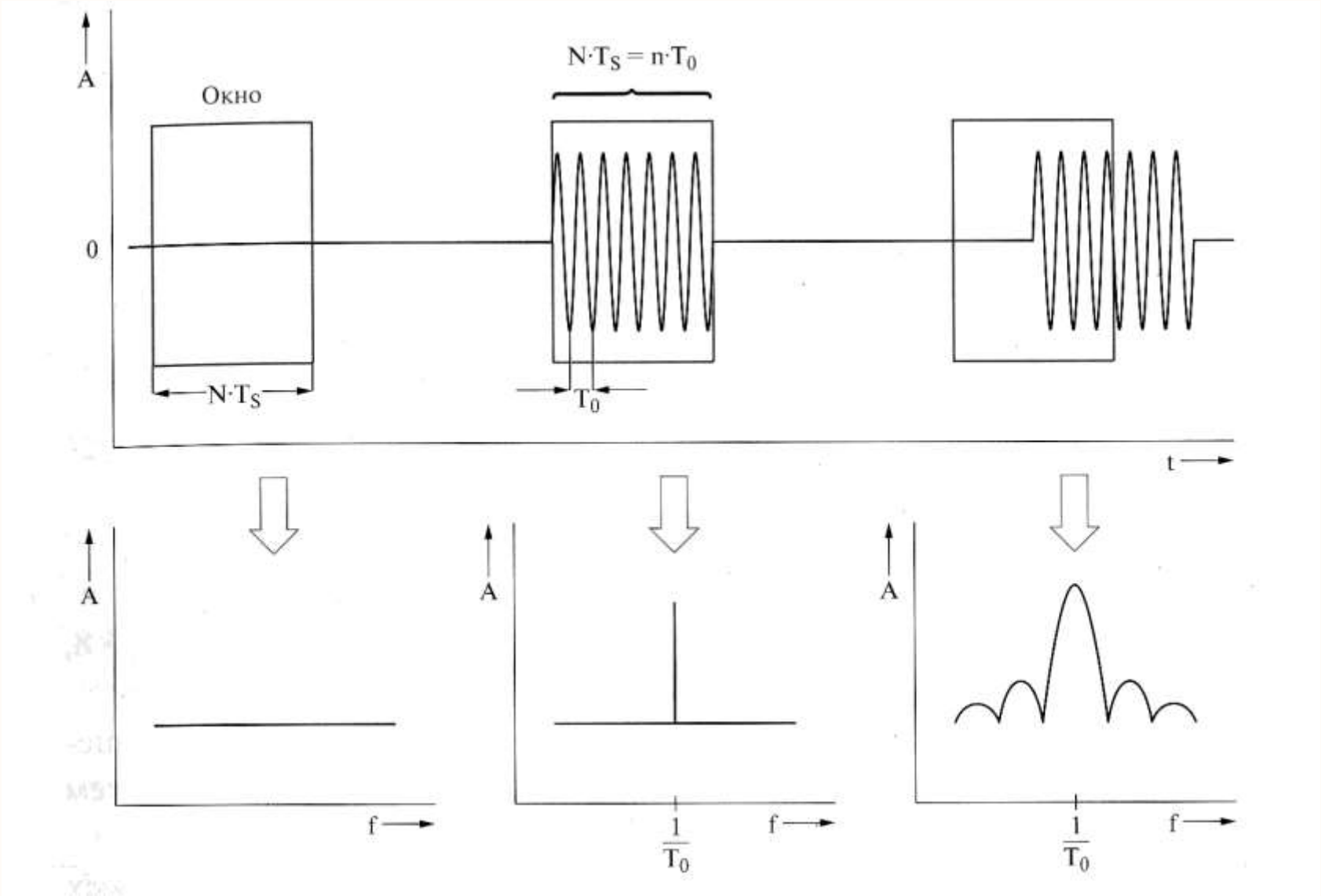


Пример ДПФ синусоидального сигнала с прямоугольным окном при некратности времени анализа периоду входного сигнала.

Искажения спектрограммы за счет скачка продолженного сигнала на границе окна. В спектрограмме появляются дополнительные компоненты, возникает *растекание спектра* (spectrum leakage).

Устраняется умножением исходного сигнала на оконную функцию, имеющую спад уровня к краям окна.

Особенности применения дискретного преобразования Фурье для коротких радиоимпульсов



Для непрерывной обработки сигнала прибор накапливает выборку из N отсчетов сигнала во временном окне NΔt (соответствует времени анализа АС). Расположение окна влияет на результат анализа.

Оконная (весовая) обработка входного сигнала

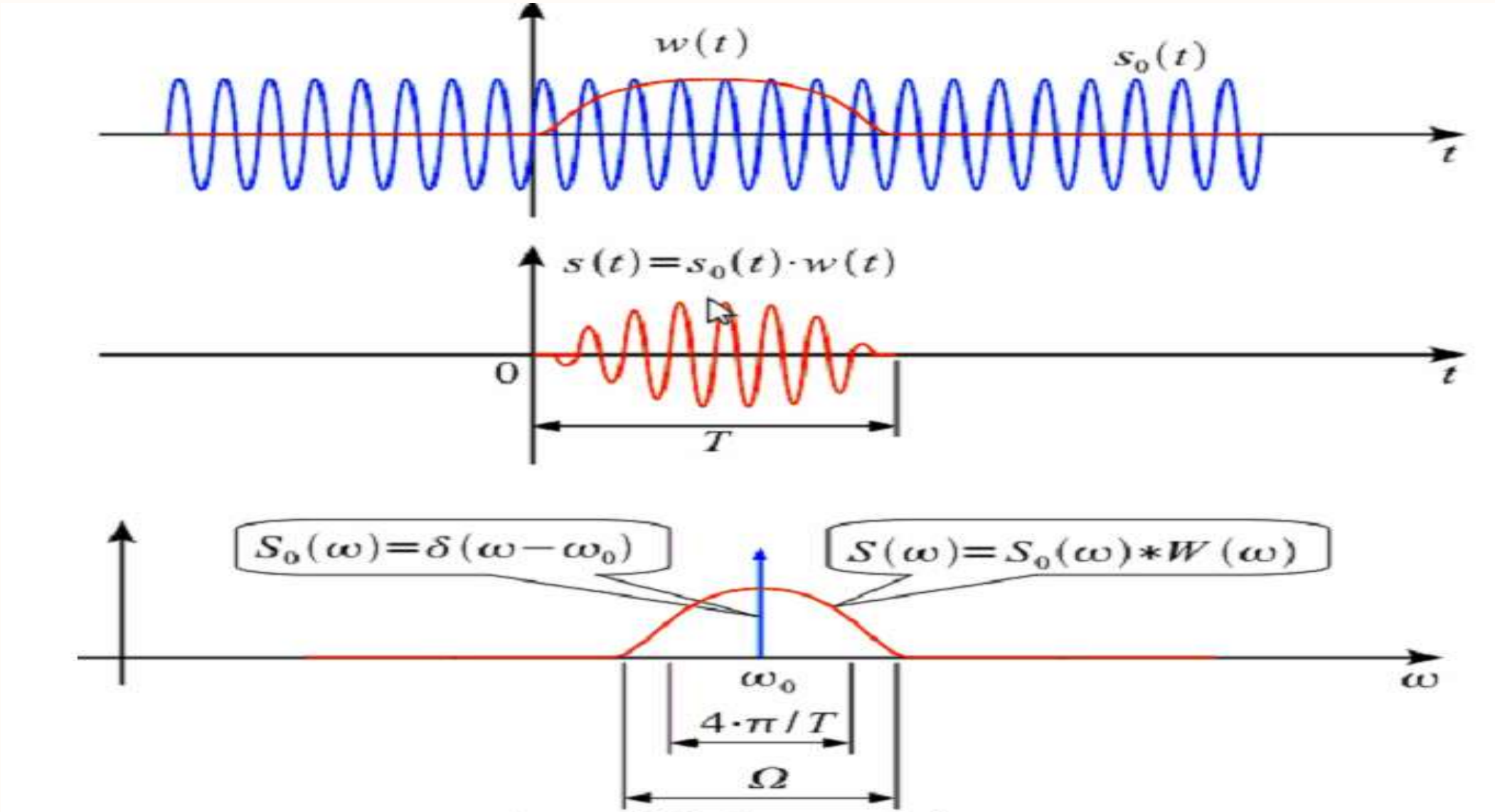
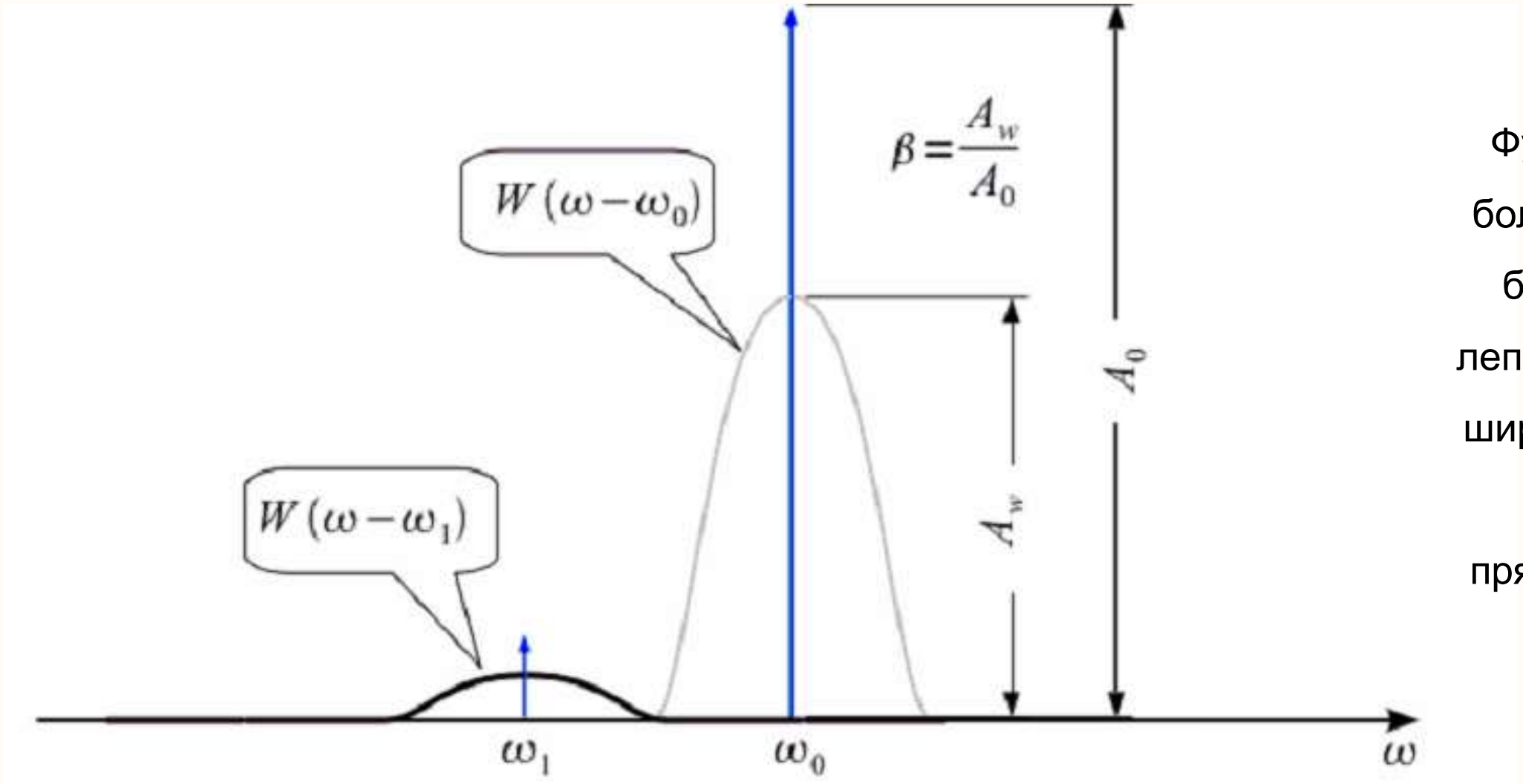


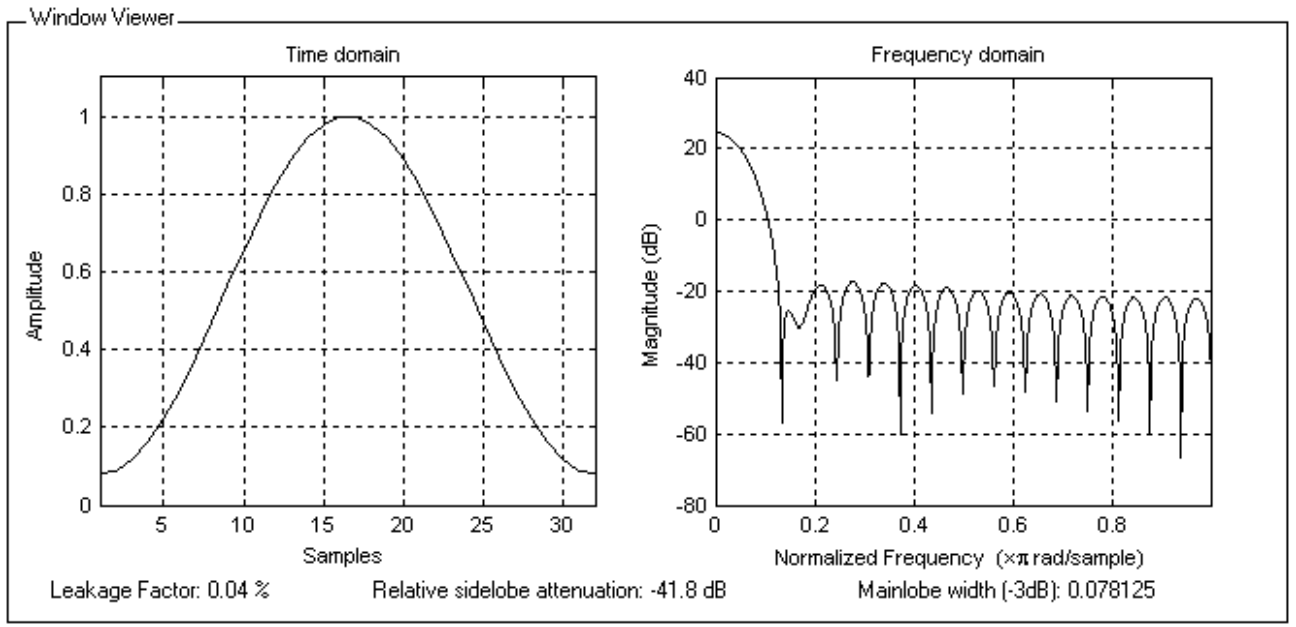
Рисунок 5: Гладкая весовая функция

Спектр слабого сигнала не подавлен боковыми лепестками спектральной функции сильного сигнала

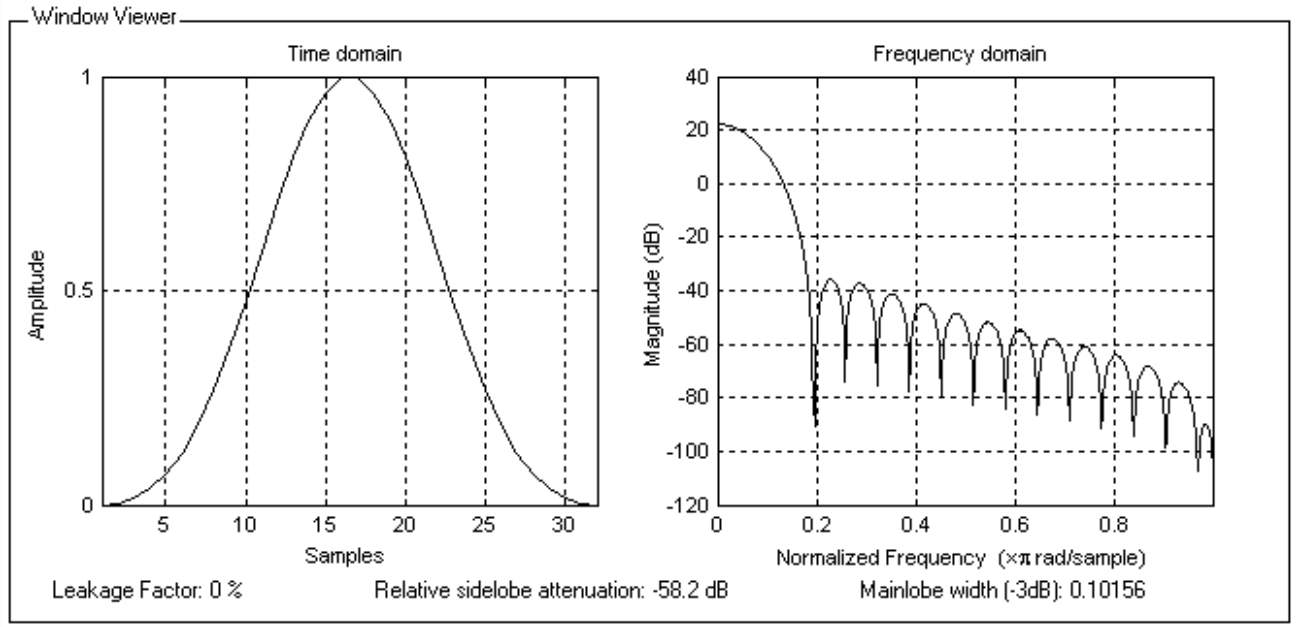


Функция окна более гладкая , без боковых лепестков, но ее ширина больше, чем у прямоугольного окна

Наиболее популярные оконные функции в АС

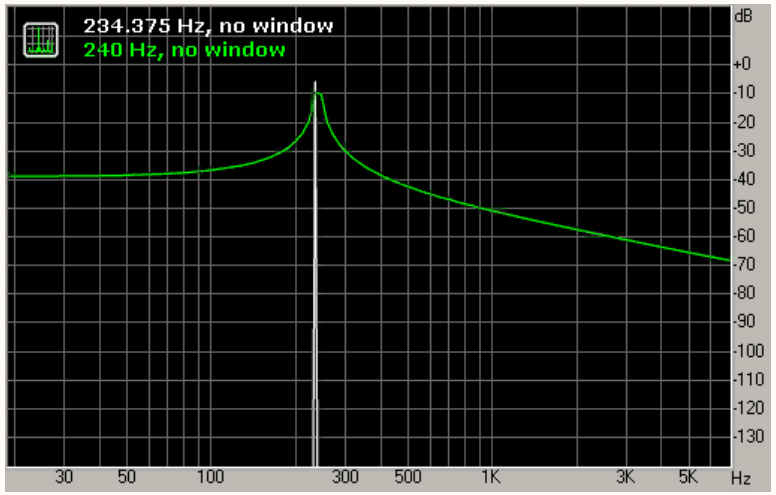


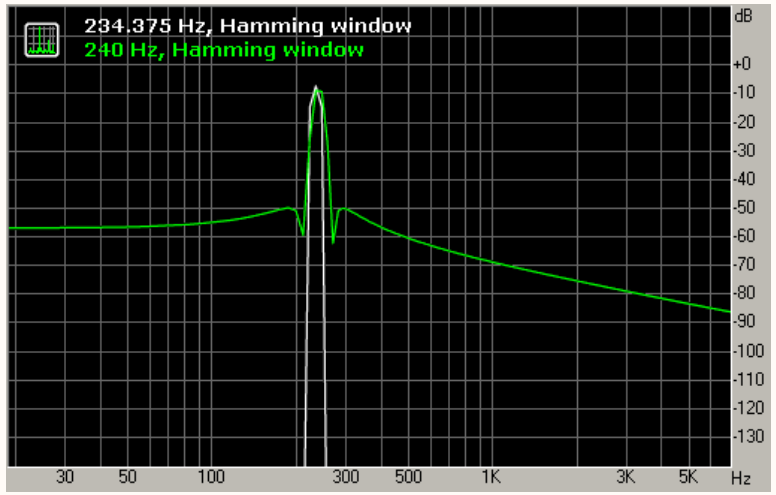
Окно Хэмминга (слева) и его амплитудный спектр (справа)

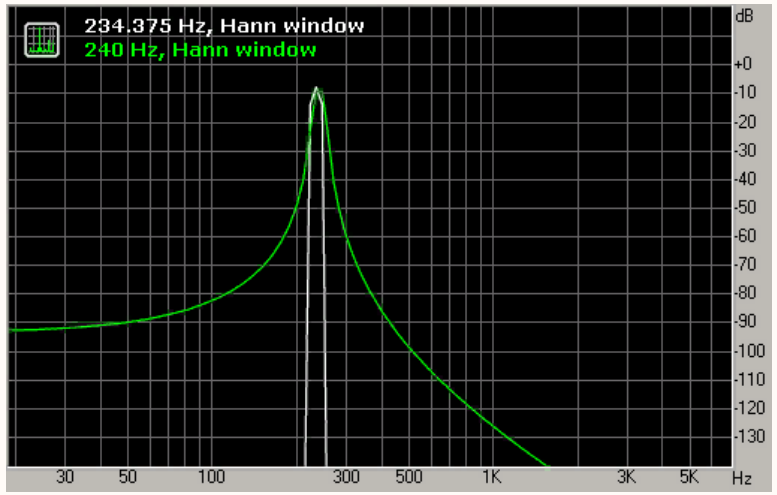


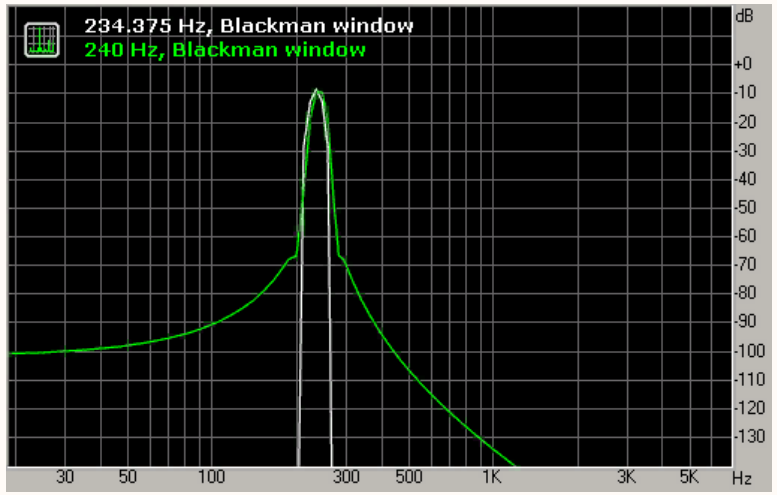
Окно Блэкмена (слева) и его амплитудный спектр (справа

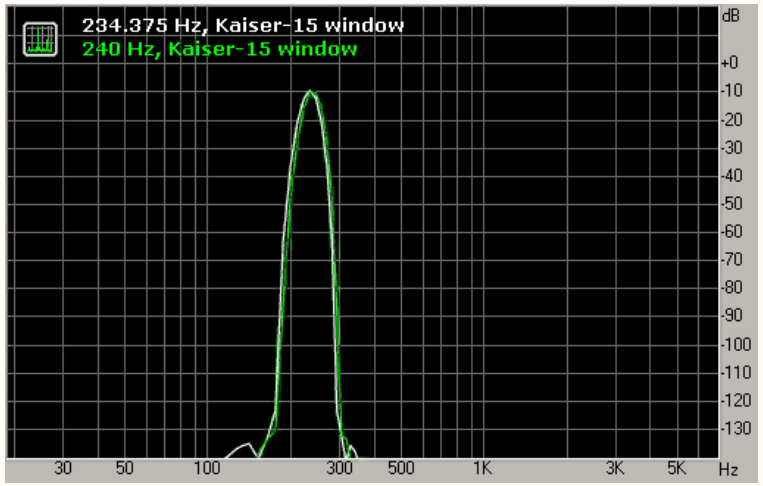
Применение оконных функций к одиночному гармоническому сигналу







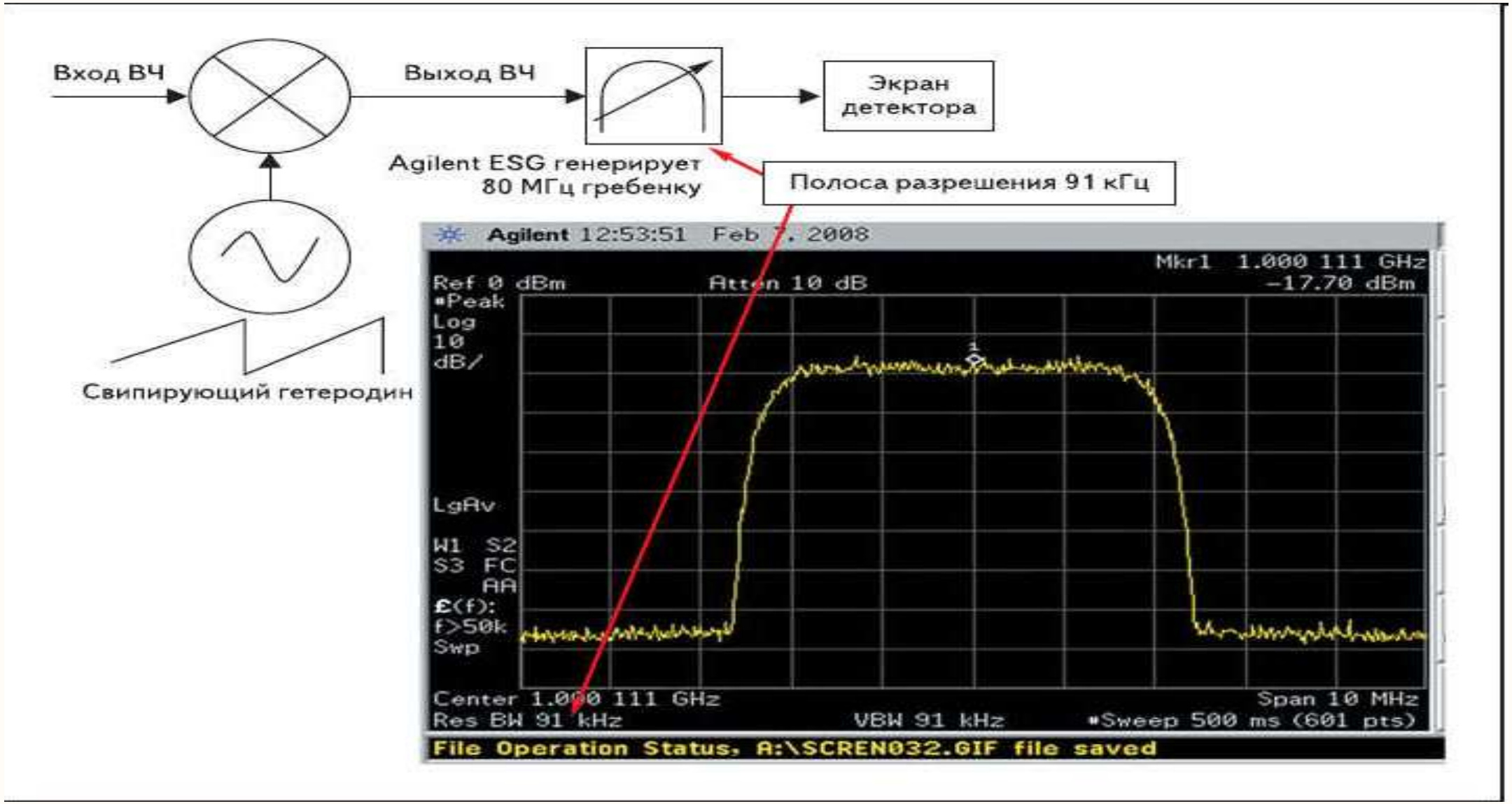




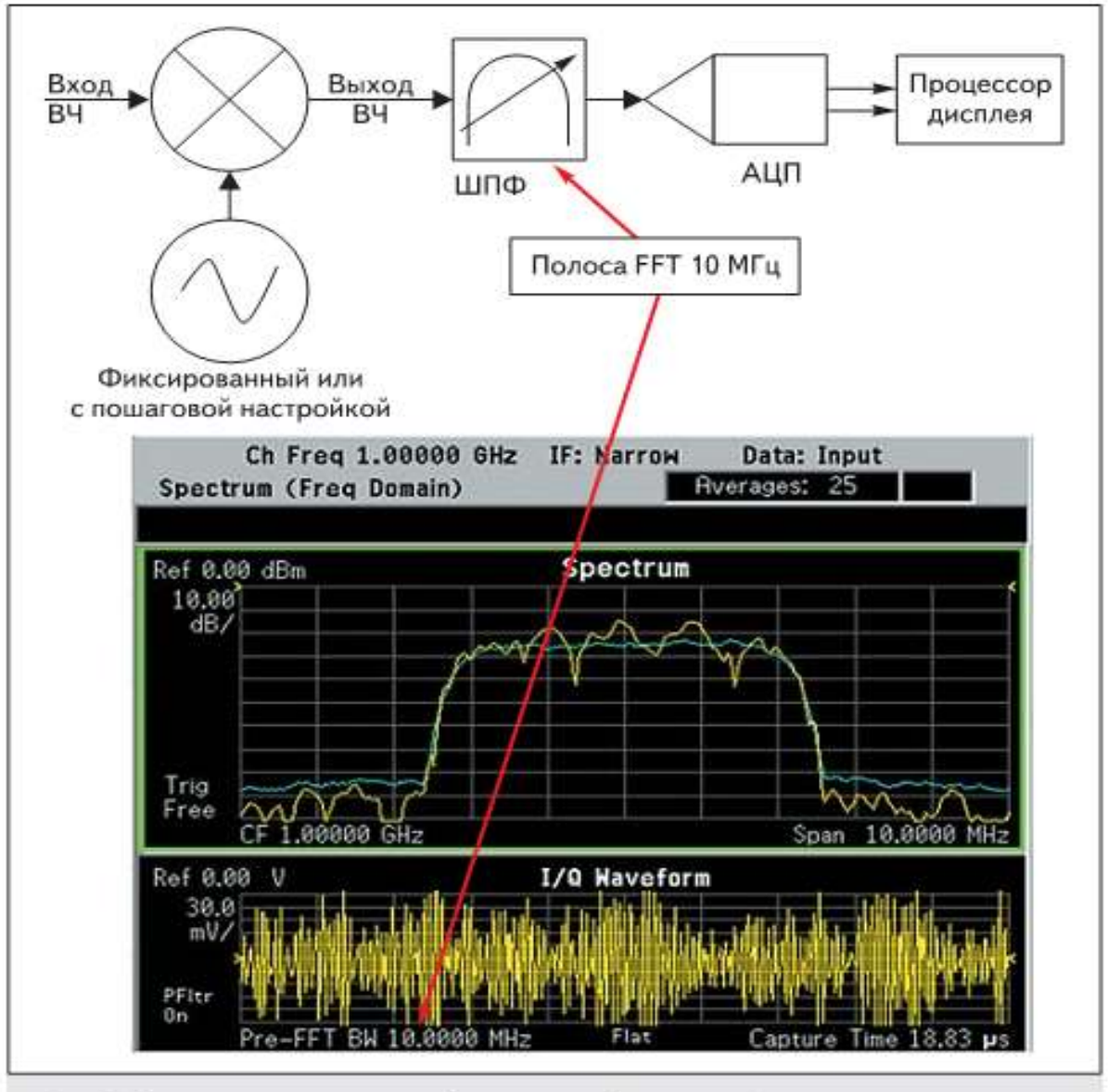
Прямоугольное окно
Окно Хэмминга, Окно Хана
Окно Блэкмана, Окно Кайзера.

Белым цветом отмечен случай совпадения частоты сигнала с частотой БПФ компоненты (кратность времени анализа и периода сигнала)

Пример последовательного анализа спектра со свиппированием гетеродина широкополосного сигнала в полосе 100 МГц



Цифровой БПФ в полосе 100 МГц анализатором с пошаговым изменением частоты гетеродина



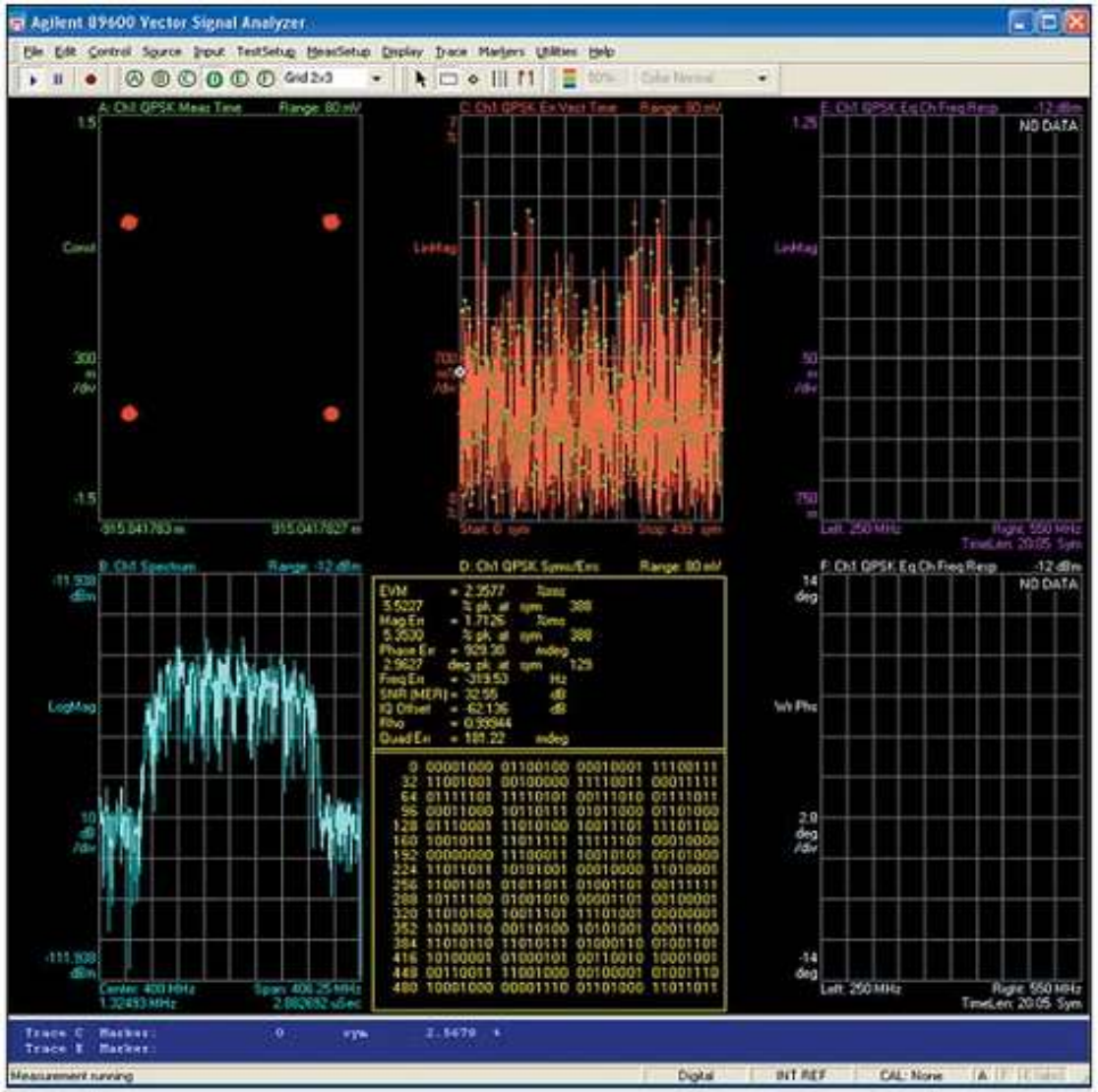
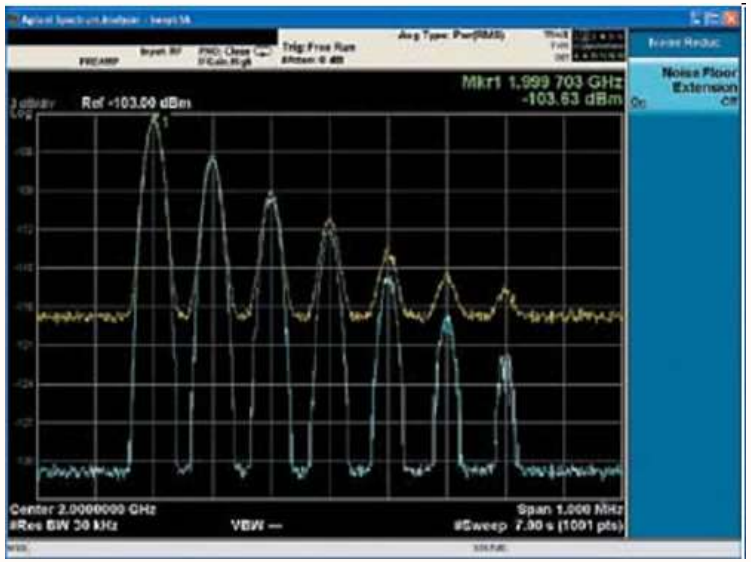


Рис. 4. Спутниковый сигнал, полоса 300 МГц

Анализатор спектра Agilent серии PXA (N9030A)





•Уровень собственных шумов до -161 дБм

•Средний уровень собственных шумов -172 дБм при использовании метода уменьшения шумов NFE

• Динамический диапазон до 75 дБ; полоса анализа / демодуляции 10МГц..140 МГц

• Погрешность измерения уровня ±0,19 дБ

Анализатор спектра Agilent серии CSA (N1996A)



Фазовый шум на частоте 1 ГГц (отстройка 10 кГц): –85 дБс/Гц

Динамический диапазон по третьей гармонике на 1 ГГц : 96 дБ

Средний уровень собственного шума на частоте 1 ГГц : –148 дБм

Стандартные пределы установки ослабления 40 дБ, дискрет аттенюатора 1 дБ

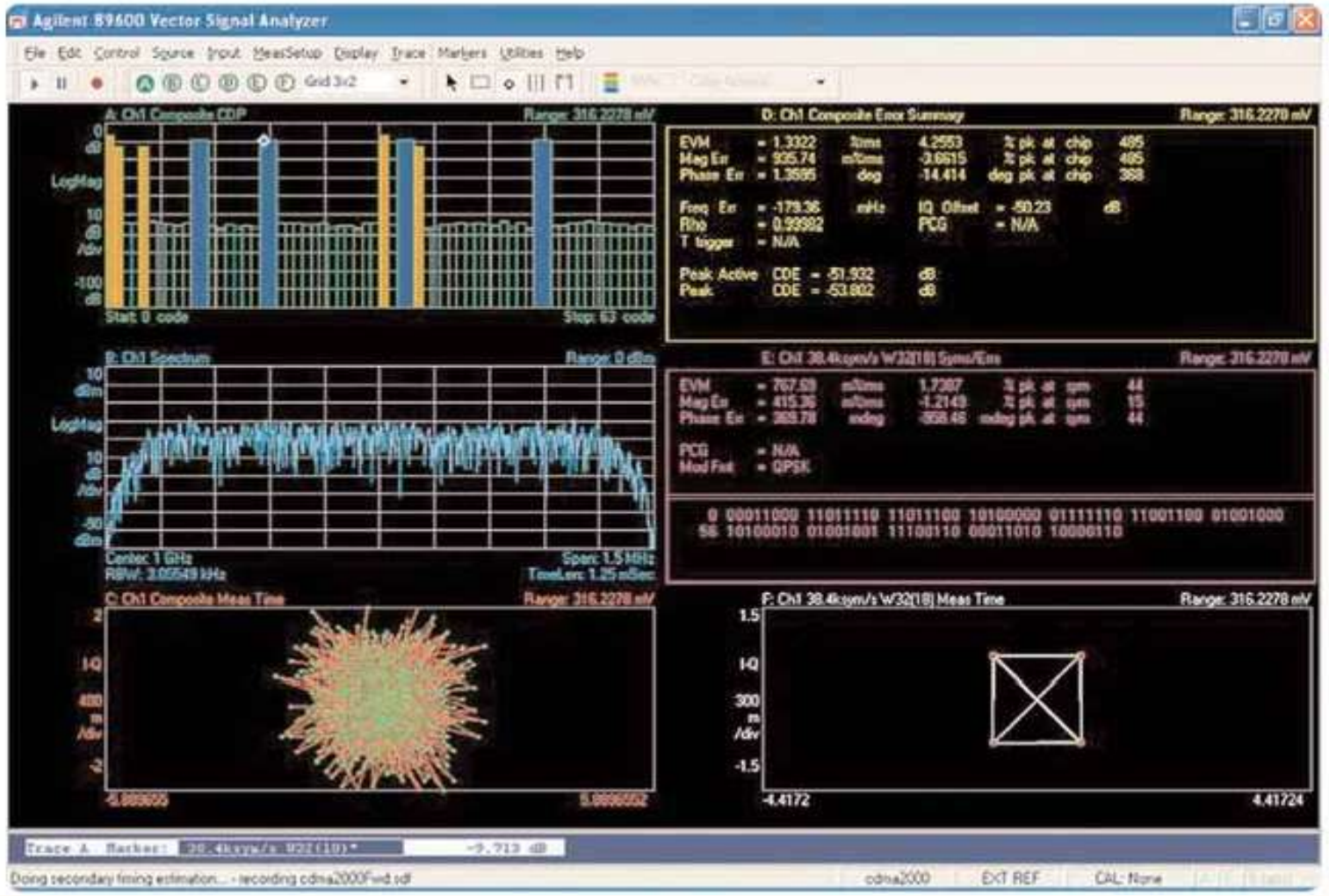
Суммарная амплитудная погрешность ±1,5 дБ

Ручной анализатор спектра ВЧ диапазона N9340A



Фазовый шум на частоте 1 ГГц (отстройка 10 кГц): –87 дБс/Гц
Макс. динамический диапазон по третьей гармонике на 1 ГГц : 89 дБ
Средний уровень собственного шума на частоте 1 ГГц: –144 дБм
Стандартные пределы установки ослабления 51 дБ, дискрет 1 дБ
Суммарная амплитудная погрешность ±1,5 дБ

Программа векторного анализа сигналов 89601A/89601AN



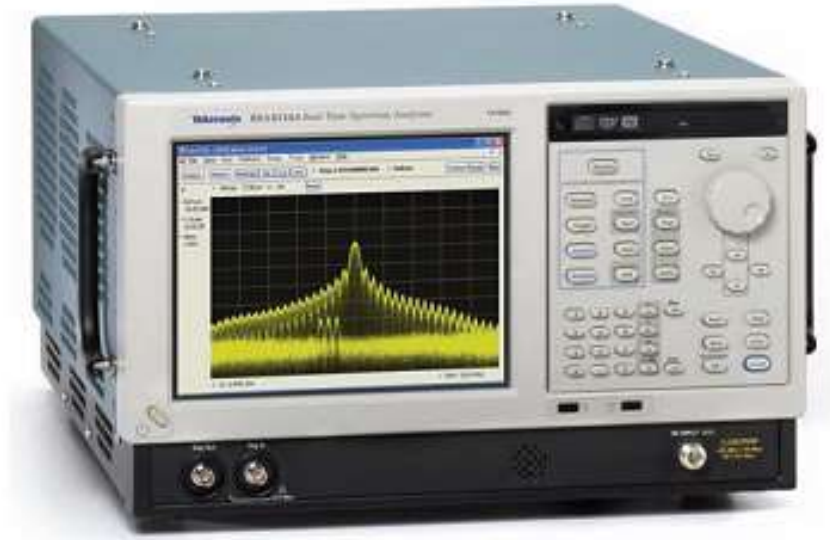
Форматы демодуляции
FSK: уровень 2, 4, 8, 16 (включая GFSK)
MSK (включая GMSK), BPSK, QPSK, OQPS
QAM и пр.
Сотовая связь:
cdma2000, WFCDMA, HSPA, GSM, EDGE,
CDMA (базовые станции), CDMA и пр.
Беспроводные сети:
WLAN IEEE 802.11a/b/g/j/p/n (MIMO),
Bluetooth, WiMAX IEEE 802.16 OFDM/OFDM
ZigBee™
Цифровое ТВ.
Частная мобильная радиосвязь.

Векторный анализатор сигналов на базе шины VXI 89600S



Анализаторы спектра Tektronix

RSA6000



RSA3303A

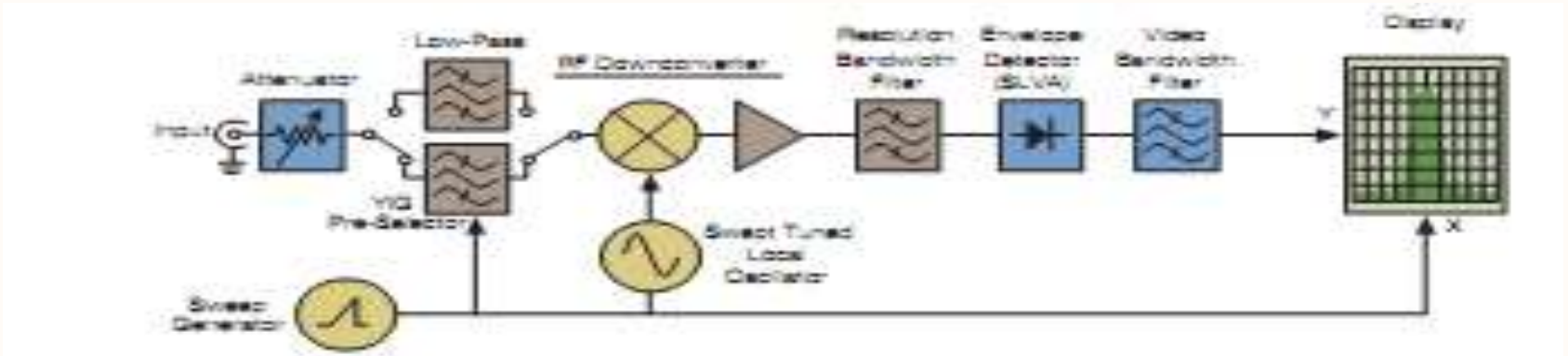


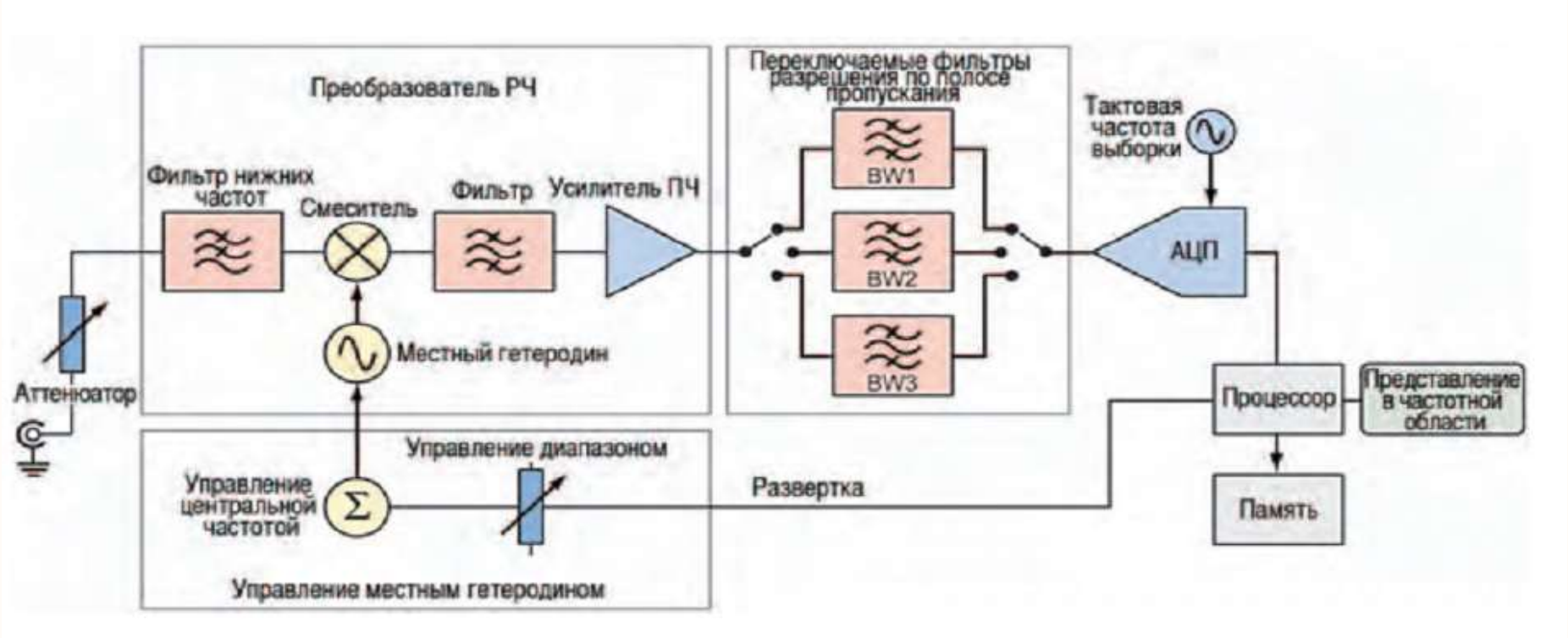
RSA5106A

RSA607A

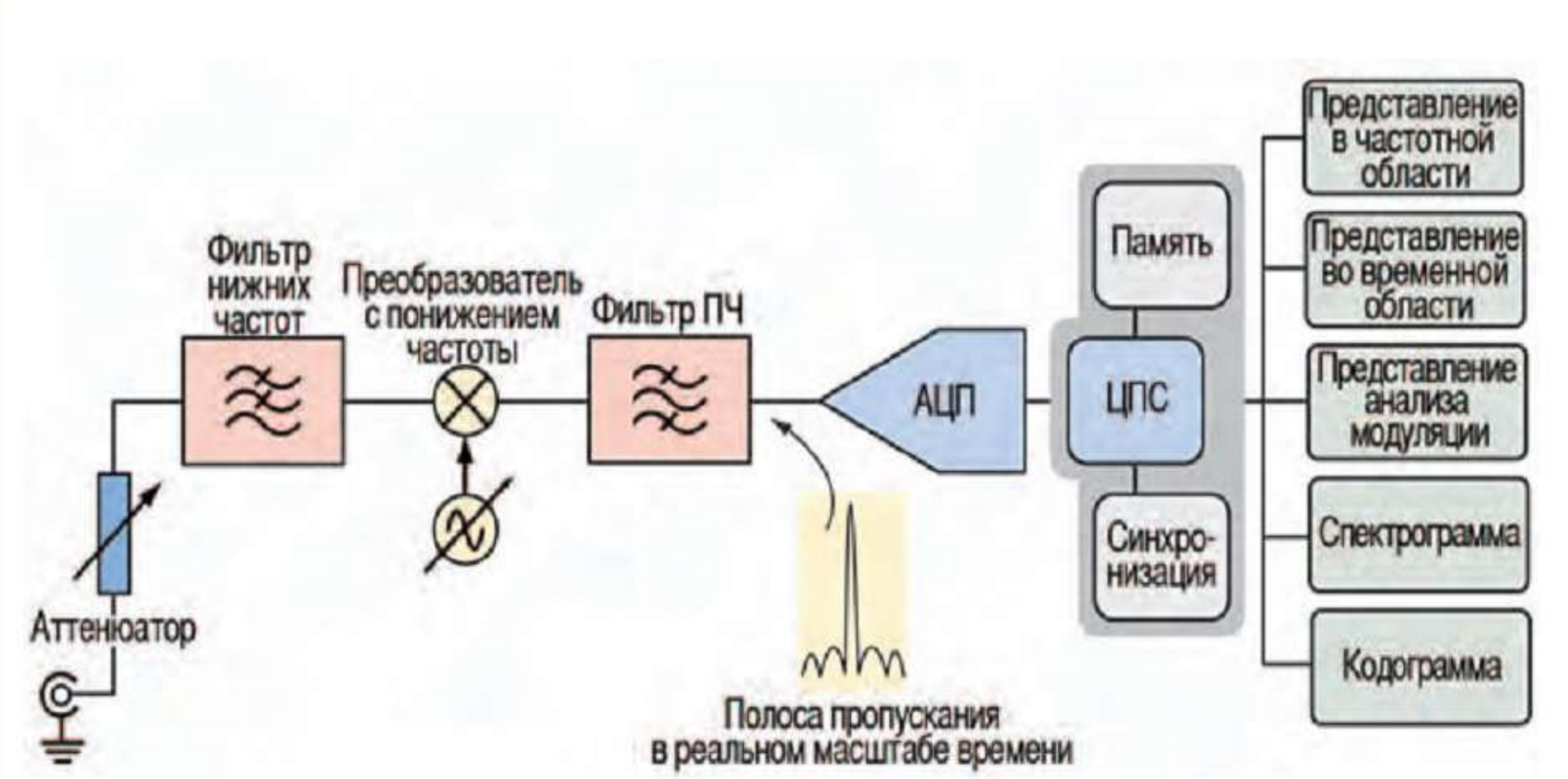


Tektronix: последовательный анализатор со свиппированием и цифровой анализатор с фиксированной частотой гетеродина





Анализатор спектра **реального** времени Tektronix RSA 6100



Анализатор спектра реального времени Tektronix RSA 6100

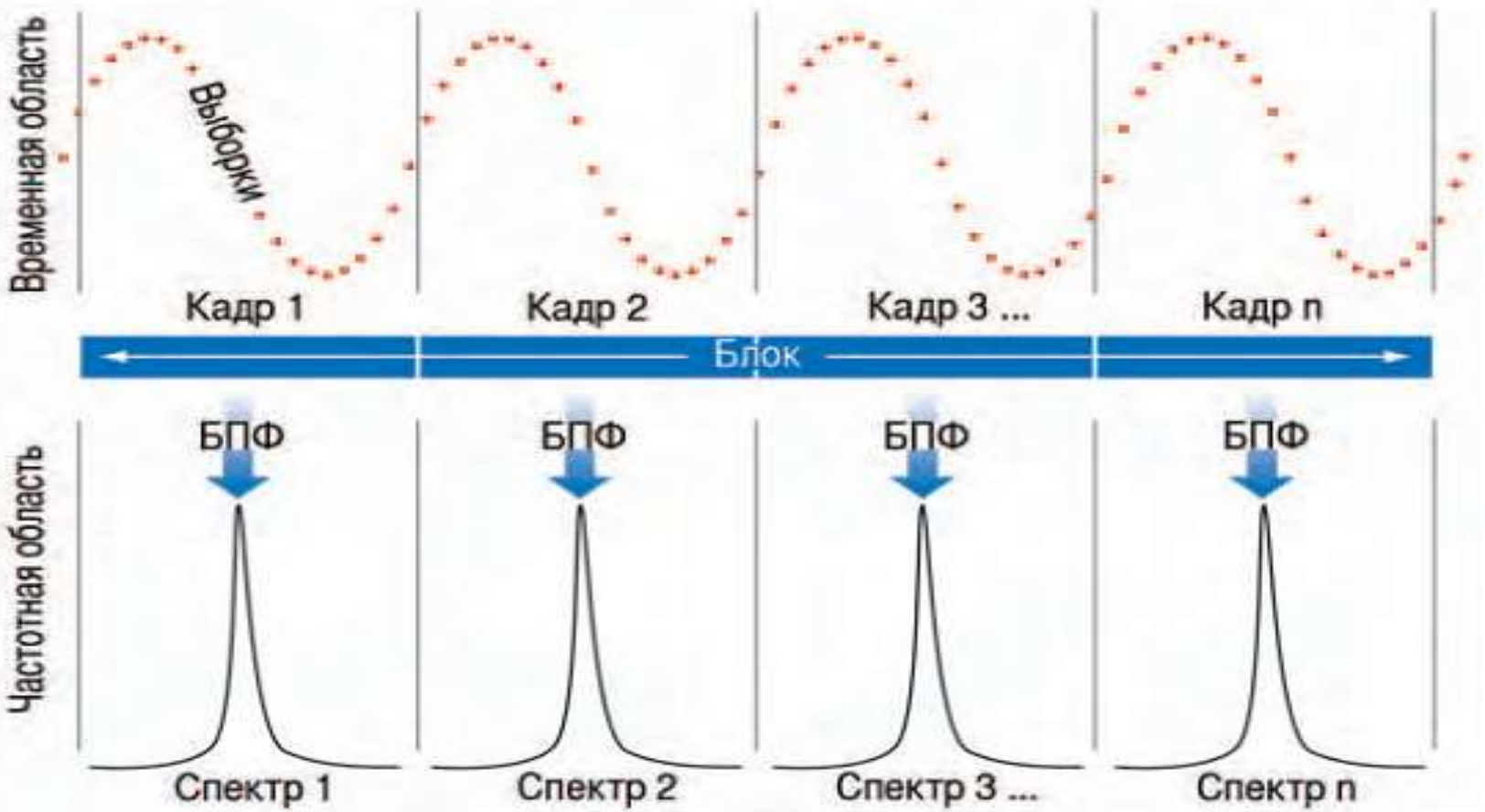


Рис. 1-5. *Выборки, кадры и блоки: иерархия памяти анализатора спектра в реальном масштабе времени*

Анализатор спектра реального времени Tektronix RSA 6100

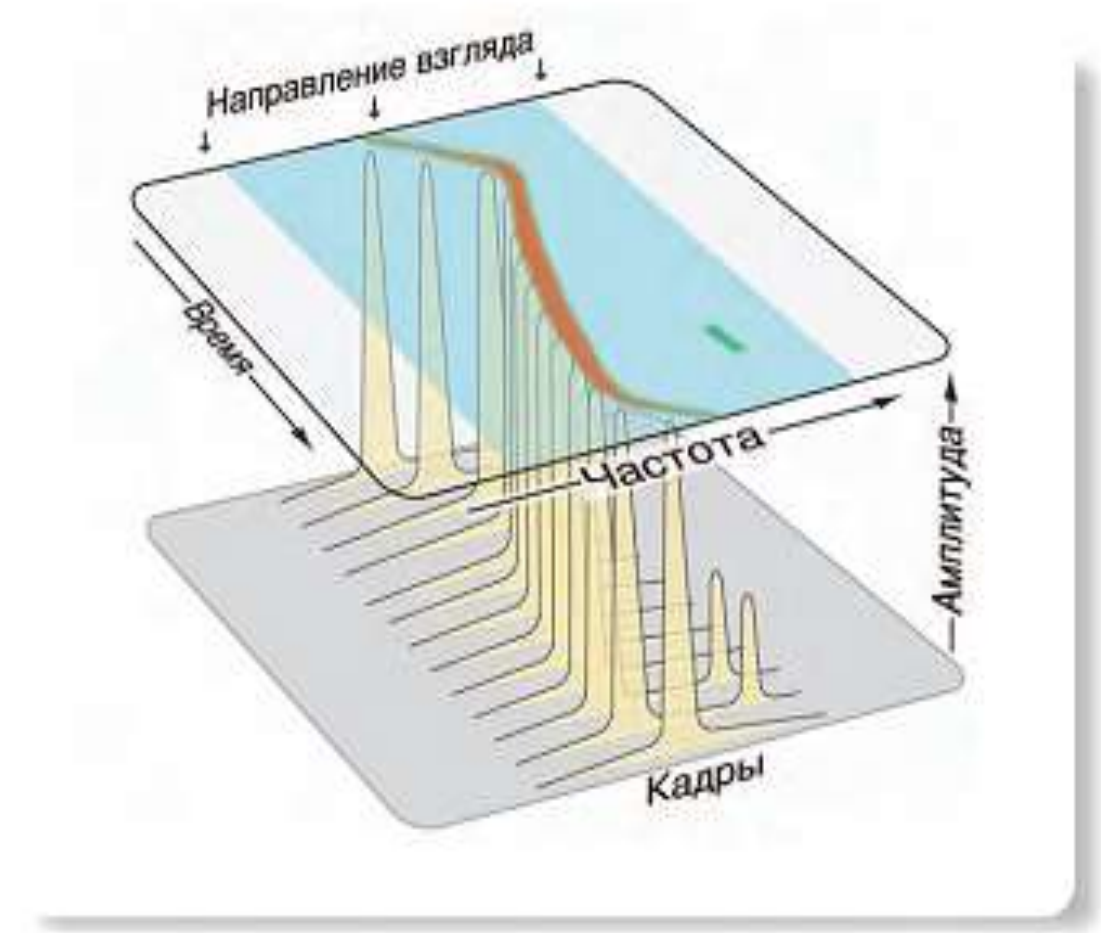


Рис. 1-10. Отображение спектрограммы

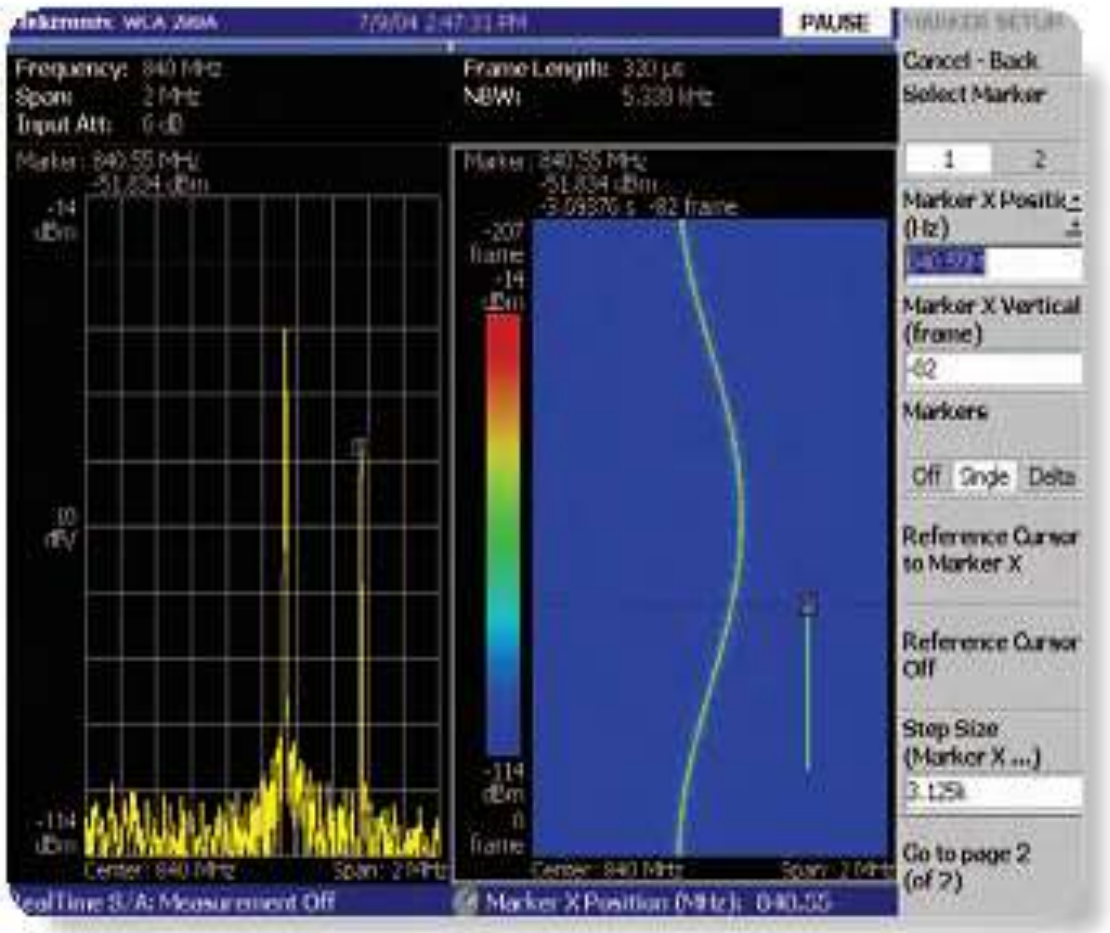


Рис. 1-11 Синхронные представления: зависимость мощности от частоты (слева) и спектрограмма (справа)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

