

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

БЕЛЯЕВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МНОГОПороГОВЫХ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАДИОСИГНАЛОВ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ В
ШИРОКОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ
АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ФОРМЕ ИМПУЛЬСА**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Румянцев Константин Евгеньевич.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 АНАЛИЗ МНОГОПороГОВЫХ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.....	19
1.1 Постановка задачи оценки длительности радиоимпульса в приемниках импульсных сигналов при отсутствии априорной информации о форме импульса	19
1.2 Анализ сигналов и помех на входе устройства измерения длительности импульсов	24
1.3 Характерные искажения формы импульсов в логарифмическом приемнике	36
1.4 Анализ существующих методов и устройств измерения длительности	38
1.4.1 Общие положения	38
1.4.2 Измеритель длительности с двойным преобразованием формы	43
1.4.3 Измеритель длительности со следящим порогом.....	45
1.4.4 Многопороговые измерители	47
1.5 Методика проектирования многопороговых измерителей длительности и оценка их эффективности	51
1.6 Выводы.....	52
2 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО НИЖНЕМУ И ПЕРВОМУ СВЕРХУ ИЗ ОТПУСТИВШИХ ПОРОГОВ.....	54
2.1 Анализ алгоритма формирования нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпущивших порогов многопорогового измерителя длительности	54
2.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отпущивших порогов.....	58
2.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса [33].....	58
2.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса.....	60
2.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса[30]	62

2.2.4 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	64
2.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса [31].....	67
2.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	69
2.2.7 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине	71
2.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	73
2.2.9 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94].....	75
2.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и первому сверху из отпущивших порогов	77
2.3.1 Методика расчета случайной погрешности измерения	77
2.3.2 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса [36]	78
2.3.3 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса.....	79
2.3.4 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса.....	81
2.3.5 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	83
2.3.6 Случайная погрешность измерения синусного импульса	84
2.3.7 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	86
2.3.8 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине	88
2.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	89
2.3.10 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95].....	90
2.4 Выводы.....	92
3 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО НИЖНЕМУ И ВТОРОМУ СВЕРХУ ИЗ ОТПУСТИВШИХ ПОРОГОВ	99

3.1 Анализ алгоритма формирования нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов многопорогового измерителя длительности	99
3.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов	101
2.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса	101
3.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса.....	103
3.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса.....	105
3.2.4 Систематическая погрешность измерения экспоненциально-степенного импульса	107
3.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса	109
3.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	110
3.2.7 Систематическая погрешность измерения импульса с провалом на вершине.....	112
3.2.8 Систематическая погрешность измерения двухэкспоненциального импульса	113
3.2.9 Систематическая погрешность измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94]	115
3.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов	116
3.3.1 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса	116
3.3.2 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса.....	117
3.3.3 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса.....	119
3.3.4 Случайная погрешность измерения экспоненциально-степенного импульса	120
3.3.5 Случайная погрешность измерения синусного импульса	121
3.3.6 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	123
3.3.7 Случайная погрешность измерения импульса с провалом на вершине	124
3.3.8 Случайная погрешность измерения двухэкспоненциального импульса.....	125

3.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95].....	127
3.4 Выводы.....	127
4 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО ДВУМ СРЕДНИМ ПОРОГАМ.....	133
4.1 Анализ алгоритма формирования нормированной длительности по двум средним порогам многопорогового измерителя длительности	133
4.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум средним порогам	137
4.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса	137
4.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса.....	139
4.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса.....	140
4.2.4 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	141
4.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса	143
4.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	144
4.2.7 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине	146
4.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	147
4.2.9 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94].....	148
4.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум средним порогам	149
4.3.1 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса	149
4.3.2 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса.....	150
4.3.3 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса.....	151
4.3.4 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	152
4.3.5 Случайная погрешность измерения синусного импульса	154

4.3.6	Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	155
4.3.7	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине	156
4.3.8	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	158
4.3.9	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95].....	159
4.4	Выводы.....	160
5	ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО ДВУМ РАЗНЕСЕННЫМ ПОРОГАМ.....	166
5.1	Анализ алгоритма формирования нормированного импульса по двум разнесенным порогам многопорогового измерителя длительности	166
5.2	Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум разнесенным порогам	168
5.2.1	Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса.....	168
5.2.2	Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса.....	169
5.2.3	Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса.....	171
5.2.4	Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	172
5.2.5	Систематическая погрешность измерения синусного импульса	174
5.2.6	Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	175
5.2.7	Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине	177
5.2.8	Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	178
5.2.8	Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94].....	179
5.3	Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум разнесенным порогам	180

5.3.1	Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса	180
5.3.2	Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса.....	181
5.3.3	Случайная погрешность измерения гауссовского импульса.....	183
5.3.4	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса	184
5.3.5	Случайная погрешность измерения синусного импульса	185
5.3.6	Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса.....	187
5.3.7	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине	188
5.3.8	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса	189
5.3.9	Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95].....	191
5.4	Выводы	192
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	198
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	201
	Приложение А	211
	Приложение Б	216
	Приложение В.....	217

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последние десятилетия стремительно развивается радиоэлектроника, появляются новые технологии в области микроэлектроники, создаются новые цифровые логические схемы, аналого-цифровые преобразователи, микропроцессоры, что приводит к появлению новых и возрастанию числа различных радиотехнических устройств, увеличению количества передающих связных станций, приёмников импульсных сигналов. Современные системы идут по пути увеличения динамического и частотного диапазонов, увеличения количества и видов применяемых сигналов, освоения нано- и пикосекундных диапазонов. В основе этих достижений лежат новые методы цифровой обработки сигналов, использование новейших изделий полупроводниковой техники. Все это позволяют создавать быстродействующие элементы, прецизионные аналоговые приборы и средства вычислительной техники, открывшие широкие возможности для реализации новых идей при построении радиотехнической аппаратуры.

В связи с этим, становится актуальной проблема значительного улучшения параметров радиотехнических систем – приемников импульсных сигналов, необходимых для успешного обнаружения, классификации и обработки огромного многообразия существующих радиоизлучений.

Основными параметрами, по которым осуществляется идентификация радиоэлектронного средства, являются период повторения, длительность, время прихода, несущая частота.

Приемники импульсных сигналов должны обладать как можно более широким диапазоном частот, динамическим диапазоном, большей точностью определения первичных параметров сигналов (периода повторения, длительности, частоты, амплитуды), большей пространственной и временной избирательностью, малым временем принятия решения об обнаружении, соизмеримого со временем обработки одного импульса, высокой достоверностью и быстродействием обработки.

Диссертационная работа посвящена разработке многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов приемников одиночных импульсных сигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса.

Степень разработанности темы. Анализ литературы показал наличие большого количества публикаций по измерению длительности импульсов. Особый интерес представляют многопороговые измерители длительности импульсов. Они за счет структуры построения позволяют измерять импульсы в потоковом режиме, чем отличаются от измерителей длительности с запоминанием импульса и повышенной точностью измерения, и устойчивостью к флуктуациям сигнала, в отличие от однопороговых измерителей. Таким образом, разработка многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов приемников одиночных импульсных сигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса является актуальной научно-технической задачей.

Актуальность исследований заключается в разработке многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов приемников одиночных импульсных сигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса.

Целью диссертационных исследований является повышение точности измерения длительности одиночных импульсных сигналов в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса посредством разработки нового многопорогового устройства измерения длительности.

Объектами исследований являются измерители длительности одиночных импульсных сигналов, работающие в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса.

Предметом исследований являются многопороговые алгоритмы измерения длительности одиночных импульсных сигналов, работающие в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса и гарантирующие высокую точность измерения.

Общая научная задача: разработка и исследование алгоритма измерения длительности одиночных импульсных сигналов, работающие в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса, гарантирующего высокую точность измерения.

Частные задачи диссертационных исследований:

1 Проведение сравнительного анализа существующих методов и устройств измерения длительности одиночных импульсов.

2 Математическое описание видов одиночных импульсных сигналов и помех на входе многопорогового измерителя длительности.

3 Классификация погрешностей измерения длительностей одиночных импульсных сигналов.

4 Исследование систематических погрешностей измерения длительности одиночных импульсов четырьмя типами многопороговых измерителей при работе по девяти типам импульсов.

5 Оценка случайных погрешностей измерения длительности одиночных импульсов четырьмя типами многопороговых измерителей при работе по девяти типам импульсов.

6 Разработка алгоритма измерения длительности одиночных импульсов по двум уровням, отличающегося от известных повышенной точностью измерения.

Для решения поставленных задач используются методы статистической радиотехники, математической статистики, математического моделирования и численного эксперимента.

Основные научные положения, выдвигаемые для защиты:

Положение 1. Алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, отличающийся измерением длительности по двум разнесённым пороговым уровням, обеспечивает работу в широком динамическом диапазоне изменений амплитуд в условиях априорной неопределённости в отношении формы импульса.

Положение 2. Полученные аналитические выражения и проведенные на их основе расчеты в пакете MathCad позволяют проводить анализ точностных характеристик четырёх многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Положение 3. Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов при формировании нормированного импульса по нижнему и первому из сверху отпустивших порогов для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

Положение 4. Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум средним порогам для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного, синус-квадратного импульсов.

Положение 5. Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум разнесённым порогам для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

Положение 6. Разработанная методика на основе полученных аналитических выражений погрешности многопорогового измерения длительности одиночных импульсных сигналов позволяет проводить сравнительный анализ погрешности измерения длительности различными типами многопороговых измерителей.

К наиболее существенным новым научным результатам, полученным в результате диссертационных исследований, относятся:

- алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, отличающийся измерением длительности по двум разнесённым пороговым уровням и обеспечивающий работу в широком динамическом диапазоне изменений амплитуд в условиях априорной неопределённости в отношении формы импульса;

- аналитические выражения, позволяющее проводить анализ точностных характеристик четырёх многопороговых измерителей для различных типов импульсов;

- аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопороговых измерителей длительности одиночных импульсных сигналов;

- методика анализа погрешности многопорогового измерения длительности одиночных импульсных сигналов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

Разработан алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, отличающийся измерением длительности по двум разнесённым пороговым уровням и обеспечивающий работу в широком динамическом диапазоне изменений амплитуд в условиях априорной неопределённости в отношении формы импульса.

Получены аналитические выражения, позволяющие проводить анализ точностных характеристик четырёх многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов при формировании нормированного импульса по нижнему и первому из сверху отпустивших порогов для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

Получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум средним порогам для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного, синус-квадратного импульсов.

Получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум разнесённым порогам для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

Разработана методика на основе полученных аналитических выражений анализа погрешности многопорогового измерения длительности одиночных импульсных сигналов, позволяющая проводить сравнительный анализ погрешности измерения длительности различными типами измерителей.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- техническое решение, защищённое патентом на изобретение и реализующее предложенный алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, обеспечивает измерение с повышенной точностью длительности одиночных импульсных сигналов в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса. Предложенный измеритель длительности одиночных импульсных сигналов обеспечивает снижение систематической погрешности на 3 % для трапецеидального импульса, на 5% для синус-квадратного импульса по сравнению с лучшими из трёх известных измерителей. В предложенном измерителе длительности одиночных импульсных сигналов трапецеидальной формы случайная погрешность не

хуже, чем в лучшем из трёх известных измерителей. Для экспоненциального импульса при одновременном отсутствии выбросов, а также для импульса с осцилляциями на вершине и после среза, случайная погрешность меньше на 2 %;

- разработанное программное обеспечение для ПЭВМ в пакете MathCad позволяют проводить анализ точностных характеристик четырёх предложенных многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза. Набор программ позволяет оптимизировать характеристики многопорогового измерителя по заданному уровню погрешности измерения длительности при изменении формы сигнала и отношения сигнал/шум;

- даны рекомендации по использованию алгоритмов работы измерителей длительности для разных типов одиночных импульсных сигналов для повышения точности измерения в широком динамическом диапазоне.

Внедрение результатов работы. Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами реализации по выполненным НИР, в которых использованы результаты исследований и актами внедрения в учебный процесс ЮФУ. Научные результаты и практические рекомендации использованы при проектировании многопороговых измерителей серийных изделий 5П-28 и МП-405, о чем имеются акты о внедрении.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается:

- положительно оценёнными результатами исследований, включёнными в отчеты о НИР;
- положительными отзывами специалистов на доклады, сделанные на научно-технических конференциях;
- численными расчетами и результатами экспериментальных исследований;
- согласованностью полученных результатов с ранее полученными исследованиями;
- публикациями по теме исследования.

Апробация работы. Диссертационная работа и её отдельные разделы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных НТК: «Кибернетика,

радиоэлектроника и системы управления» (КРЭС 2004, г. Таганрог, 2004), «Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках» (ИП-2004, г. Таганрог), «Физика и технические приложения волновых процессов» (Волгоград, 2004), «Современные проблемы радиоэлектроники» (межрегиональная НТК 2006, г. Ростов-на-Дону).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 14 научных работ. Из них в перечне рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук опубликованы 7 статей [96,97,94,95,86,89,90]. В реферируемых изданиях, учитываемых в РИНЦ, опубликовано 5 работ [29,83,84,87,85]. Получены патенты на изобретение [93] и на полезную модель [98], оформлены 3 отчета о патентных исследованиях [32,91,92], издано руководство к лабораторной работе [28].

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует п. 3 («Разработка и исследование новых радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия, помехоустойчивости») и п. 5 («Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки.») паспорта научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Личный вклад автора. Основные научные результаты, результаты патентных исследований, методики анализа многопороговых измерителей длительности, аналитические выражения для случайной и систематической составляющих погрешности измерения длительности импульсов, количественная оценка погрешностей измерения, метод измерения длительности, приведённые в диссертации, получены автором лично.

Структура диссертационной работы. Диссертационное исследование написано на русском языке, включает введение, пять глав, заключение, список использованных источников и приложения. Полный объём диссертации составляет 217 страниц, включая 211 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 98 наименований. Приложения содержат 7 страниц.

В первой главе проведен анализ сигналов на входе устройства измерения длительности. Установлено, что поступающие на вход измерителя длительности импульсы отличаются широким многообразием форм, присутствуют: прямоугольные, экспоненциальные, экспоненциально-степенные, двухэкспоненциальные, гауссовские, синусные, синус-квадратные, с провалом на вершине, с осцилляциями на вершине и после среза.

Рассмотрены типы измерителей: однопороговые и многопороговые. Преимущества многопорогового измерителя в большей универсальности и точности.

Экспериментально доказано, что при прохождении импульсов через тракт приемника длительность сигнала существенно зависит от амплитуды и длительности входного сигнала. Наибольшему искажению подвержен срез импульса. Для точного измерения длительности импульсов на выходе приемника необходимо использовать характерные точки отсчета, расположенные в области вершины импульса, или несимметрично расположенные на фронте и срезе видеоимпульса.

Во второй главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов в широком динамическом диапазоне для различных типов импульсов (Измеритель №1). Рассмотрена функциональная схема измерителя длительности и варианты её реализации с помощью современных средств проектирования цифровых устройств. Показаны эпюры напряжений, поясняющие принцип работы измерителя.

Для расчета систематической и случайной погрешностей выведены аналитические выражения данного метода измерения длительности при работе с экспоненциальным, гауссовским, синусным и синус-квадратным импульсами.

Проведен расчет систематической и шумовой ошибок измерения длительности.

Систематическая и случайная погрешности для экспоненциально-степенного и двухэкспоненциального импульсов, импульса с провалом на вершине и осцилляциями на вершине и после среза рассчитывались численным методом при помощи программы MathCad.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что многопороговый измеритель длительности с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов наиболее пригоден для измерения

длительности импульсов симметричной формы. Недостатком такого метода формирования нормированного импульса является то, что наличие даже небольших выбросов на вершине импульса может привести к значительной погрешности в формировании нормированного импульса. А попадание порога на вершину импульса приводит к значительному скачкообразному увеличению случайной ошибки измерения длительности.

В третьей главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов в широком динамическом диапазоне для импульса с осцилляциями на вершине и после среза (Измеритель №2). Рассмотрена функциональная схема измерителя длительности. Показаны эпюры напряжений, поясняющие принцип работы измерителя.

Приведены, известные ранее, результаты расчетов систематической и случайной погрешностей при работе по трапецеидальным, экспоненциальным, гауссовским, экспоненциально-степенным, синусным, синус-квадратным и двухэкспоненциальным импульсам и импульсу с провалом на вершине, для систематизации полученных результатов и сравнения с остальными типами измерителей.

Оригинальными являются результаты расчетов систематической и случайной погрешностей при работе по импульсу с осцилляциями на вершине и после среза.

Многопороговый измеритель с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов имеет меньшую систематическую погрешность по сравнению с измерителем с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отсутствующих порогов при измерении трапецеидального, экспоненциально-степенного, синусного импульсов, импульса с провалом на вершине, импульса с осцилляциями на вершине и после среза. По случайной ошибке имеет меньшую погрешность при измерении трапецеидального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного импульсов, импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Таким образом многопороговый измеритель с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов идеально подходит для измерения импульсов с провалом на вершине и с осцилляциями на вершине и после среза при условии, что шаг выбора порогов больше, чем величина

провалов или осцилляций на вершине поступающих импульсов, однако имеет большие погрешности при измерении длительности несимметричных форм импульсов.

В четвертой главе проведен анализ многопорогового измерителя с формированием длительности нормированного импульса по двум средним порогам (Измеритель №3). Данный измеритель отличается от двух предыдущих тем, что в нем производится усреднение длительности, измеренной по двум уровням, он более сложный в реализации, т.к. необходимо отслеживать уровень половинной амплитуды входного сигнала и после этого выбрать два порога ниже и выше этого уровня.

Рассмотрена функциональная схема измерителя, показаны эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя длительности.

Для расчета систематической и случайной погрешностей выведены аналитические выражения для данного метода измерения длительности при работе с трапецеидальным, экспоненциальным, гауссовским, синусным и синус-квадратным импульсами.

Проведен расчет систематической и шумовой ошибок измерения длительности.

Систематическая и случайная погрешности для двухэкспоненциального импульса, импульса с провалом на вершине, импульса с осцилляциями на вершине и после среза рассчитывались численным методом при помощи программы MathCad.

Приведены, известные ранее, результаты расчета систематической и случайной погрешностей экспоненциально-степенного импульса.

Проведенные расчеты, показывают, что многопороговый измеритель с измерением длительности по двум средним порогам имеет меньшую систематическую погрешность измерения трапецеидального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного импульсов и импульса с провалом на вершине, меньшую шумовую ошибку измерения синусного импульса и импульса с провалом на вершине, в остальных случаях шумовая ошибка соизмерима или больше, чем у других двух, рассмотренных ранее, измерителей.

В пятой главе предложен и рассмотрен алгоритм работы многопорогового измерителя с формированием длительности нормированного импульса по двум разнесенным порогам (Измеритель №4). Отличительной особенностью данного измерителя является возможность работы в большом динамическом диапазоне, в сложной электромагнитной обстановке и при отсутствии априорной информации о

форме импульса. Данный измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов.

Рассмотрена функциональная схема измерителя, показаны эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя длительности.

Для расчета систематической и случайной погрешностей выведены аналитические выражения для данного метода измерения длительности при работе с экспоненциальным, гауссовским, синусным и синус-квадратным импульсами.

Приведен, известный ранее, расчет систематической погрешностей трапецеидального импульса.

Для расчета систематической и случайной погрешностей выведены аналитические выражения для данного метода измерения длительности при работе с экспоненциальным, гауссовским, синусным и синус-квадратным импульсами.

Проведенные расчеты, показывают, что предложенный многопороговый измеритель с измерением длительности по двум разнесенным порогам имеет меньшую систематическую погрешность измерения трапецеидального, синусного и синус-квадратного импульсов. Измеритель имеет меньшую случайную погрешность при измерении экспоненциального и двухэкспоненциального импульсов. Т.о. данный измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов без провалов на вершине.

Для всех расчетов систематическая ошибка (СО) и случайная (шумовая) ошибка (ШО), определяемая шумами тракта, имеют пилообразный характер, обусловленный моментами перехода измерителя на следующий порог, за исключением ШО измерения длительности трапецеидального импульса.

В заключении подведены итоги диссертационных исследований, обосновано достижение поставленной цели.

В приложениях приведены акты о внедрении в учебный процесс и в производство, фото макета измерителя длительности (Приложения А, Б, В).

1 АНАЛИЗ МНОГОПороГОВЫХ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

1.1 Постановка задачи оценки длительности радиоимпульса в приемниках импульсных сигналов при отсутствии априорной информации о форме импульса

Огромный пласт радиотехнических устройств, к которым в том числе относятся приемники импульсных сигналов строятся исходя из потребности решения следующих основных задач: обеспечение большего рабочего диапазона частот, обнаружение источников радиоизлучений, автоматическое измерение параметров обнаруженных сигналов с высокой точностью, осуществление идентификации работающих радиоэлектронных средств, сбор и обработку данных о них, регистрация данные в ПЭВМ.

Наиболее конструктивно громоздкая часть приемной аппаратуры, такая как антенные системы, ВЧ-фильтры, фидеры для передачи СВЧ сигналов, размеры которой определяются диапазоном частот и необходимостью селективировать направления приема сигналов, зависят от реализуемых принципов поиска сигналов по частоте и направлению, условий одновременного приема сигналов при решении задачи их обнаружения.

Один из вариантов реализации приемника импульсных сигналов приведен на рисунке 1.1. Схема включает в себя антенные устройства $АН1...АНn$, входные устройства $ВУ1... ВУn$ (которые могут быть построены по типу приемников прямого усиления, супергетеродинных приемников, с использованием и без логарифмических видеоусилителей), комплексные измерители параметров сигналов $ИПС1...ИПСn$, аппаратуру вторичной обработки сигналов и аппаратуру отображения, управления и контроля.

Входные сигналы через антенные устройства поступают на входные устройства. Входные устройства, работающие в поддиапазонах частот, выполняют функции селекции и усиления. К выходам подключаются измерители параметров сигнала, которые формируют формуляры радиоимпульсов. Далее первичные параметры сигналов сортируют, прореживают и получают формуляры радиотехнических целей, которые поступают на устройства отображения.

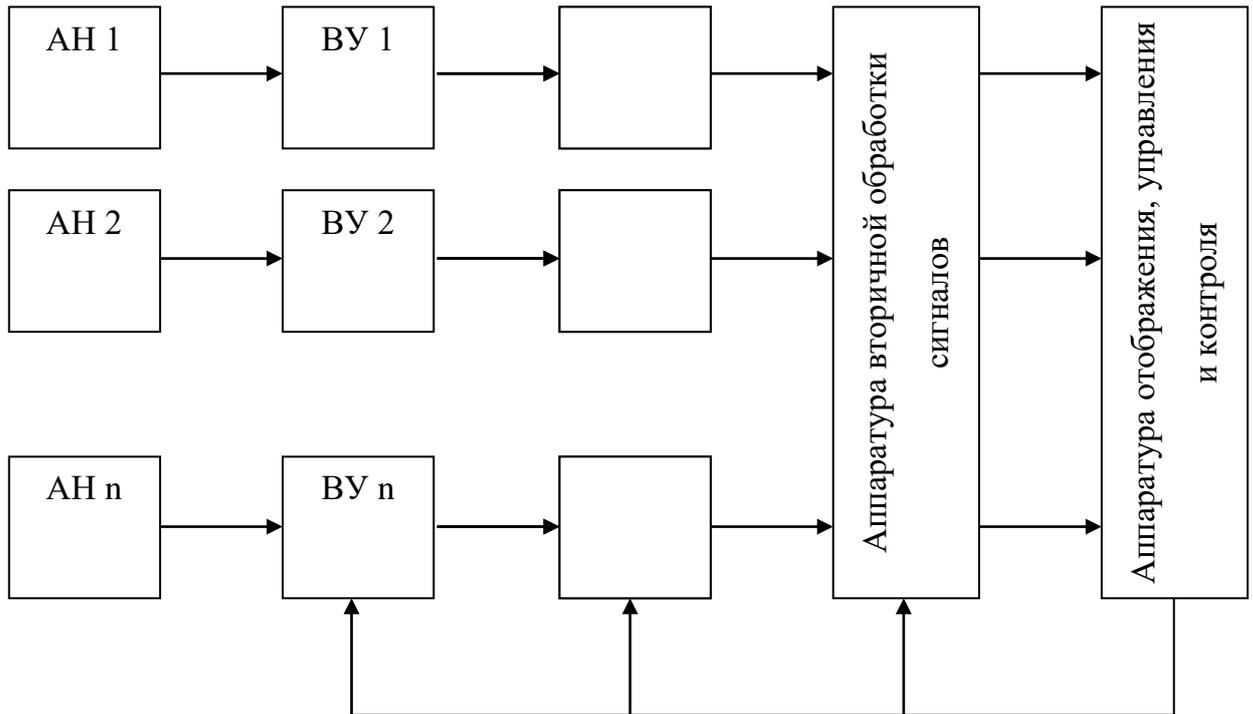


Рисунок 1.1 Укрупненная структурная схема варианта построения приемника импульсных сигналов

Остановимся подробнее на измерителе параметров сигналов. Измеритель параметров сигнала формирует на выходе информацию о необходимых и достаточных для идентификации параметрах радиоимпульса: амплитуде, длительности, времени прихода, несущей частоте, типе импульса, о наличии внутриимпульсной модуляции, наличии сложных сигналов. Для сигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией дополнительно измеряют модуль и знак девиации частоты, а также параметр, характеризующий закон изменения частоты. К измерителям параметров сигнала предъявляют требования высокой точности измерения параметров и однотипного представления параметров сигнала на выходе.

Типовой измеритель параметров сигнала включает в себя два канала: амплитудно-временной и частотно-фазовый. В частотно-фазовом канале решается задача измерения несущей частоты, начальной фазы, модуля и знака девиации частоты, определяется закон изменения частоты. В амплитудно-временном канале решается задача обнаружения сигнала и измерения амплитуды, длительности, времени прихода и других временных параметров, характеризующих импульс. Кроме того, в амплитудно-

временном канале формируется стробирующий импульс (сигнал обнаружения) для частотно-фазового канала, соответствующий входному импульсу.

Структурная схема амплитудно-временного канала приведена на рисунке 1.2. Она включает в себя амплитудный детектор, формирователь нормированного импульса, измеритель длительности, измеритель амплитуды и обнаружитель. Амплитудный детектор осуществляет выделение огибающей радиоимпульса, поступающего на его вход с линейного тракта приемника. Сформированный амплитудным детектором видеоимпульс поступает на входы обнаружителя, измерителя амплитуды, и формирователя нормированного импульса. Формирователь нормированного импульса формирует импульс нормированной амплитуды и длительностью, равной длительности входного импульса в соответствии с заложенным алгоритмом работы. Сформированный нормированный импульс поступает на вход измерителя длительности, где осуществляется измерение его длительности. Измеритель амплитуды осуществляет измерение амплитуды входного импульса и формирует на своем выходе код амплитуды для дальнейшей обработки. Обнаружитель обеспечивает заданную вероятность ложных тревог при обнаружении сигналов на фоне шумов и помех. В зависимости от алгоритмов измерения длительности и амплитуды, измерение длительности и амплитуды может выполняться одним устройством. Амплитудно-временной канал измерителя параметров сигнала может также включать в себя измерители других параметров видеоимпульса: длительности фронта, длительности среза, длительности вершины, выброса на вершине и т. д.

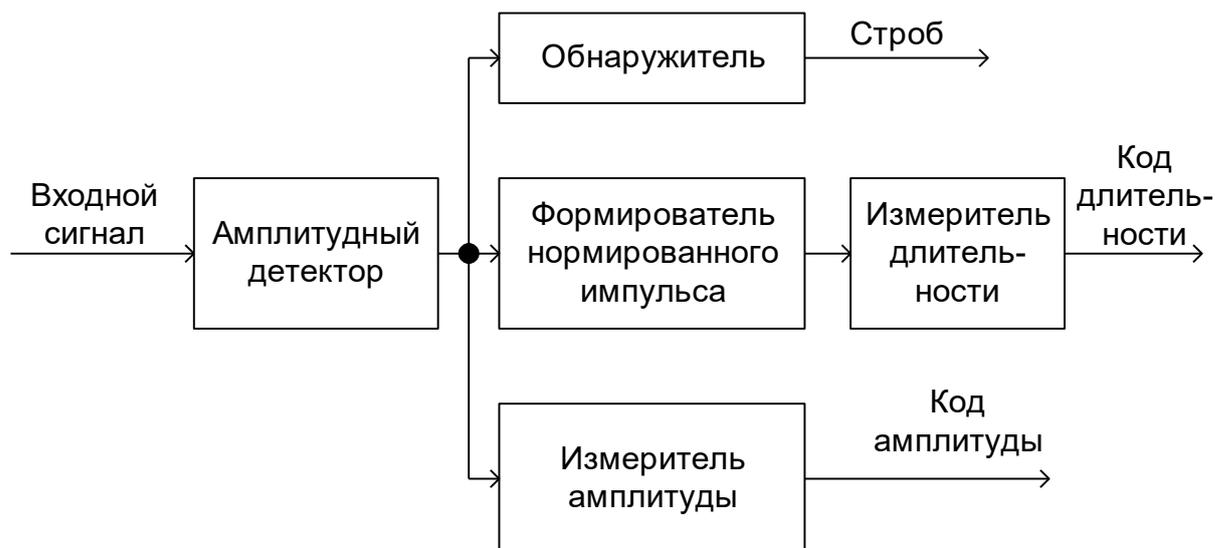


Рисунок 1.2. Структурная схема амплитудно-временного канала измерителя параметров сигнала

Линейный тракт приемной части приемника импульсных сигналов обеспечивает частотную и пространственную селекцию входных сигналов. Сигнал, поступающих на вход измерителя параметров сигнала, является узкополосным. Тем не менее, два или более радиосредства могут использовать близкие частоты, и на вход измерителя будут поступать одновременно несколько сигналов, возможно разнесенные по времени. В настоящее время широко используются радиотехнические системы, в которых параметры сигнала могут изменяться от импульса к импульсу. Таким образом, измерение параметров сигнала должно осуществляться по одному импульсу. Отсутствие априорной информации о форме импульса и его амплитуде и необходимость измерения параметров по одному импульсу существенно усложняют задачу измерения и ограничивают число возможных методов измерения.

Какой бы не была совершенной и точной аппаратура измерения какого-либо параметра, продуманной и адекватной методика измерения, результат всегда будет отличаться от истинного значения измеряемой величины. Отличия от истинного значения измеренной величины называют погрешностью измерения этой величины. При этом достоверным измерением можно назвать тот процесс измерения, в котором известен характер и значения погрешности. Поэтому уменьшение или исключение погрешности измерений является важнейшей задачей, которую решают при проектировании измерительной аппаратуры. Понимание процессов, которые приводят к появлению погрешности, умение классифицировать виды составляющих погрешностей,

позволяет правильно оценивать и учитывать их при измерении величин. Необходимость анализа источников возникновения погрешностей – важная задача, сопутствующая процессу измерения.

Пусть $b[\tau_{\text{изм}}]$ – смещение, $D[\tau_{\text{изм}}]$ – дисперсия оценки, тогда погрешность оценки длительности импульса есть её средний квадрат [1]:

$$M[(\tau_{\text{ист}} - \tau_{\text{изм}})^2] = D[\tau_{\text{изм}}] + \{b[\tau_{\text{изм}}]\}^2, \quad (1.1)$$

При этом случайную погрешность характеризует дисперсия оценки, а систематическую погрешность – смещение оценки.

Отсюда следует, что величина сохраняющая знак и проявляющаяся с определенной закономерностью в одних и тех же измерениях – систематическая погрешность измерения, а значит её можно учесть или исключить совсем.

Поделим выражение (1.1) на $\tau_{\text{изм}}$:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{M[(\tau_{\text{ист}} - \tau_{\text{изм}})^2]}}{\tau_{\text{ист}}}, \quad \sqrt{D[\tau_{\text{изм}}]} = \sigma_{\tau}, \quad \frac{b[\tau_{\text{изм}}]}{\tau_{\text{ист}}} = \delta \quad (1.2)$$

Тогда относительная среднеквадратическая погрешность измерения длительности будет иметь вид:

$$\varepsilon^2 = \left(\frac{\sigma_{\tau}}{\tau_{\text{ист}}} \right)^2 + \delta^2. \quad (1.3)$$

На погрешность измерения длительности радиоимпульса оказывают влияние следующие факторы. Наличие шума на входе измерительного устройства, несогласованность узлов приемника, температурный дрейф узлов, собственные шумы и искажения в линейном тракте приемника и амплитудном детекторе, погрешность измерения длительности видеоимпульса, поступающего с выхода амплитудного детектора. Борьбе с этими факторами уделяется огромное внимание при проектировании современных радиоприемных устройств [90].

Суммарную погрешность измерения длительности радиоимпульса приемником импульсных сигналов можно представить в виде:

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_{\text{ЛТП}}^2 + \varepsilon_{\text{АД}}^2 + \varepsilon_{\text{И}}^2. \quad (1.4)$$

где $\varepsilon_{\text{ЛТП}}$ – относительная среднеквадратическая погрешность измерения, обусловленная искажением формы сигнала в линейном тракте приемника;

$\varepsilon_{ад}$ – относительная среднеквадратическая погрешность измерения, обусловленная искажениями, вносимыми амплитудным детектором;

$\varepsilon_{и}$ – относительная среднеквадратическая погрешность измерения, вносимая измерителем длительности видеоимпульса.

Погрешности измерения длительности импульса, вносимые линейным трактом приемника и амплитудным детектором, обусловлены их собственными шумами и нелинейными искажениями. Характеристики линейного тракта и амплитудного детектора выбираются так, чтобы обеспечить минимальное значение вносимых погрешностей. В ряде работ [83-89,91,92] достаточно подробно рассмотрены обозначенные вопросы. При правильном проектировании линейного тракта приемника и амплитудного детектора вносимые ими погрешности оказываются несущественными по сравнению с общей погрешностью измерения. Основное влияние на погрешность измерения длительности оказывает составляющая, вносимая измерителем длительности видеоимпульса. В данной работе не рассматривалась погрешность заполнения счетными импульсами, т.к. данная погрешность может быть нивелирована выбором необходимой тактовой частоты устройства заполнения счетными импульсами и составляет не более половины одного счетного импульса. В связи с этим представляет интерес анализ систематической и случайной погрешностей измерителей длительности видеоимпульсов в сравнении с измерением длительности видеоимпульса по уровню половинной амплитуды – как эталона и оптимизация измерителя по критерию минимизации погрешностей по сравнению с эталонным измерением. В дальнейшем будет проводиться анализ именно этой составляющей погрешности.

1.2 Анализ сигналов и помех на входе устройства измерения длительности импульсов

В различных радиотехнических устройствах существуют достаточно много источников возникновения помех, но наиболее значимым источником помех, от которого невозможно избавиться является гауссовский флюктуирующий шум. Этот шум порождают тепловые шумы окружающего пространства, которые принимаются антенной системой и линейно складываются с полезным сигналом и собственными шумами приемных устройств. Эта смесь поступает на решающие устройства аппаратуры и вносит свою лепту в несовершенство аппаратуры.

Решение задачи теории помехоустойчивости для случая, когда принятым колебанием является сумма (аддитивная смесь) полезного сигнала и гауссовского шума уделено значительное место в литературе. При этом существенно усложняет задачу наличие отличных от гауссовского шума других случайных помех.

В данной работе будем исходить из того, что $s(t, \lambda)$ - полезный сигнал, который принимается совместно с аддитивным гауссовским белым шумом $n(t)$, гауссовский белый шум имеет нулевое математическое ожидание. Тогда принятый сигнал на интервале T можно записать в виде случайного процесса:

$$\xi(t) = s(t, \lambda) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Здесь белый шум $n(t)$ зависит от N – односторонней спектральной плотности шума и $\delta(x)$ – дельта-функции и имеет следующие основные характеристики:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{n(t)\} &= 0, \\ R_n(t_1, t_2) &= \mathbf{M}\{n(t_1)n(t_2)\} = \frac{N}{2} \delta(t_2 - t_1). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Узкополосный радиосигнал, выделенный линейным трактом приемника, может быть представлен в виде:

$$s(t) = u(t) \cos[\omega t + \psi(t)], \quad (1.6)$$

где $u(t)$ – функция, отображающая закон амплитудной модуляции;

$\psi(t)$ – функция, отображающая закон фазовой модуляции;

Если входным сигналом является радиоимпульс, то функция $u(t)$ характеризует огибающую радиоимпульса при этом очевидно, что $s(t)$ будет узкополосным если функции $u(t)$ и $\psi(t)$ будут меняться медленнее, чем $\cos(\omega t)$ – несущая частота сигнала. Т.е. спектр сигнала будет много меньше несущей частоты.

В общем случае функцию, описывающую огибающую радиоимпульса, можно выразить через U_m – амплитуда импульса и нормированную функцию $f(t)$, которая описывает закон изменения напряжения (тока) импульса во времени:

$$U_{\text{вх}}(t) = U_m \cdot f(t)$$

Очевидно, что $f(t)$ характеризует форму импульса.

Названия математических функций, с помощью которых в достаточном приближении можно аппроксимировать импульсы, дают названия и формам импульсов: прямоугольная, пилообразная, трапецеидальная, экспоненциальная, колоколообразная,

косинусоидальная и т. д. Эти формы принимают за стандартные и с ними сравнивают реальные импульсы.

Существуют основные параметры импульса – длительность и амплитуда и параметры характеризующие искажения их оговаривают отдельно. Например, для прямоугольного импульса – это длительность фронта и среза, выбросы или осцилляции на вершине или после импульса, неравномерность вершины.

Известно несколько систем параметров, описывающих электрические импульсы. Выбор их во многом обусловлен характером взаимодействия исследуемых импульсов с устройствами, реагирующими на них, преобразующими или регистрирующими их. В настоящее время на практике используют две системы параметров импульсов: интегральную и локальную.

Модель импульса идеальной формы [3], можно выразить через его интегральные параметры не допускающие неоднозначности его толкования и имеющие равные с измеряемыми импульсами произвольной формы значения интегральных величин S_1, S_2, \dots, S_n :

$$S_n = \int_{\tau_n} u^n(t) dt$$

В интегральной системе параметров под амплитудой и длительностью импульса произвольной формы понимают амплитуду и длительность эквивалентного прямоугольного импульса, имеющего равные с измеряемым площадь S_1 и энергию.

Важным свойством интегральных параметров является малая чувствительность к малым локальным изменениям в форме сигнала, так как значения интегралов, входящих в выражения интегральных параметров, также меняются незначительно. Например, если параллельно нагрузке генератора импульсов включить последовательный колебательный контур с малыми потерями, то форма импульса резко искажается. При этом энергия и количество электричества, переносимые импульсом, не изменяются, а следовательно, не изменяются их интегральные амплитуда и длительность.

Параметры, объединенные в систему локальных параметров, определяются в результате измерений на осциллограмме (рисунок 1.3).

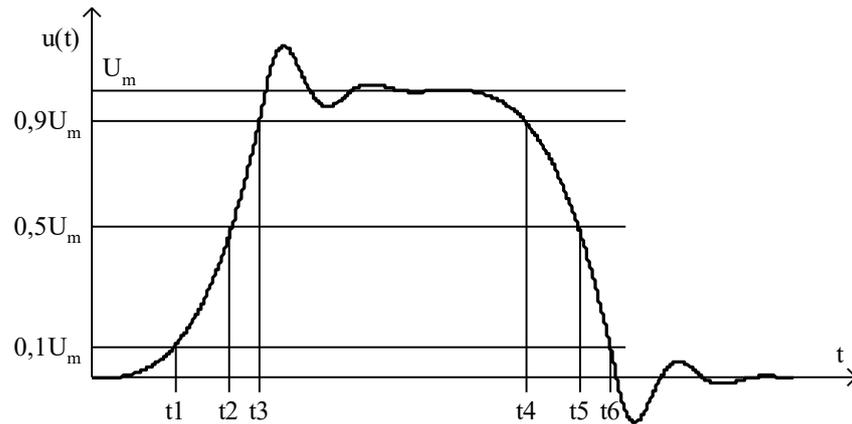


Рисунок 1.3 Осциллограмма импульса для определения его параметров.

Как видно из рисунка 1.3, временные локальные параметры импульсов определяются на уровнях, выраженных в долях амплитуды. Истинная длительность определяется по уровню половины амплитуды:

$$\tau_{ист} = t_5 - t_2.$$

Длительность фронта и длительность среза определяется относительно уровней $0,1 U_m$ и $0,9 U_m$:

$$\tau_{фр} = t_3 - t_1,$$

$$\tau_{ср} = t_6 - t_4.$$

Длительность вершины импульса определяется по уровню $0,9 U_m$:

$$\tau_{вер} = t_4 - t_3.$$

Длительность основания импульса определяется по уровню $0,1 U_m$:

$$\tau_{осн} = t_6 - t_1.$$

Так как в системе локальных параметров определения временных параметров зависят от уровня, принятого за амплитуду, то для их измерения необходимо также измерять и амплитуду импульса.

Интегральная система параметров импульсов в основном используется в цифровой осциллографии. В радиотехнических устройствах таких, как приемники импульсных сигналов, работающих с импульсными сигналами, принятыми с эфира, для описания импульсов используют локальную систему параметров, поэтому далее будет использоваться определение амплитуды и длительности из локальной системы параметров. Под истинной длительностью импульса будет пониматься длительность импульса на уровне половины амплитуды.

Рассмотрим формы импульсов, наиболее распространенные в радиотехнических системах и возможные искажения, определяемые трактом приемной системы.

Форма трапецеидального импульса представлена на рисунке 1.4. Трапецеидальный импульс описывается следующим выражением [6]:

$$U(t) = \begin{cases} \frac{U_m}{\tau_\phi} t \text{ при } 0 < t < \tau_\phi; \\ U_m \text{ при } \tau_\phi \leq t \leq \tau_{уст} + 0,5\tau_\phi - 0,5\tau_{ср}; \\ \frac{U_m}{\tau_{ср}} (\tau_{уст} + 0,5\tau_\phi + 0,5\tau_{ср} - t) \text{ при } \begin{cases} \tau_{уст} + 0,5\tau_\phi - 0,5\tau_{ср} < t, \\ t < \tau_{уст} + 0,5\tau_\phi + 0,5\tau_{ср}, \end{cases} \end{cases} \quad (1.7)$$

где U_m - амплитуда импульса;

τ_ϕ - длительность фронта;

$\tau_{ср}$ - длительность среза;

$\tau_{уст}$ - истинная длительность импульса по уровню половинной амплитуды.

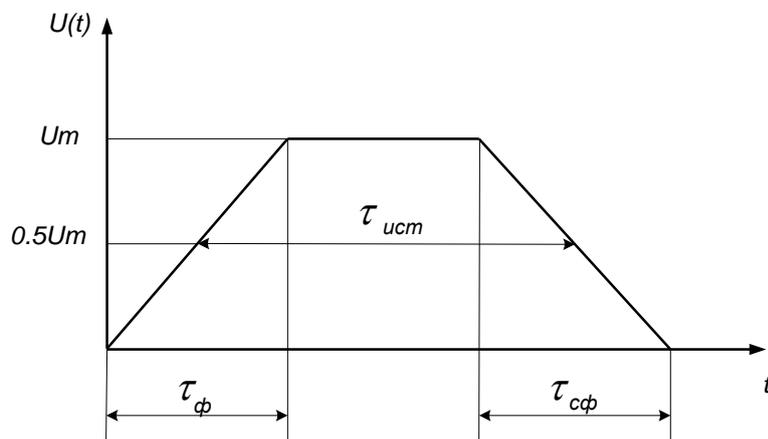


Рисунок 1.4 Форма трапецеидального импульса

Форма экспоненциального импульса представлена на рисунке 1.5. Импульсы с экспоненциальным фронтом и срезом возникают при прохождении прямоугольных импульсов через однозвенный RC – фильтр (сглаживающее звено). Экспоненциальный импульс описывается выражением [6]:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{исм}}; \\ U_m \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{исм}}}{\tau_1}\right) \right) \exp\left(-\frac{(t - \tau_{\text{исм}})}{\tau_2}\right) & \text{при } t > \tau_{\text{исм}}, \end{cases} \quad (1.8)$$

где U_m - амплитуда импульса;

τ_1 и τ_2 - постоянные времени фронта и среза импульса соответственно;

$\tau_{\text{исм}}$ - истинная длительность импульса.

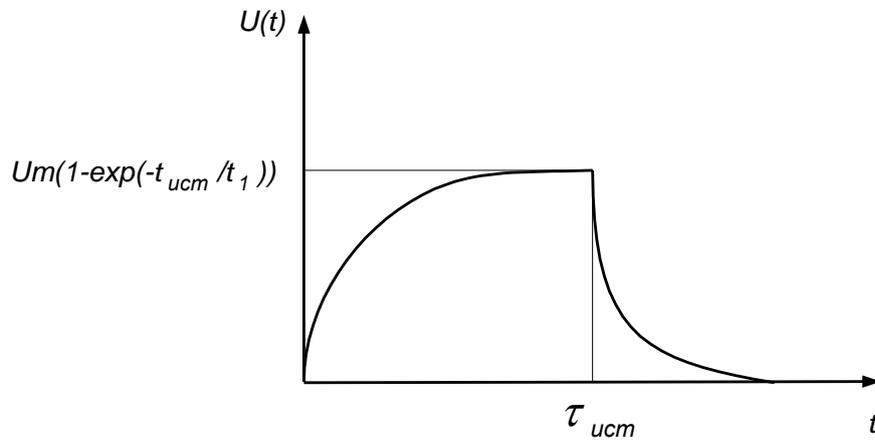


Рисунок 1.5 Форма экспоненциального импульса

Гауссовский импульс описывается выражением (1.9), он используется в качестве тестового в телевизионных измерениях и в радионавигации (рисунок 1.6) [6]

$$U(t) = U_m \exp\left(-4 \ln(2) \left(\frac{t}{\tau_{\text{исм}}}\right)^2\right), \quad (1.9)$$

где U_m - амплитуда импульса;

$\tau_{\text{исм}}$ - истинная длительность импульса.

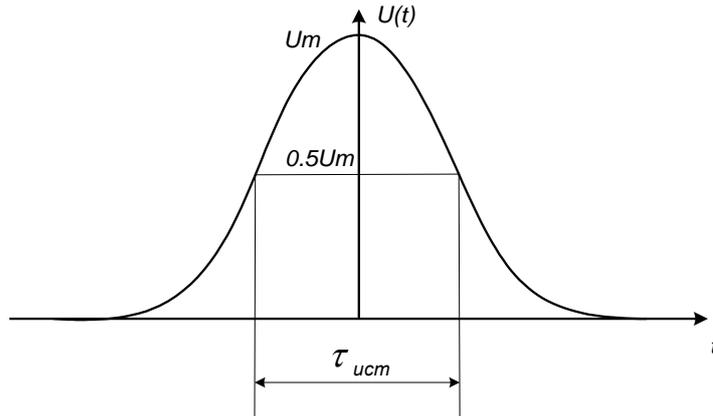


Рисунок 1.6 Форма гауссовского импульса

Форма экспоненциального импульса представлена на рисунке 1.7. Форму ряда реальных импульсов с одним максимумом удобно аппроксимировать экспоненциально-степенной функцией [10]

$$U(t) = U_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \exp \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^n, \quad (1.10)$$

где U_m - амплитуда импульса;

t_m - промежуток времени от начала импульса до ординаты максимума;

n - параметр, принимающий значения $n=1, 2, 3 \dots$

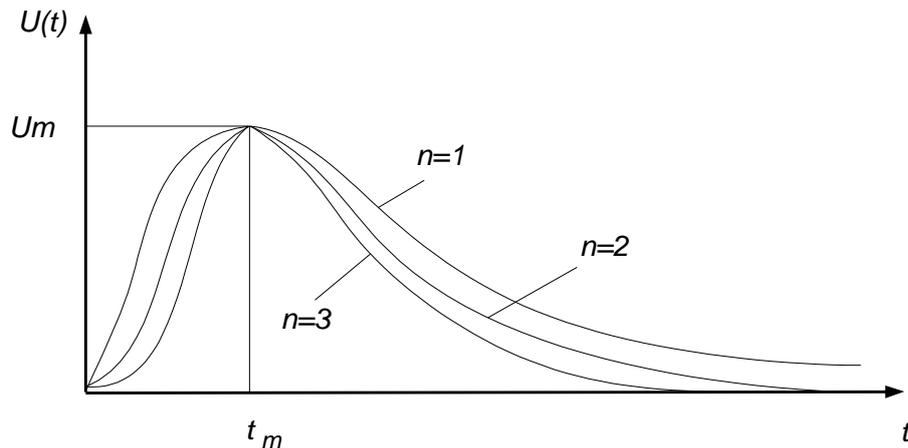


Рисунок 1.7 Форма экспоненциально-степенного импульса

Форма синусного импульса представлена на рисунке 1.8, он описывается следующим выражением [6]:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \sin\left(\frac{2\pi t}{3\tau_{\text{усм}}}\right) & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{3\tau_{\text{усм}}}{2}; \\ 0 & \text{при } t > \frac{3\tau_{\text{усм}}}{2}, \end{cases} \quad (1.11)$$

где U_m - амплитуда импульса;

$\tau_{\text{усм}}$ - истинная длительность импульса.

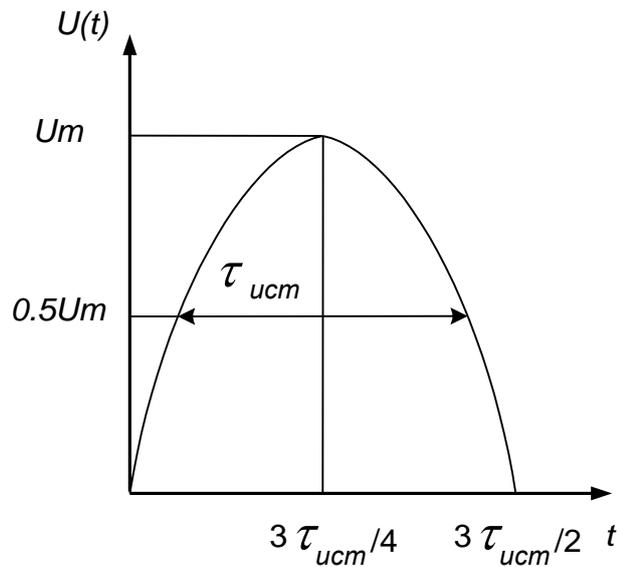


Рисунок 1.8 Форма синусного импульса

Форма синус-квадратного импульса представлена на рисунке 1.9, он описывается следующим выражением [6]:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau_{\text{усм}}}\right) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{усм}} \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{усм}}, \end{cases} \quad (1.12)$$

где U_m - амплитуда импульса;

$\tau_{\text{усм}}$ - истинная длительность импульса.

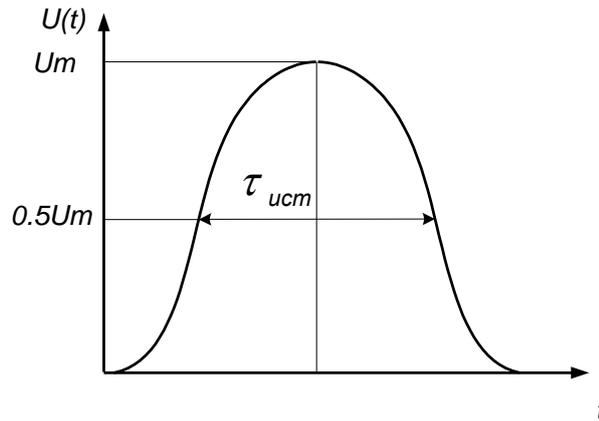


Рисунок 1.9 Форма синус-квадратного импульса

Форма импульса с провалом на вершине представлена на рисунке 1.10 [6]. Импульс описывается выражением:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \frac{3}{2\sqrt{2}} \left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau_{осн}}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi t}{\tau_{осн}}\right) \right] & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{осн}; \\ 0 & \text{при } t > \tau_{осн}, \end{cases} \quad (1.13)$$

где U_m - амплитуда импульса;

$\tau_{осн}$ - длительность основания импульса.

Провал на вершине может получиться при наличии фазовых искажений в среде распространения радиоволн, а также в случае искажения синусоиды ее третьей гармоникой при прохождении через нелинейные цепи.

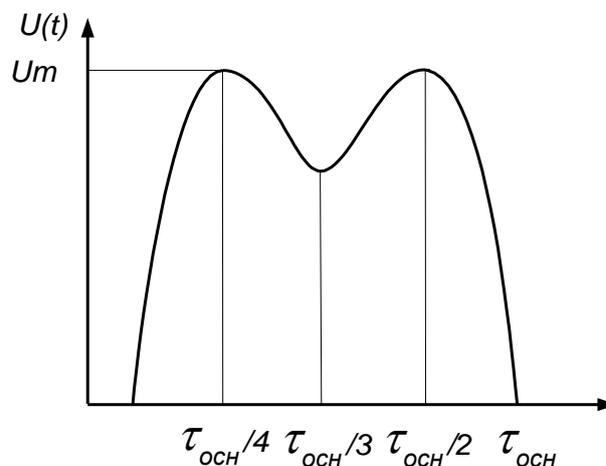


Рисунок 1.10 Форма импульса с провалом на вершине

Двухэкспоненциальный импульс [6] описывается выражением [4]:

$$U(t) = U_m \cdot K \cdot (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (1.14)$$

где U_m – амплитуда импульса;

K – нормирующий коэффициент, равный

$$K = \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \cdot \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^{\left(\frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \right)}.$$

При положительной полярности импульса $\beta_1 < \beta_2$.

Момент времени t_m , в который функция $U(t)$ принимает максимальное значение, определяется по формуле:

$$t_m = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \cdot \ln \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right).$$

Форма двухэкспоненциального импульса приведена на рисунке 1.11.

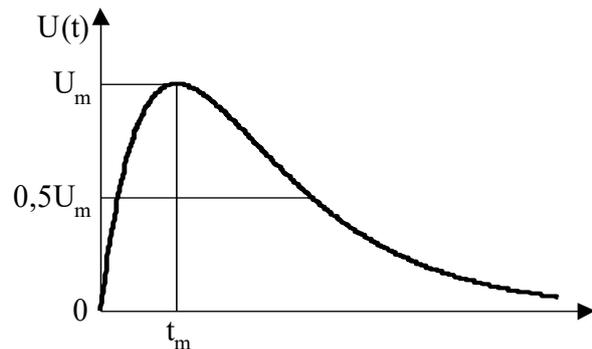


Рисунок 1.11 Форма двухэкспоненциального импульса

В радиотехнических устройствах всегда приходится иметь дело с различными видами помех, накладывающихся на полезный сигнал при прохождении атмосферы, тракта приемника, обусловленной несогласованностью входных цепей или иными причинами. Наиболее характерные искажения, вносимые в полезный сигнал, представляют из себя осцилляции, наложенные на вершину импульса и после среза импульса.

Рассмотрим импульс с осцилляциями на вершине, наложенные на трапецеидальный импульс. Форма такого импульса представлена на рисунке 5. Пусть $F(t)$ – форма импульса, U_{mm} – амплитуда импульса, t_f – длительность фронта, t_s – длительность среза, t_{ist} – истинная длительность импульса по уровню половинной амплитуды, $t_{рас}$ –

амплитуда осцилляции на вершине, $shir$ - ширина осцилляций на вершине, тогда импульс описывается следующим выражением:

$$F(t) := \begin{cases} \frac{U_{mm}}{\tau_f} t & \text{if } 0 \leq t < \tau_f \\ U_{mm} \cdot \left(1 + \frac{\sin(60\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - shir t)}{2} \right) & \text{if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ \frac{U_{mm}}{\tau_s} (\tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s - t) & \text{if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \\ U_{mm} \cdot 3000 \cdot (\cos(55\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - shir t)) & \text{if } t \geq \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases} \quad (1.15)$$

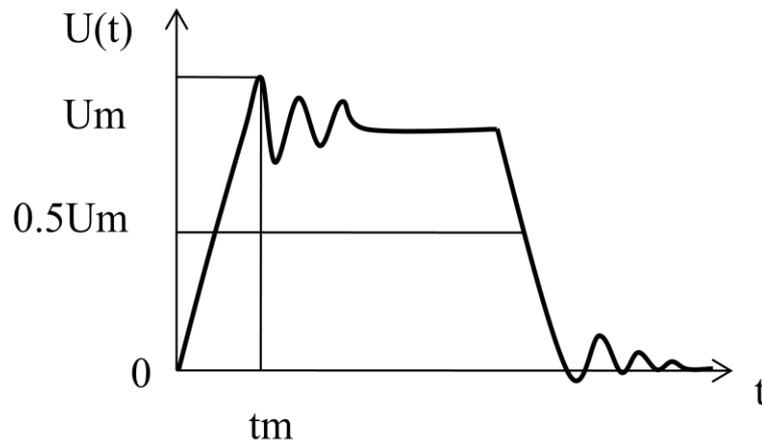


Рисунок 1.12 Форма импульса с осцилляциями на вершине и после среза

Искажения сигналов возможны как в самом устройстве из-за переходных емкостей, рассогласованности цепей, типа приемника и т.д., так и в среде распространения радиоволн. На некоторых частотах при распространении радиосигнала наблюдается значительное затухание в атмосфере, обусловленное её составом. Наибольшему затуханию подвержен сигнал на частотах примерно 23 ГГц, вызванному в основном поглощением молекулами кислорода, и на частотах, близких к 60 ГГц, где наблюдается главным образом поглощение водяными парами. Зависимость скорости распространения радиоволн от частоты может вызвать существенные фазовые искажения сигнала, что наиболее заметно проявляется при прохождении сигналов в ионосфере. Наличие фазовых искажений вызывает изменение формы сигналов (в частности, дискретных), особенно замедляя переходы от одного сигнала к другому (рисунок 1.13) [7].

При распространении радиосигналов от передатчика к приемнику, кроме прямого луча, очень часто существует второй, отраженный луч. Этот эффект распространения

называется многолучевостью. В этом случае на вход приемника действуют два сигнала, один из которых оказывается задержанным во времени по отношению к другому за счет более длинного пути распространения. Суммарный сигнал, образующийся при сложении двух сигналов с учетом их фазовых соотношений, оказывается модулированным по тому же закону, что и его составляющие, но амплитуда зависит от соотношения фаз суммируемых сигналов. Может оказаться, что приемник будет принимать сигналы отраженного радиолуча, уровень которых намного превышает уровень радиосигнала прямого луча. В результате многолучевого распространения уровень сигнала, принимаемого на подвижном объекте, может претерпевать быстрые замирания, причем максимальный уровень будет при синфазном сложении прямого и отраженного сигналов, а минимальный – при сложении в противоположных фазах. Сигналы на входах стационарных приемников также подвержены влиянию многолучевости распространения, однако параметры сигналов более стабильные во времени.

Сигналы в приемниках импульсных сигналов с логарифмическим видеоусилителем подвержены искажению фронта и среза, увеличению длительности импульсов и появлению осцилляции на вершине и после среза.

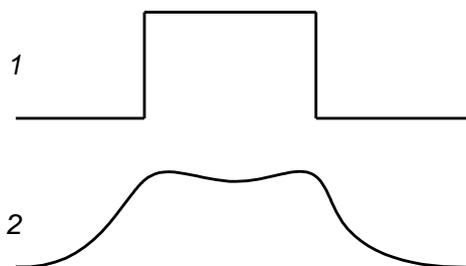


Рисунок 1.13 Искажения прямоугольного импульса, обусловленные нелинейностью фазовой характеристики линии связи:

1 – неискаженный импульс;

2 – искаженный импульс.

В общем случае искажения сигналов могут иметь следующий вид (рисунок 1.14):

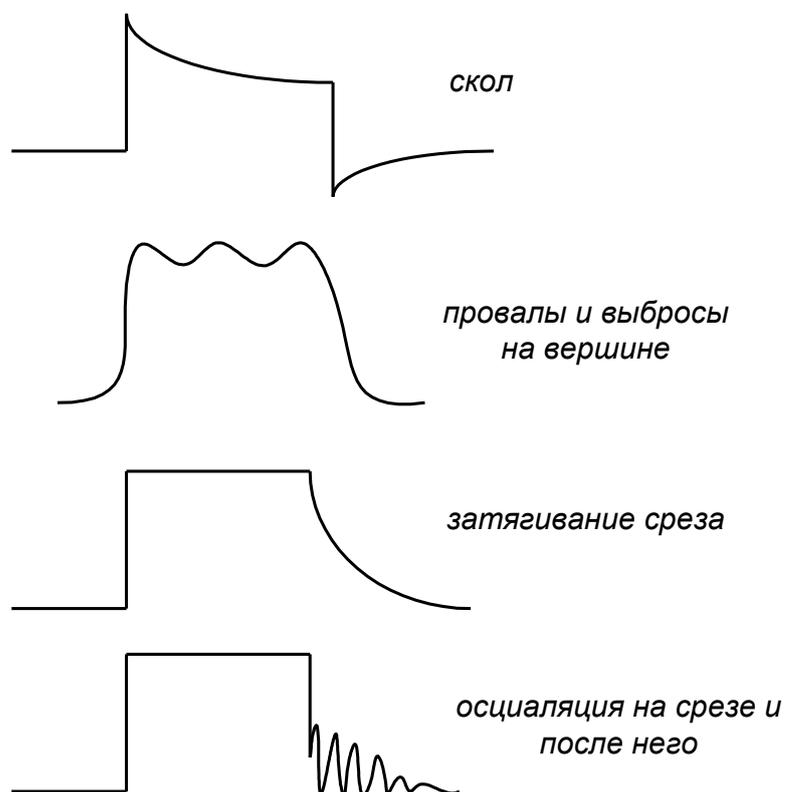


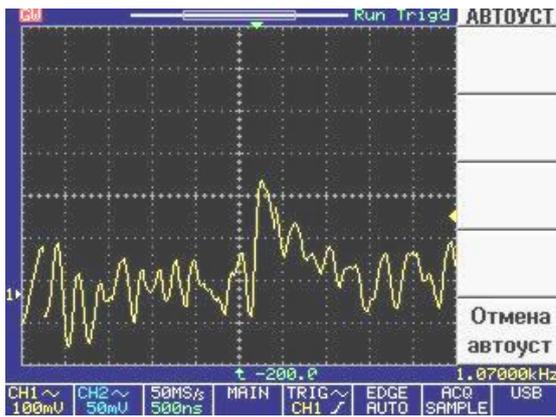
Рисунок 1.14 Наиболее часто встречающиеся искажения сигналов

1.3 Характерные искажения формы импульсов в логарифмическом приемнике

Для существенного расширения динамического диапазона и как следствие повышения потребительских качеств приемников импульсных сигналов широко используют логарифмические приемники.

В работе [29] проведено экспериментальное исследование логарифмического приемника импульсных сигналов на основе детектора типа М33402 и логарифмического видеоусилителя, построенного на микросхеме AD8309 фирмы Analog Device.

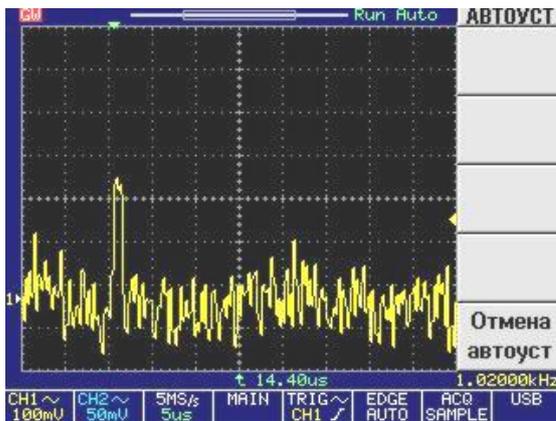
Характерные искажения формы прямоугольного импульса при прохождении через тракт логарифмического приемника импульсных сигналов приведены на рисунке 1.15 для различных значений длительности и мощности входного сигнала.



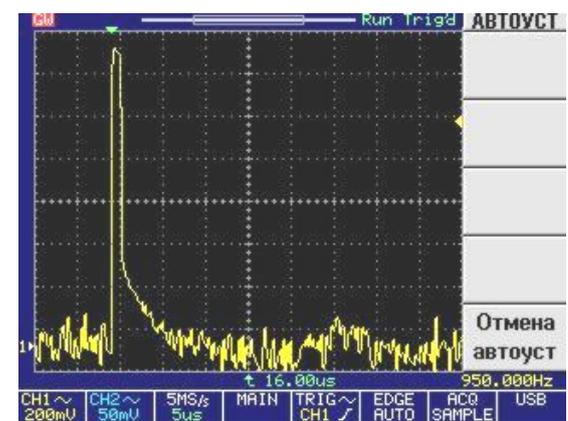
$\tau_{и} = 0,3 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -60 \text{ дБВт}$



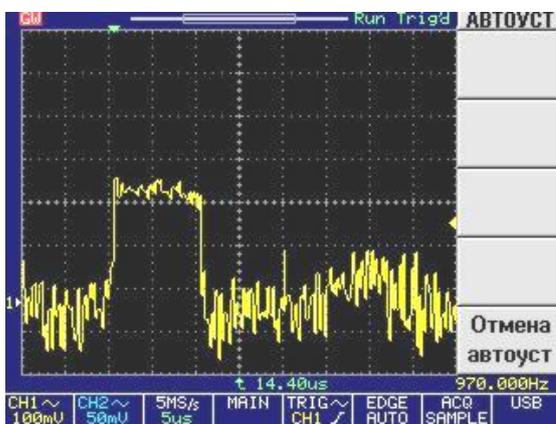
$\tau_{и} = 0,3 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -30 \text{ дБВт}$



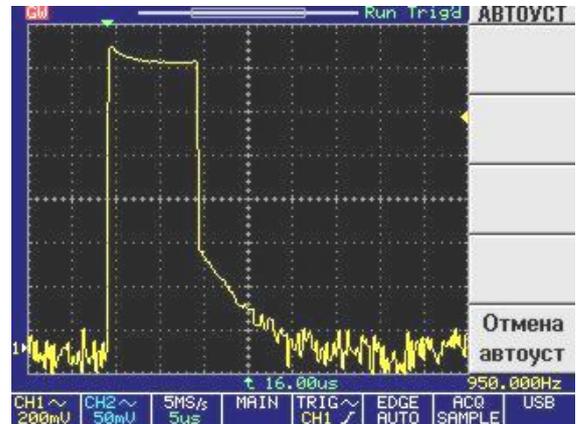
$\tau_{и} = 1 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -60 \text{ дБВт}$



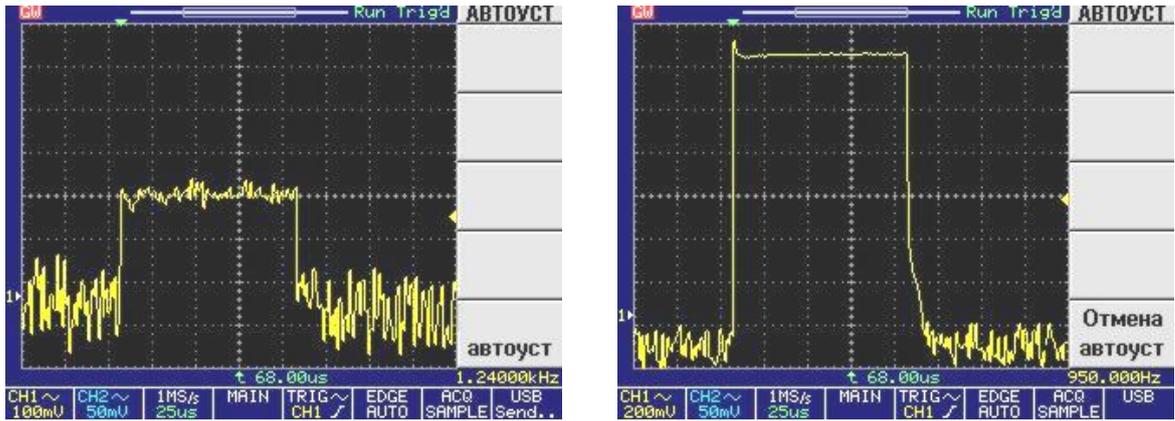
$\tau_{и} = 1 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -30 \text{ дБВт}$



$\tau_{и} = 10 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -60 \text{ дБВт}$



$\tau_{и} = 10 \text{ мкс}, P_{\text{вх}} = -30 \text{ дБВт}$



$\tau_{и} = 100$ мкс, $P_{вх} = -60$ дБВт

$\tau_{и} = 100$ мкс, $P_{вх} = -30$ дБВт

Рисунок 1.15 Эюры напряжений на выходе логарифмического приемника

На рисунке:

$\tau_{и}$ – длительность входного сигнала;

$P_{вх}$ – мощность входного сигнала.

Таким образом видно, что при прохождении импульсов через тракт логарифмического приемника длительность сигнала существенно зависит от амплитуды и длительности входного сигнала. Наибольшему искажению подвержен срез импульса, в меньшей степени вершина. Для точного измерения длительности импульсов на выходе приемника необходимо использовать характерные точки отсчета, расположенные в области вершины импульса, или несимметрично расположенные на фронте и срезе видеоимпульса.

Вопросы генерации сложных сигналов генераторах контрольных сигналов на основе различных схем построения и модулей исследовались автором в ряде работ [96,97]. Оформлена полезная модель на устройство, которое может быть использовано в качестве эталонного генератора сложных радиосигналов для проверки устройств анализа параметров сложных сигналов в широкополосных системах связи, пеленгации и пассивной радиолокации [98].

1.4 Анализ существующих методов и устройств измерения длительности

1.4.1 Общие положения

Сформулируем задачу оценки параметра сигнала при условии приема сигнала на фоне помех. Пусть принимается случайный процесс $\xi(t) = f[s(t, \mathbf{l}, \mathbf{q}), n(t)]$, на интервале

времени $[0 \leq t \leq T]$. При этом случайный процесс есть детерминированная скалярная функция от полезного сигнала $s(t, \mathbf{l}, \mathbf{q})$ и помехи $n(t)$.

Полезный сигнал $s(t, \mathbf{l}, \mathbf{q})$ является детерминированной функцией своих аргументов и в общем случае содержит кроме фиксированного числа известных параметров r неизвестных параметров $\mathbf{l}[l_1, l_2, \dots, l_p]$, подлежащих оценке, и μ неизвестных параметров $\mathbf{q}[q_1, q_2, \dots, q_\mu]$, которые не интересуют наблюдателя и в оценке которых нет необходимости. Параметры, подлежащие оценке, называют оцениваемыми (существенными) параметрами, а параметры, которые не интересуют наблюдателя, называют сопровождающими (несущественными, мешающими) параметрами. Одним из основных условий задачи оценки параметров сигнала является требование независимости оцениваемых (существенных) параметров от времени в течение интервала приема $[0, T]$.

На основе наблюдения и анализа принятой реализации $\xi(t)$ необходимо решить, какие значения принимают интересующие наблюдателя параметры $\mathbf{l}[l_1, l_2, \dots, l_p]$ в этой реализации. Другими словами, на основе обработки наблюдаемой реализации $\xi(t)$ необходимо произвести измерение, т. е. выработать оценку искомого многомерного параметра \mathbf{l} .

Оценка параметра сигнала – это некоторая определенным образом выбранная система функций (или одна функция) от наблюдаемой реализации $\xi(t)$. Значения этих функций при фиксированной реализации $\xi(t)$ оценивают (т. е. определяют заданным способом) неизвестные параметры сигнала.

В зависимости от требований, предъявляемых к процессу оценки и самим оценкам параметров, возможны разнообразные методы оценивания. При этом каждая оценка характеризуется своим показателем качества, который в большинстве случаев указывает меру близости оценки к истинному значению параметра. Показатель качества оценки, в свою очередь, определяется выбором критерия качества оценки или сокращенно критерия оценки. Поэтому, прежде чем построить оценку, нужно выбрать критерий оценки.

Выбор критерия оценки зависит от конкретной задачи, для которой используется оценка параметра сигнала. В связи с тем, что эти задачи могут значительно отличаться, не может быть единого критерия оценки и единственной оценки для данного параметра сигнала. В частности, это обстоятельство затрудняет сравнение различных оценок. Ясно,

что сравнение различных оценок возможно лишь при использовании одного и того же критерия оценки.

Задача оптимальной оценки параметра \mathbf{I} состоит в том, чтобы найти такой алгоритм определения (оценки) параметра \mathbf{I} , при котором для заданного критерия оценки эти ошибки решения (оценки) были бы минимальными. Задача построения оптимальных решающих (в соответствии с заранее выбраны критериями) оценивающих устройств (приемных и решающих) состоит в том, чтобы, оперируя определенным образом над принятыми данными, получить как можно большую (в заданном смысле) информацию об интересующих наблюдателя параметрах сигнала.

При решении задач оптимального приема ответ должен быть получен на основе предварительных (априорных) сведений о колебании, подлежащем приему, и надлежащей обработки реализации принятого колебания (наблюдаемого процесса).

Если бы наблюдатель не располагал никакими предварительными сведениями о сигнале (т. е. о его параметрах), то его нельзя было бы отличить от любой помехи. Наоборот, прием детерминированного сигнала с полностью известными параметрами не доставляет никакой информации. Носителями полезной информации могут являться только неизвестные параметры сигнала. Априорное знание статистики сигнала может быть получено на основе предварительного статистического анализа.

По сравнению лишь с некоторыми априорными сведениями о принятом колебании, знание наблюдателя об исследуемой ситуации в результате анализа принятого колебания увеличивается. Вновь сформированное знание называется апостериорным. При известных априорных плотностях вероятностей нахождение апостериорных плотностей вероятности сводится к вычислению функционала правдоподобия [2]. В том случае, когда принятое колебание представляет собой аддитивную смесь сигнала и шума и многомерные плотности вероятности шума известны, функция правдоподобия вычисляется значительно просто. В других же случаях их вычисление представляет весьма сложную задачу.

Считая, что единственным неизвестным параметром является длительность импульса, а способ комбинирования помехи и сигнала аддитивным, можно представить входной сигнал как:

$$\xi(t) = s(t, \tau) + n(t), 0 \leq t \leq T. \quad (1.16)$$

Будем полагать, что помеха $n(t)$ представляет собой реализацию стационарного нормального случайного процесса (1.5), статистические характеристики которого полностью известны. В качестве полезного сигнала будем полагать радиоимпульс (1.6).

Если прием осуществляется на фоне аддитивного гауссовского шума и полезный сигнал имеет лишь один неизвестный параметр τ , а все остальные его параметры точно известны, то наиболее существенная операция, которую необходимо выполнить над принятым колебанием $\xi(t)$ для получения апостериорной плотности вероятности параметра τ , состоит в вычислении корреляционного интеграла [2]:

$$q(\tau) = \frac{2}{N} \int_0^T [\xi(t)s(t, \tau)] dt$$

Приемник, реализующий эту операцию, был назван корреляционным. По функции $q(\tau)$, характеризующей меру взаимной корреляции между $\xi(t)$ и $s(t, \tau)$, можно однозначно найти апостериорную плотность вероятности без дополнительного обращения к принятому колебанию. Апостериорная плотность вероятности содержит все сведения, которые можно извлечь из реализации принятого колебания. В этом смысле можно сказать, что корреляционный приемник является оптимальным.

Структурная схема такого приемника приведена на рисунке 1.16. Принимаемое колебание $\xi(t)$ перемножается с полезным сигналом $s(t, \tau)$ при всевозможных значениях τ , причем τ должно находиться на интервале $[\tau_1, \tau_m]$. Результат перемножения интегрируется в течение интервала времени наблюдения T . Выходные напряжения интеграторов в отдельных каналах представляют собой величину $Nq(\tau)/2$ при конкретных значениях τ_i . Решающее устройство выдает номер канала, в котором q максимально.

В общем случае оптимальное устройство должно иметь очень большое число каналов. Число каналов зависит от требуемой точности измерения.

Пусть истинное значение параметра τ в принятой реализации $\xi(t)$ равно τ_0 . Логарифм функционала правдоподобия может быть представлен в виде [2]:

$$q(\tau) = q_s(\tau) + q_n(\tau),$$

где

$$q_s(\tau) = \frac{2}{N} \int_0^T \left[s(t, \tau_0)s(t, \tau) - \frac{1}{2}s^2(t, \tau) \right] dt,$$

$$q_n(\tau) = \frac{2}{N} \int_0^T [n(t)s(t, \tau)] dt$$

В работе [2] показано, что оценка неизвестного параметра τ по максимуму функции $q(\tau)$ при большом отношении сигнал/шум в первом приближении несмещенная с дисперсией:

$$D_{\hat{\tau}} = -1 / \left[\frac{d^2 q_s(\tau)}{d\tau^2} \right]_{\tau = \tau_0}$$

Для решения задачи оценки параметров сигналов и синтеза для этих целей оптимальных приемных устройств необходимы точные знания о характере смеси полезного сигнала и помехи, поступающей на его вход.

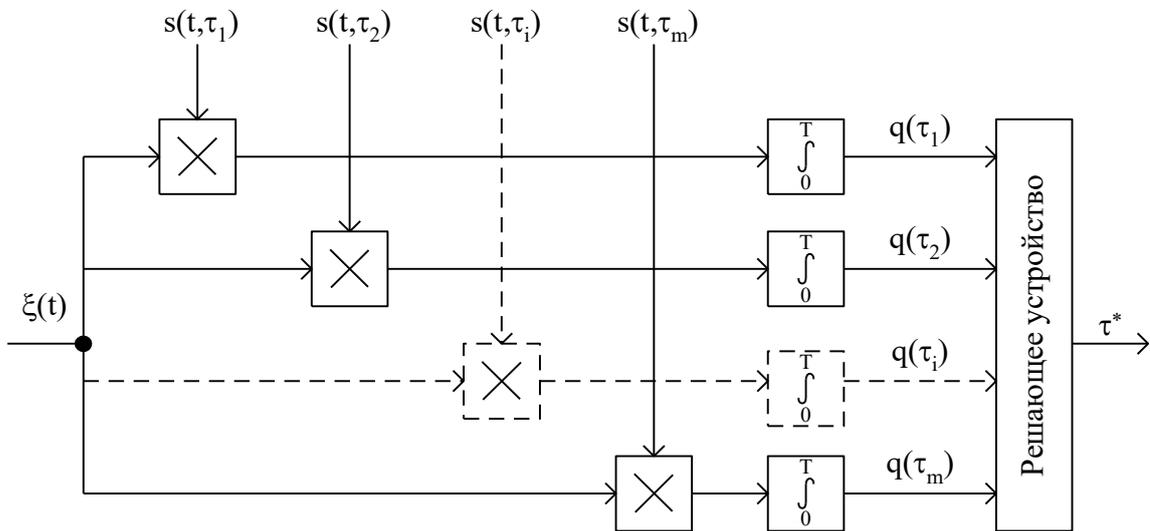


Рисунок 1.16. Структурная схема оптимального измерителя длительности импульса известной формы

На практике форма огибающей и амплитуда радиоимпульса априорно неизвестны, поэтому реализация оптимального измерителя является достаточно сложной и часто нереализуемой задачей. Это приводит к тому, что широкое распространение получили неоптимальные измерители. В связи с этим представляет интерес определение степени ухудшения качества оценок для наиболее характерных типов неоптимальных измерительных устройств.

Существуют различные методы измерения длительности видеоимпульсов, которые можно разделить по способу преобразования входного сигнала.

1.4.2 Измеритель длительности с двойным преобразованием формы

Измерение длительности импульсных сигналов, амплитуда которых может меняться в широких пределах, является сложной технической задачей, т.к. включает операцию приведения входных сигналов к форме, удобной для обработки средствами цифровой вычислительной техники. Грубое измерение длительности импульсов может производиться однопороговым устройством с фиксированным порогом. Более точными являются измерители с плавающим порогом и многопороговые измерители, нашедшие широкое применение на практике [24].

Измерители, осуществляющие двойное преобразование формы импульса, применяются для измерения импульсов с прямоугольной огибающей.

Структурная схема измерителя с двойным преобразованием формы импульса показана на рисунке 1.17.

Формирователь содержит на входе укорачивающую цепь (УЦ), многокаскадный видеоусилитель с отводами, несколько восстановителей длительности (ВД), подключенных к отводам видеоусилителя и решающее устройство, в частном случае, это могут быть двухвходовые элементы И и элемент ИЛИ. Для повышения помехоустойчивости измерителя в каждый отвод усилителя может быть включен дополнительный восстановитель длительности (ВД_n) с более высокими порогами запуска и сброса. Выводы ВД₁...ВД_n соединены со входами соответствующего элемента И.

Такая схема построения измерителя позволяет эффективно бороться с накоплением постоянной составляющей, однако, серьезный недостаток – работа только с прямоугольными импульсами.

Процесс формирования нормированных импульсов поясняется эюрами напряжений, приведенными на рисунке 1.18.

Пришедший импульс преобразуется укорачивающей цепью в биполярный сигнал, постоянная составляющая которого равна нулю. Преобразование биполярного сигнала в прямоугольный импульс осуществляется восстановителями длительности.

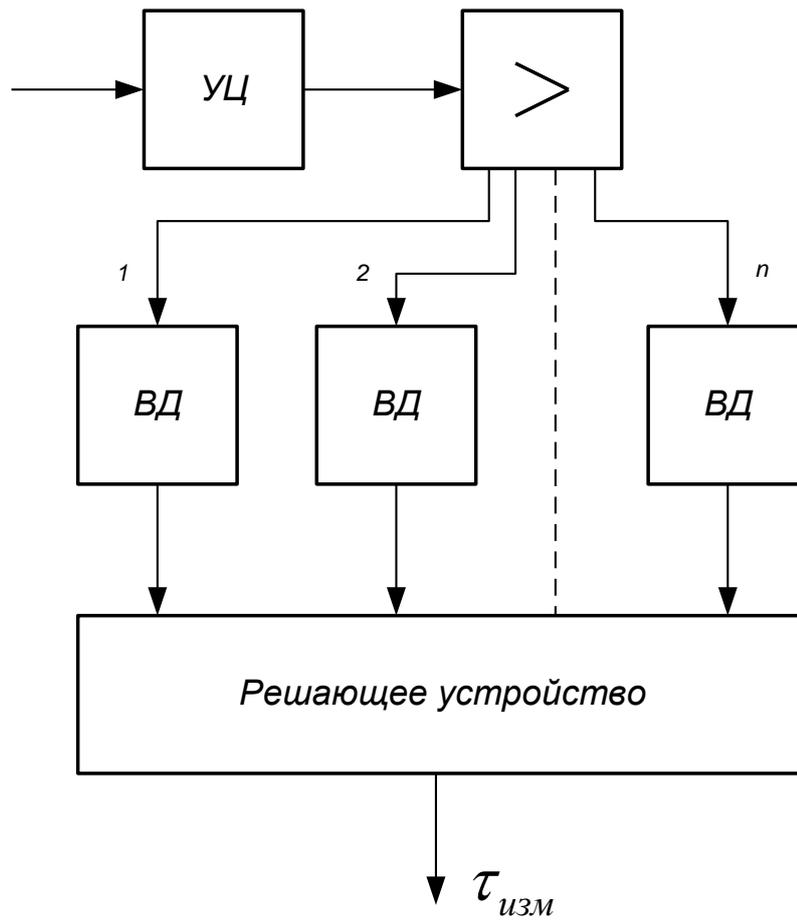


Рисунок 1.17 Структурная схема измерителя с двойным преобразованием формы импульсов

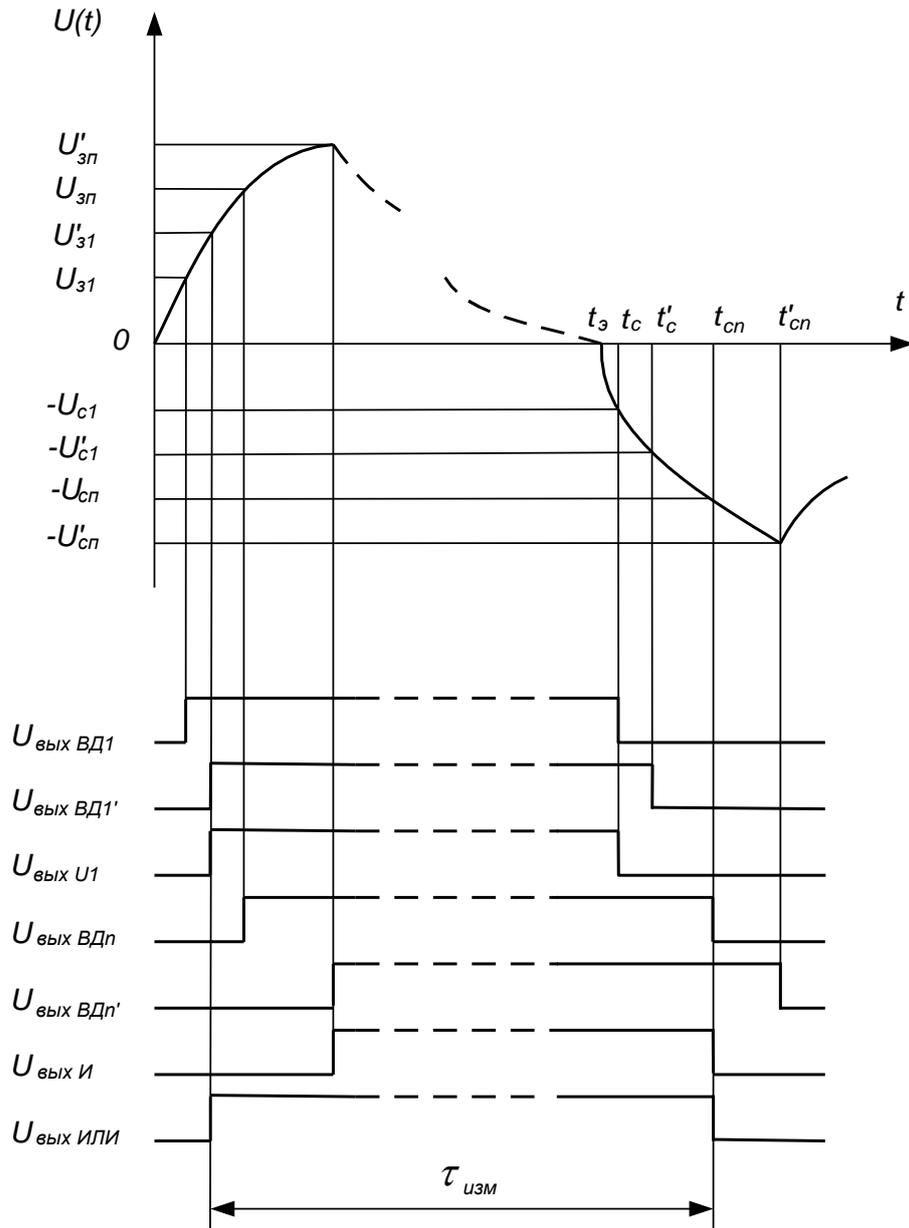


Рисунок 1.18 Эпюры напряжений

1.4.3 Измеритель длительности со следящим порогом

Другой тип измерителей – измерители длительности на основе формирователей нормированных по уровню импульсов со следящим порогом сброса. Структурная схема измерителя представлена на рисунке 1.19, эпюры напряжений приведены на рисунке 1.20. Формирователь содержит линию задержки, пиковый детектор, устройство формирования порога, формирователя нормированных импульсов и цепи обратной связи для сброса пикового детектора [25].

Такой измеритель применяется для измерения длительности импульсов, огибающие которых описываются функциями времени t , четно-симметричными относительно $t = 0$: косинусоидальные, гауссовы, треугольные, трапецеидальные, “косинус-квадрат” и др. [8]

Очевидно, что от точности формирования нормированных импульсов зависит точность измерения длительности импульса.

Точность измерения длительности импульсов при этом определяется в основном.

Пусть U_c – порог сброса формирователя, U_m – амплитуда обрабатываемого импульса, U_0 – фиксированный порог запуска формирователя, тогда алгоритм формирования нормированных импульсов определяется выражением:

$$U_c = U_m - U_0$$

Необходимое в этом случае измерение амплитуды импульса осуществляется пиковым детектором, а вычитание величины U_0 – сдвигом напряжения на входе пикового детектора на уровень минус U_0 .

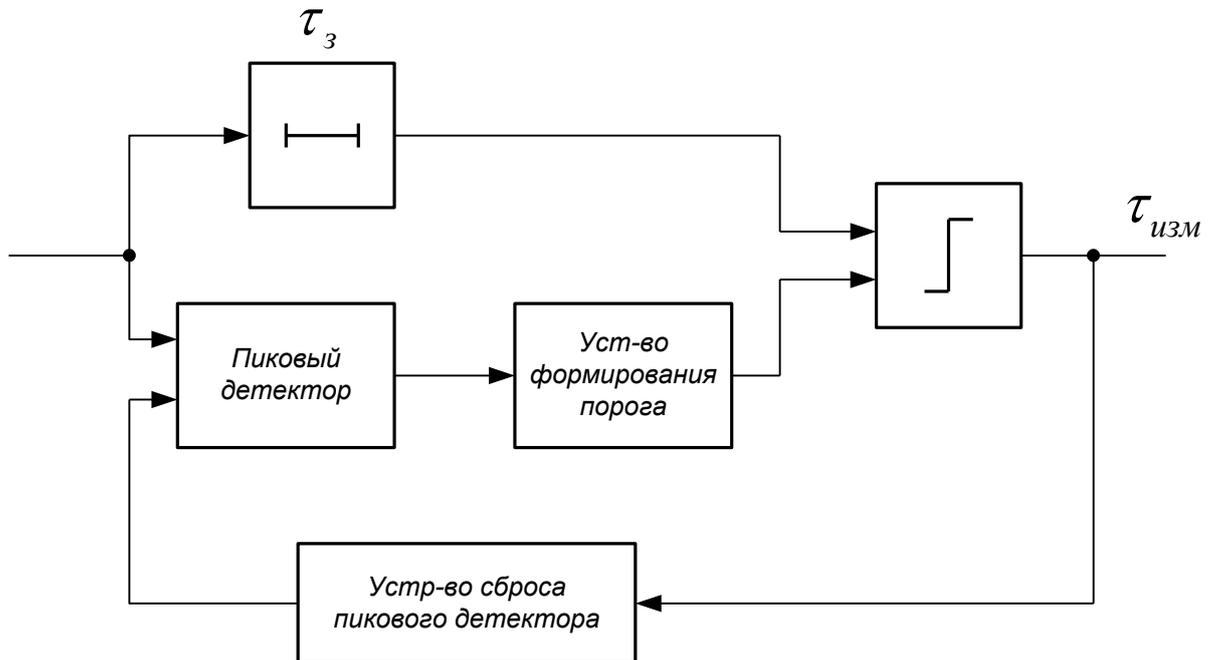


Рисунок 1.19 Структурная схема измерителя длительности прямоугольных импульсов по методу следящего порога

Недостатки устройства: сложность создания линии задержки с большим τ_z и неспособность правильно измерить длительность, в случае, если за время τ_z поступят два импульса различающиеся больше, чем на $U_m/2$.

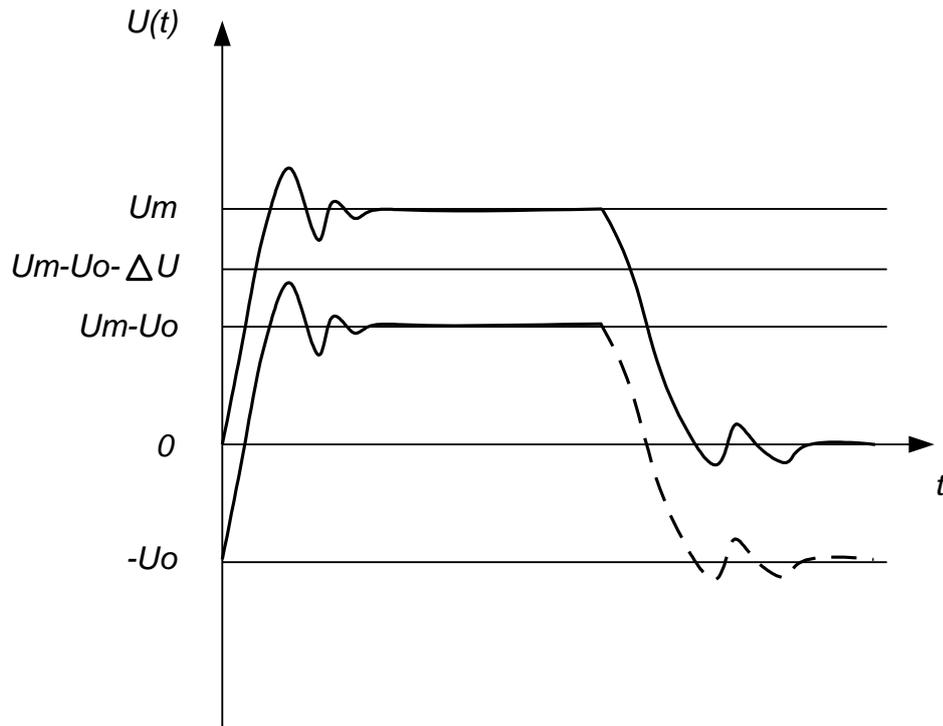


Рисунок 1.20 Эпюры напряжений

1.4.4 Многопороговые измерители

Широкий динамический диапазон входных сигналов при отличии их формы от прямоугольной является причиной амплитудных ошибок, возникающих в процессе усиления исследуемых сигналов и формирования прямоугольных импульсов нормированного уровня. Для уменьшения этих ошибок применяют различные технические приемы.

Один из таких приемов основан на квантовании входного динамического диапазона с помощью пороговых устройств (ПУ), включенных в отводы видеоусилителя или АЦП.

Проведённый патентный поиск и анализ устройств измерителей длительности показал эффективность применения алгоритмов с различными вариантами формирования фронтов и срезов измеряемых импульсов [32].

В многопороговом измерителе входной импульс поступает на входы нескольких пороговых устройств. При превышении входным импульсом i -го порогового уровня на выходе соответствующего порогового устройства формируется импульс с нормированной амплитудой. Чем больше амплитуда входного импульса, тем большее число пороговых устройств сработает.

Выразим уровень i -го порога через U_0 – уровень самого чувствительного порога и N - шаг квантования амплитуды:

$$U_i = U_0 N^i \quad (1.17)$$

В многопороговом измерителе уровни квантования обычно выбираются равномерно в логарифмическом масштабе

Измеренная длительность импульса равна

$$\tau_{изм} = t_{кизм} - t_{низм}.$$

В общем виде, момент $t_{низм}$ является моментом срабатывания порога, выбранного в качестве формирователя фронта импульса. Момент $t_{кизм}$ является моментом срабатывания порога, выбранного в качестве формирователя среза импульса. Временные ворота, образованные $t_{низм}$ и $t_{кизм}$ заполняются счетными импульсами (рисунок 1.21) или служат в качестве формирователей временных ворот заполненных счетными импульсами (рисунок 1.20).

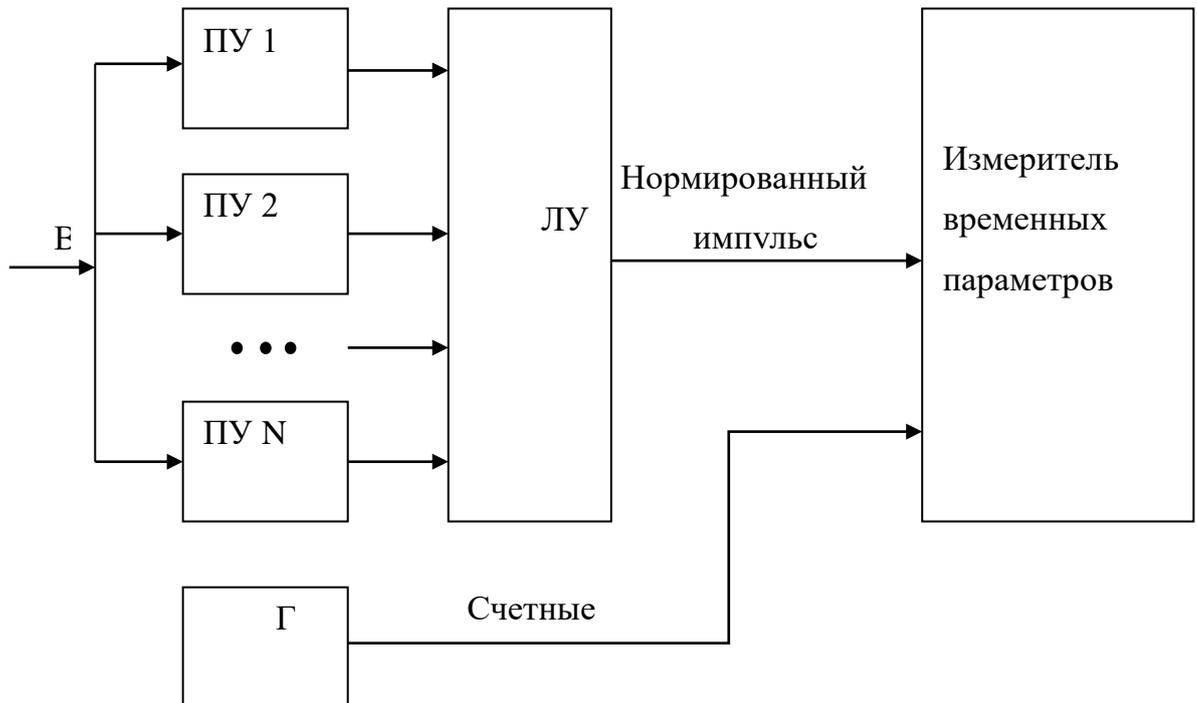


Рисунок 1.21 Структурная схема многопорогового измерителя с формированием длительности нормированного импульса, на рисунке:

ПУ 1 – первое пороговое устройство;

ПУ 2 – второе пороговое устройство;

ПУ N – N пороговое устройство;

ЛУ – логическое устройство;

Г – генератор импульсов.

Входной сигнал поступает на N пороговых устройств, расположенных равномерно в логарифмическом масштабе по динамическому диапазону измерителя. Пороговые устройства формируют отклики по фронту и срезу импульса. Логическое устройство по заложенной схеме выбирает необходимые фронт и срез импульса, формируя тем самым нормированный импульс. Нормированный импульс попадает на вход измерителя длительности, где заполняется счетными импульсами, количество которых определяет искомую длительность. Точность измерения таких измерителей в основном определяется точностью формирования нормированных импульсов.

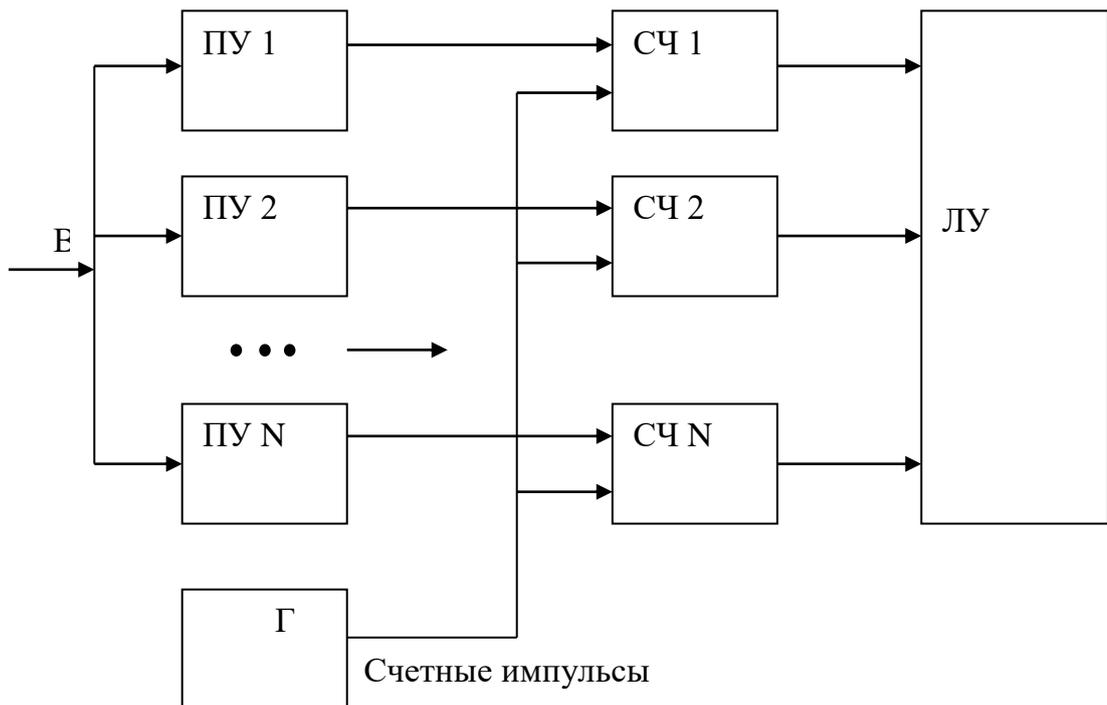


Рисунок 1.22 Структурная схема многопорогового измерителя с измерением длительности по каждому порогу, на рисунке:

ПУ 1 – первое пороговое устройство;

ПУ 2 – второе пороговое устройство;

ПУ N – N пороговое устройство;

СЧ 1, СЧ 2, СЧ N – счетчики импульсов;

ЛУ – логическое устройство;

Г – генератор импульсов.

Многопороговый измеритель с измерением длительности по нескольким уровням, приведенный на рисунке 1.22, работает следующим образом. Измеряемый импульс поступает на входы N пороговых устройств. При превышении входным импульсом уровня срабатывания i -го порогового устройства U_i на его выходе формируется импульс с нормированной амплитудой. Длительность нормированного импульса равна длительности на уровне U_i . Нормированные импульсы поступают на входы измерителей временных интервалов, на выходе которых формируются цифровые коды, соответствующие длительности нормированных импульсов. С выходов измерителей временных интервалов цифровые коды поступают на вход логического устройства, которое по заданному алгоритму формирует цифровой код, соответствующий длительности входного импульса.

Широкое распространение на практике получили многопороговые измерители длительности.

Один из вариантов многопорогового измерителя - измеритель длительности с формированием фронта нормированного импульса по срабатыванию самого чувствительного порога, а среза – по отпусканию верхнего из сработавших порогов, (Измеритель 1). Такой алгоритм формирования наиболее пригоден для измерения длительности импульсов симметричной формы. Недостатком такого метода формирования нормированного импульса является то, что наличие даже небольших выбросов на вершине импульса может привести к значительной погрешности в формировании нормированного импульса. Менее чувствительным к выбросам на вершине импульса является алгоритм измерения длительности с формированием фронта нормированного импульса по самому чувствительному порогу, а среза – по отпусканию второго сверху из сработавших (Измеритель 2). Однако, ошибка измерения будет возрастать при измерении длительности импульсов с затянутым срезом.

Использование алгоритма измерения длительности с формированием нормированного импульса по первому порогу ниже уровня половины амплитуды и первого порога выше уровня половины амплитуды (Измеритель 3), либо при усреднении длительностей, полученных при формировании нормированного импульса

по самому чувствительному порогу и по самому грубому (Измеритель 4) позволяет уменьшить ошибку измерения длительности импульсов с затянутым срезом.

Представленные измерители длительности видеоимпульсов не охватывает все возможные методы, но включает в себя основные из них, применяющиеся при радиотехнических измерениях, и наиболее адекватно отражают поставленную задачу.

Анализ методов измерения показывает, что для задач измерения длительности импульсов в приемниках импульсных сигналов наиболее целесообразно использовать многопороговые измерители. В связи с этим представляет интерес анализ характеристик многопороговых измерителей и сравнение их с оптимальными измерителями.

1.5 Методика проектирования многопороговых измерителей длительности и оценка их эффективности

При проектировании многопороговых измерителей необходимо учитывать следующие параметры:

- чувствительность;
- динамический диапазон;
- минимальная и максимальная длительности измеряемых импульсов;
- допустимая погрешность измерения;
- уровень шума на входе измерителя.

Исходя из этого, необходимо определить:

- шаг квантования;
- число пороговых устройств;
- уровни порогов;
- систематическую погрешность измерения длительности импульса, вызванную методом измерения;
- случайную погрешность измерения длительности импульса, вызванную наличием шума на входе измерителя;
- синтезировать логическое устройство, реализующее выбранный метод.

После синтеза логического устройства необходимо рассчитать погрешности измерения длительности импульсов при работе по разным типам импульсов, в случае получения неудовлетворительных результатов оптимизации подвергается шаг квантования, число пороговых устройств, уровни порогов и алгоритм формирования

импульса с нормированной длительностью. На данном этапе можно оценить, чем вызваны ошибки измерения, неправильным подбором указанных выше параметров или непосредственно методом измерения, после чего необходимо подвергнуть изменению синтезированное логическое устройство, либо выдать рекомендации по использованию того или иного типа измерителя длительности для работы по конкретным формам импульсов.

1.6 Выводы

Приемники импульсных сигналов, зачастую работающие в широком динамическом диапазоне, в сложной электромагнитной обстановке и при отсутствии априорной информации о форме импульса, наиболее целесообразно использовать многопороговые измерители длительности. В связи с этим представляет интерес анализ характеристик и оптимизация алгоритмов этих измерителей, которые будут проводиться в последующих главах.

Проведенный анализ сигналов показывает, что наиболее распространенными типами импульсов, встречающихся на практике, являются:

- 1) трапецеидальный;
- 2) экспоненциальный;
- 3) гауссовский;
- 4) экспоненциально-степенной;
- 5) синусный;
- 6) синус-квадратный;
- 7) импульс с провалом на вершине;
- 8) двухэкспоненциальный;
- 9) импульс с осцилляциями на вершине и после среза.

Модели этих импульсов будут использоваться для расчета систематической и случайной погрешностей измерения длительности импульсов.

Проведенный анализ помех на входе измерителя длительности показал, что нормальный шум, обусловленный естественными причинами (тепловые и другие шумы окружающего пространства и собственные шумы радиоприемных устройств) является наиболее общим для приемных устройств. Поэтому при дальнейшем анализе в качестве

помехи будет рассматриваться нормальный шум с нулевым математическим ожиданием, который аддитивно суммируется с полезным сигналом.

Экспериментально показано, что наибольшему искажению подвержен срез импульса, в меньшей степени его вершина, для повышения точности измерения длительности импульсов необходимо использовать характерные точки срабатывания порогов ближе к вершине или несимметрично расположенные на фронте и срезе импульса.

Предложена методика проектирования многопороговых измерителей длительности, которая будет использована при исследовании измерителей в следующих главах.

Основные результаты данной главы опубликованы [29,32,83-92].

2 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО НИЖНЕМУ И ПЕРВОМУ СВЕРХУ ИЗ ОТПУСТИВШИХ ПОРОГОВ

2.1 Анализ алгоритма формирования нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов многопорогового измерителя длительности

Для измерения длительности импульсов в различных приемных радиотехнических системах широко применяют многопороговые измерители длительности, в которых измерение длительности происходит путем заполнения счетными импульсами сформированного по определенному алгоритму нормированного импульса. Рассмотрим измеритель, в котором фронт нормированного импульса формируется при срабатывании самого чувствительного порога, срез – при отпуске первого сверху из сработавших. Отличительной особенностью данного измерителя является возможность работы в большом динамическом диапазоне, в сложной электромагнитной обстановке и при отсутствии априорной информации о форме импульса. Данный измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов и исключает ошибку измерения в случае затянутого среза измеряемого импульса.

Структурная схема многопорогового измерителя длительности приведена на рисунке 2.1. На рисунке приняты следующие обозначения: ПУ 1, ПУ 2... ПУ N – пороговые устройства; Тр 1, Тр2 ... ТрN – триггеры; ЛУ – логическое устройство; ИД – измеритель длительности; НИ – нормированный импульс; Г – генератор счетных импульсов; СЧ – счетные импульсы.

Измеритель работает следующим образом: измеряемый импульс поступает на вход измерителя длительности и далее на все пороговые устройства. Уровни срабатывания пороговых устройств расположены в логарифмическом масштабе по динамическому диапазону измерителя. В зависимости от формы и амплитуды импульса срабатывает определенное количество ПУ, триггеры формируют временные ворота, соответствующие длительности входного импульса по уровню ПУ. Отклики от триггеров поступают на вход логического устройства, где формируется нормированный импульс согласно выбранному методу. Нормированный импульс попадает на измеритель длительности, где заполняется счетными импульсами и производится их подсчет. Современные методы проектирования цифровых схем позволяют большую

часть измерителя реализовать с применением программируемых логических интегральных схем, как показано на рисунке 2.1. Раскрывать схемы измерителя длительности и логического устройства, выполненные на основе тривиальных логических функций, не целесообразно, поскольку зачастую разработка проектов ПЛИС ведется не объектно-графическим методом, а с применением языков высокого уровня Verilog, AHDL, VHDL.

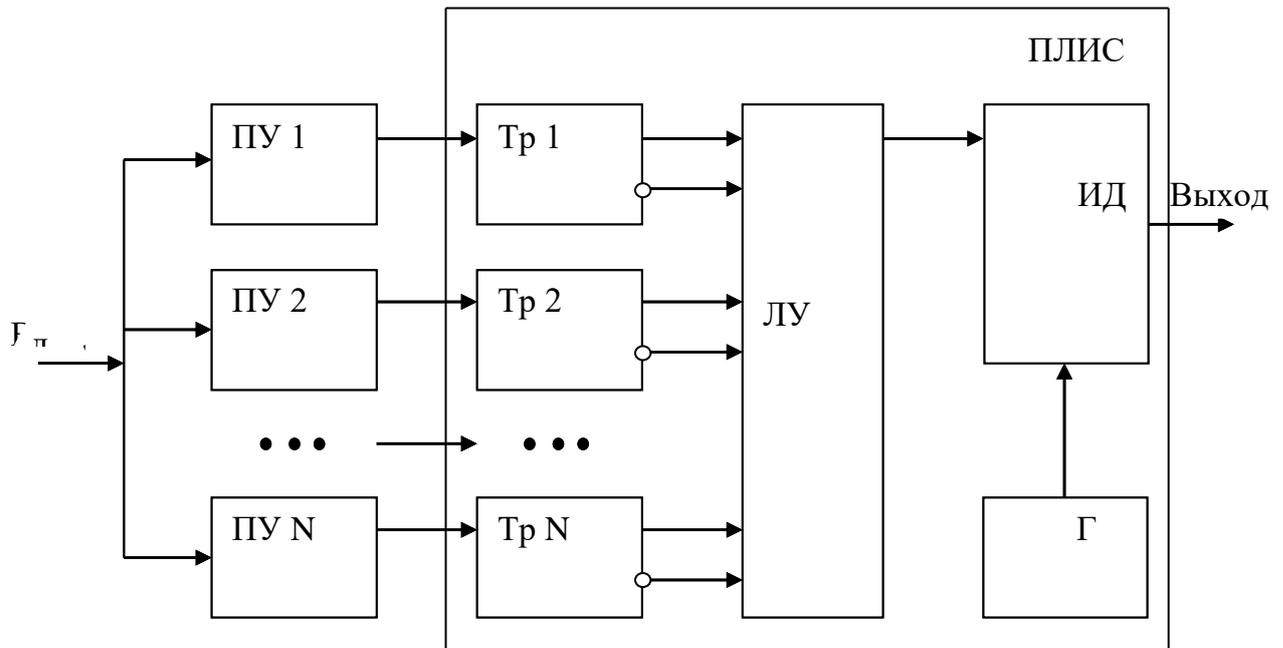


Рисунок 2.1 Структурная схема многопорогового измерителя длительности с возможностью изменения алгоритма формирования нормированного импульса,

Эпюры напряжений при измерении длительности данным методом приведены на рисунке 2.2

На рисунке 2.2.а показан измеряемый импульс и характерные точки формирования фронта и среза нормированного импульса. На рисунках 2.2.б-2.2.е показаны сформированные импульсы по каждому порогу. На рисунке 2.2.ж – искомый нормированный импульс.

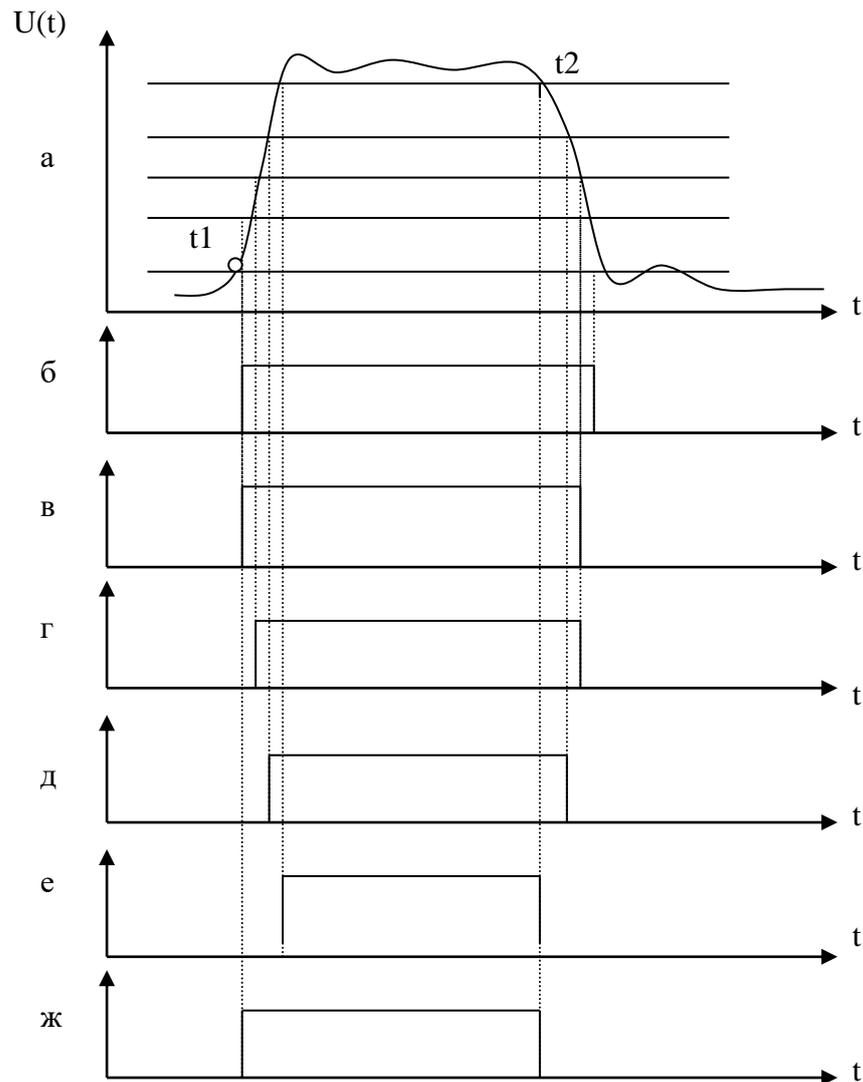


Рисунок 2.2 Эпюры напряжений.

Пусть U_0 – уровень самого чувствительного порога, N – шаг квантования амплитуды, тогда уровень i -го порога определяется по формуле

$$U_i = U_0 \cdot N^i, \quad (2.1)$$

Моменты срабатывания и отпускания порога с уровнем $U_{пор}$, при поступлении на вход порогового устройства сигнала $U_{вх}(t)$ можно записать:

$$U_{вх}(t) = U_{пор} \cdot \quad (2.2)$$

Номер первого сверху из сработавших порогов при амплитуде входного сигнала U_m будет равен:

$$k = \text{floor} \left(\log_N \left(\frac{U_m}{U_0} \right) \right),$$

В выражении $\text{floor}(x)$ – функция выделения целой части из числа x .

Амплитуда срабатывания первого порога будет равна:

$$U_k = U_0 \cdot N^{\text{floor}\left(\log_N\left(\frac{U_m}{U_0}\right)\right)} \quad (2.3)$$

Измеренная длительность импульса равна

$$\tau_{\text{изм}} = t_{\text{кизм}} - t_{\text{низм}}, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{низм}}$ – момент времени срабатывания самого чувствительного порога;

$t_{\text{кизм}}$ – момент времени отпускания первого сверху из сработавших порогов.

Для нахождения измеренной длительности импульса из уравнений

$$U_{\text{вх}}(t) = U_0 \quad (2.5)$$

$$U_{\text{вх}}(t) = U_k, \quad (2.6)$$

необходимо найти моменты срабатывания самого чувствительного порога и момент отпускания первого сверху порога.

Наличие шумов и искажений в тракте аппаратуры измерения обуславливает то, что сформированный нормированный импульс будет всегда отличается от истинной длительности импульса. При этом разница между измерением, проведенным реальной аппаратурой и измерением по уровню половинной амплитуды, как истинным измерением, будет определять систематическую погрешность измерения длительности данным измерителем. Влияние шума будет сказываться в смещении моментов срабатывания и отпускания пороговых устройств. Если измерение длительности нормированного импульса осуществляется методом дискретного счета, то в суммарную погрешность измерения длительности импульса будет также входить погрешность, вносимая этим методом.

Таким образом, полная погрешность измерения длительности видеоимпульса многопороговым измерителем с формированием нормированного импульса будет иметь следующие составляющие:

- систематическая погрешность формирования нормированного импульса;
- случайная погрешность формирования нормированного импульса, вызванная наличием шума на входе пороговых устройств;
- погрешность измерения длительности нормированного импульса методом дискретного счета.

Погрешность измерения временных интервалов методом дискретного счета и методы ее учета и минимизации детально рассмотрены в [11]. Исследованию погрешности формирования нормированного импульса посвящены работы [26, 27, 28, 33-45]. В них рассмотрены погрешности формирования нормированных импульсов для ряда форм импульсов и разных форм фронта и среза. В связи с этим представляет интерес анализ систематической и случайной погрешностей формирования длительности нормированного импульса для импульсов, указанных в первой главе, а также получение для них аналитических выражений в общем виде.

Проведем расчет систематической и случайной погрешностей для девяти типов импульсов: трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного импульсов, импульса с провалом на вершине, двухэкспоненциального импульса и импульса с осцилляциями на вершине.

2.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов

2.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса [33]

Здесь и далее под истинной длительностью импульса τ_{ist} будем понимать длительность по уровню половины амплитудного значения U_m . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения длительности трапецеидального импульса определяется формулой

$$\delta = \frac{\tau_{izm} - \tau_{ist}}{\tau_{ist}} = \frac{\tau_{izm}}{\tau_{ist}} - 1, \quad (2.9)$$

Пусть на вход измерителя поступает трапецеидальный импульс, соответственно с длительностями фронта τ_f и среза τ_s (рисунок 2.3), описываемый функцией (1.7).

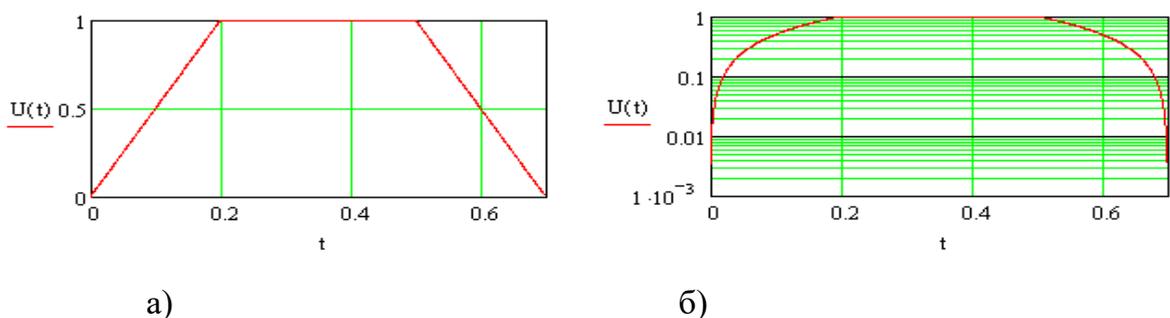


Рисунок 2.3 Форма трапецеидального импульса: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставив в (2.5) уравнение (1.1) находим уровень самого чувствительного порога:

$$U_0 = \frac{U_m(t)}{\tau_f} t_1, \quad (2.10)$$

Подставим в (2.6) уравнение (1.1):

$$U_k(t) = \frac{U_m(t)}{\tau_s} (\tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s - t_2) \quad (2.11)$$

Решим уравнения (2.10), (2.11) относительно t :

$$t_{\text{низм}} = \frac{U_0}{U_m(t)} \tau_f,$$

$$t_{\text{кизм}} = 0.5 \left(\frac{-2 U_k(t) \tau_s + 2 U_m(t) \tau_{ist} + U_m(t) \tau_f + U_m(t) \tau_s}{U_m(t)} \right),$$

Тогда

$$\tau_{izm} = t_{\text{кизм}} - t_{\text{низм}} \quad (2.12)$$

Подставляя (2.12) в (2.9), получим выражение для систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(U_m) = -\tau_f \frac{2U_0 - U_k}{-2U_k \cdot \tau_s + 2U_m \cdot \tau_{ist} + U_m \cdot \tau_s - U_k \cdot \tau_f} \quad (2.13)$$

где напряжение U_0 определяется выражением (2.3).

Следовательно систематическая погрешность формирования для трапецеидального импульса зависит от шага квантования и отношения амплитуды импульса к уровню самого нижнего порога.

На рисунке 2.4 и рисунке 2.5 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

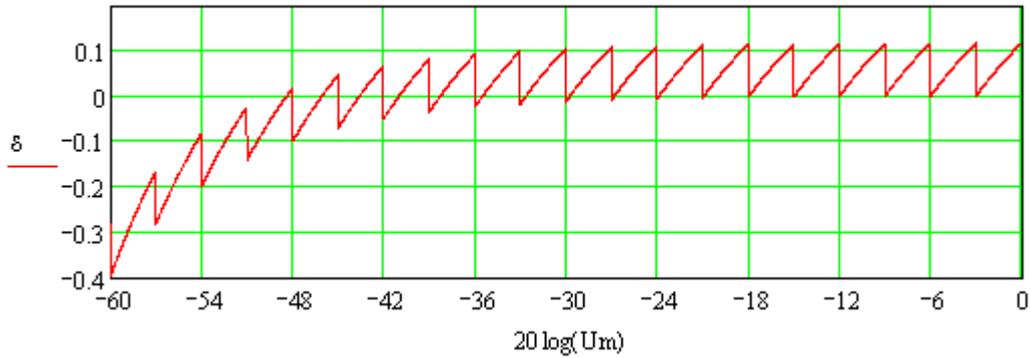


Рисунок 2.4 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

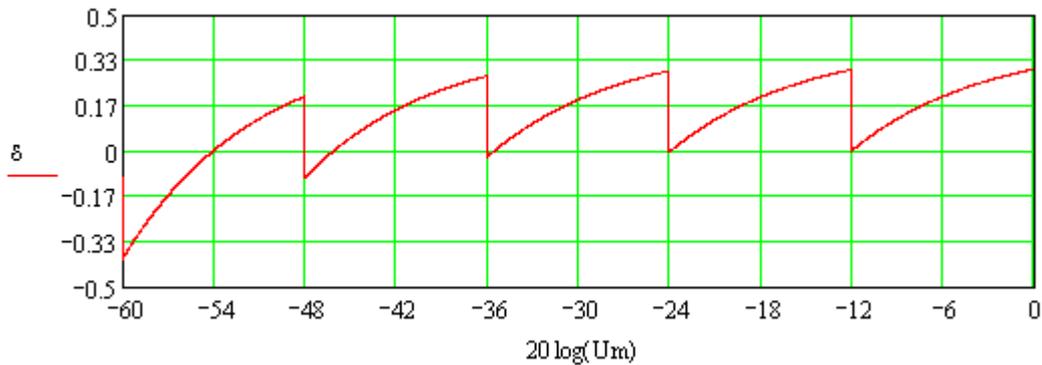


Рисунок 2.5 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциальный импульс (рисунок 2.6), описываемый функцией (1.8). Истинная длительность экспоненциального импульса по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

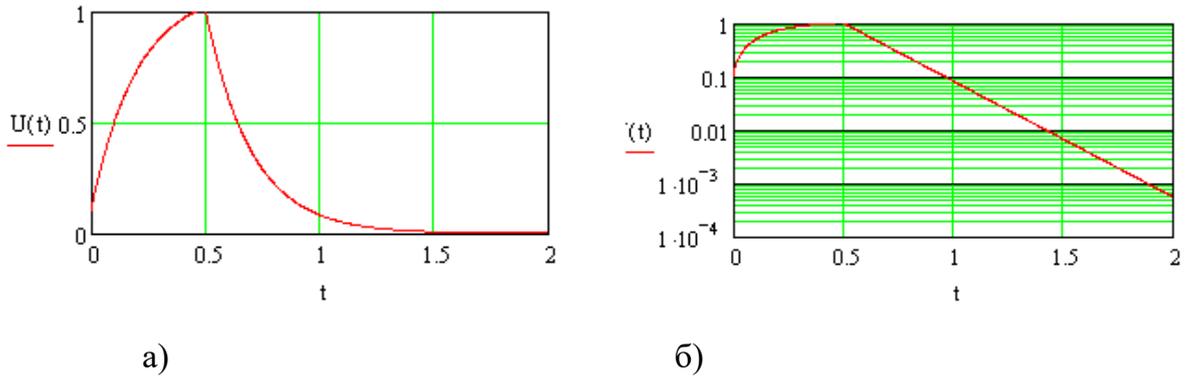


Рисунок 2.6 Форма экспоненциального импульса: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.14), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \cdot \left(1.1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right);$$

$$U_k = U_m \cdot \left(1.1 - \exp\left(\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}\right) \right) \cdot \exp\left(\frac{-(t-\tau_{ist})}{\tau_2}\right).$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпущения первого сверху порога $t_{\text{кнзм}}$:

$$t_{\text{низм}} = -\ln\left(-\frac{10U_0 - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1$$

$$t_{\text{кнзм}} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2$$

Из приведенного уравнения определяем измеренную длительность импульса

$$\tau_{izm} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 + \ln\left(-\frac{10U_0 - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1$$

Систематическая погрешность измерения длительности экспоненциального импульса будет равна:

$$\delta(U_m) = 1 - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \frac{\tau_2}{\tau_{ist}} + \ln\left(-\frac{10U_0 - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{ist}} - 1$$

Графики зависимости систематической погрешности формирования длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ приведены на рисунках 2.7, 2.8

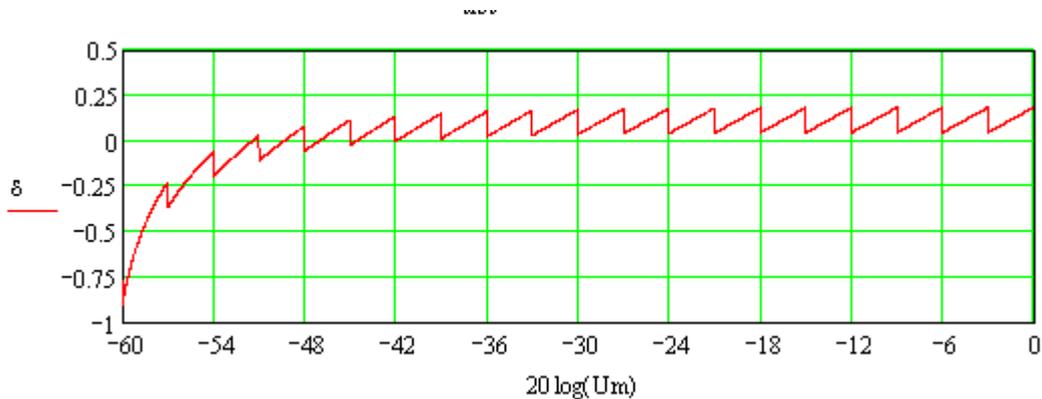


Рисунок 2.7 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

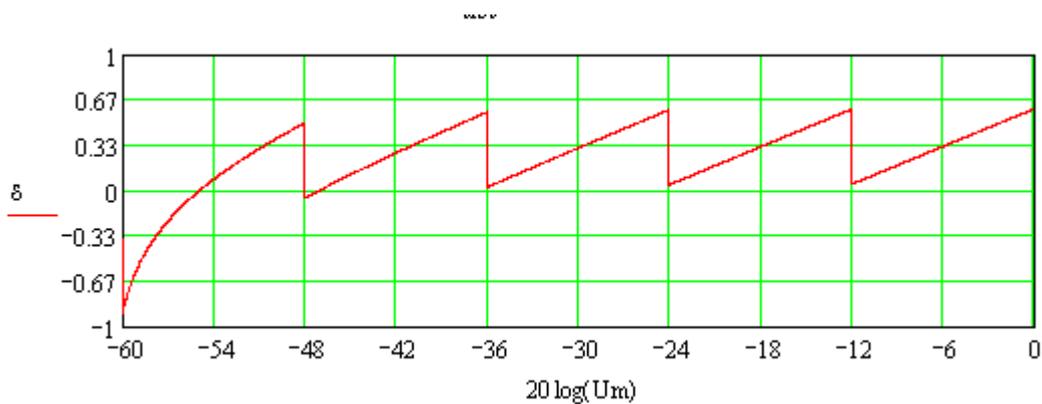


Рисунок 2.8 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса[30]

Пусть на вход измерителя поступает гауссовский импульс (рисунок 2.9), описываемый функцией (1.9). Истинная длительность гауссовского импульса по уровню

половины амплитудного значения U_m равна $\tau_{ист}$. Тогда при измеренной длительности импульса $\tau_{изм}$ систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

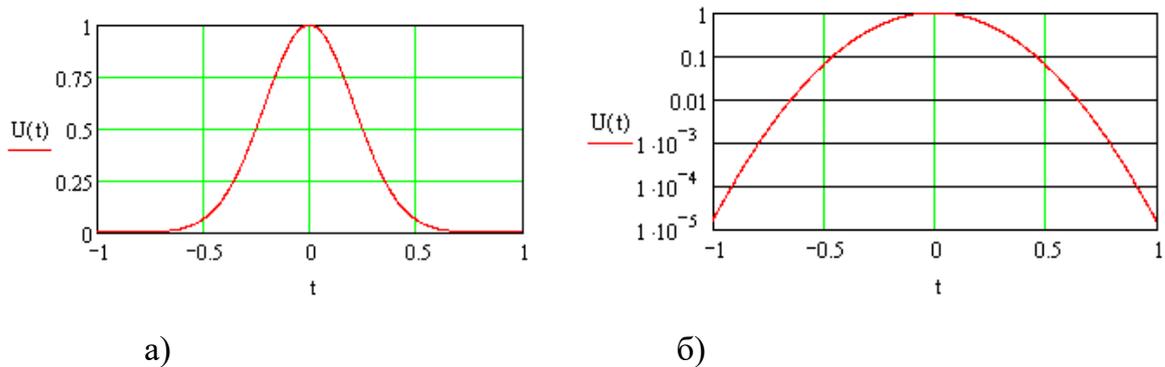


Рисунок 2.9 Форма экспоненциального импульса: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.9), получаем уравнения:

$$U_m \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{t}{\tau_{ист}}\right)^2\right) = U_0,$$

$$U_m \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{t}{\tau_{ист}}\right)^2\right) = U_k.$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{низм}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{квизм}$:

$$t_{низм} = -\frac{\tau_{ист}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}},$$

$$t_{квизм} = \frac{\tau_{ист}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}.$$

Из приведенного уравнения определяем измеренную длительность импульса

$$\tau_{изм} = \frac{\tau_{ист}}{2\sqrt{\ln(2)}} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right)} - \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right)} \right].$$

Систематическая погрешность измерения длительности гауссовского импульса будет равна:

$$\delta(U_m) = \frac{1}{2\sqrt{\ln(2)}} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right)} - \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right)} \right]$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.10, 2.11.

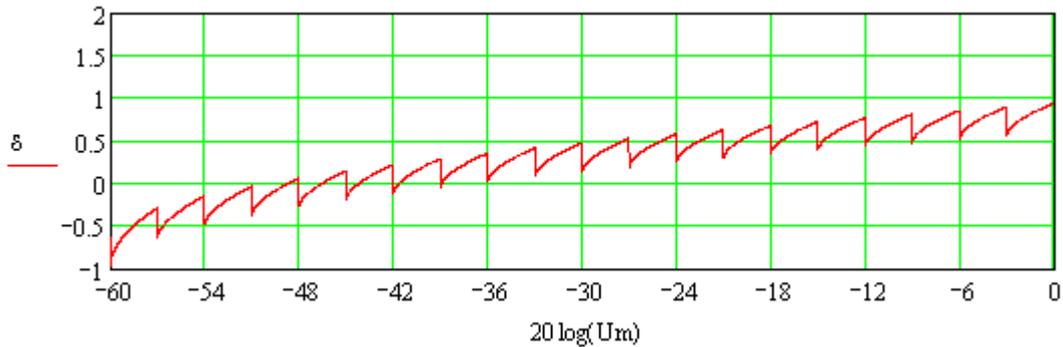


Рисунок 2.10 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

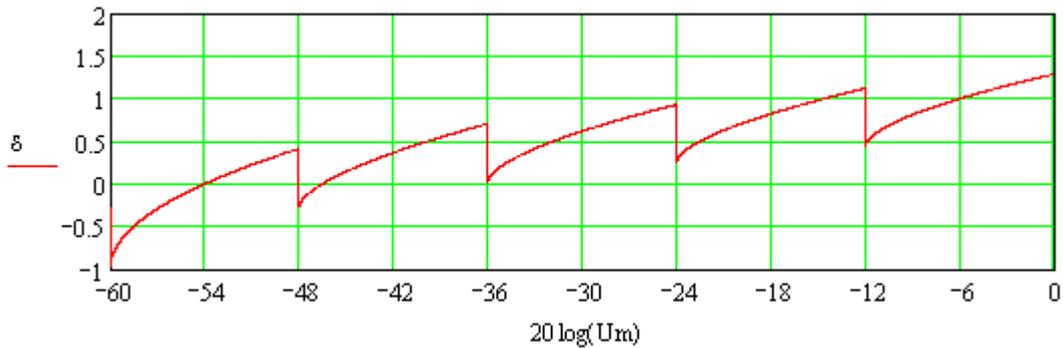


Рисунок 2.11 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.4 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Частично систематическая погрешность измерения длительности экспоненциально-степенного импульса рассмотрена в работе [35]. Рассмотрим расчеты более подробно в разрезе анализа погрешности для сравнительного анализа четырех измерителей длительности.

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциально-степенной импульс (рисунок 2.12), описываемый функцией (1.10). Истинная длительность экспоненциально-степенного импульса по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

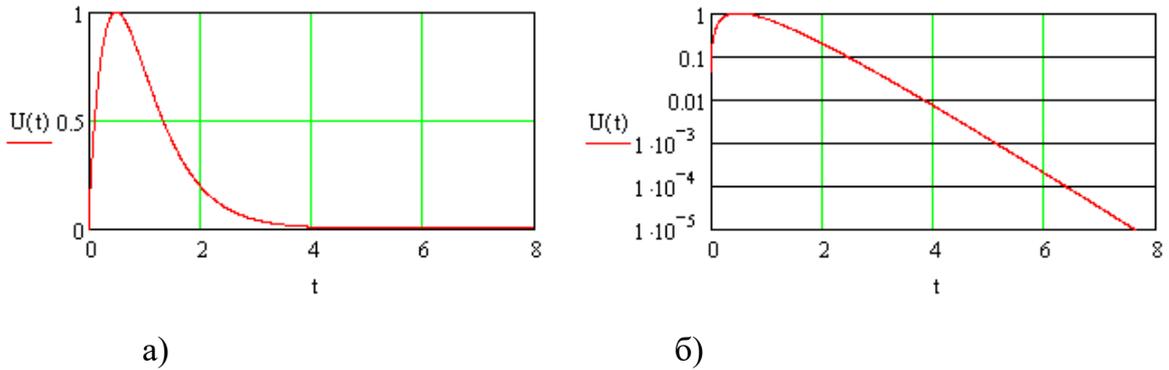


Рисунок 2.12 Форма экспоненциально-степенного импульса:

а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя выражение (1.10) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \exp \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^n,$$

$$U_k = U_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \exp \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^n.$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{низм}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{кизм}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 2.13 – 2.15 для различных значений параметра n и шага квантования.

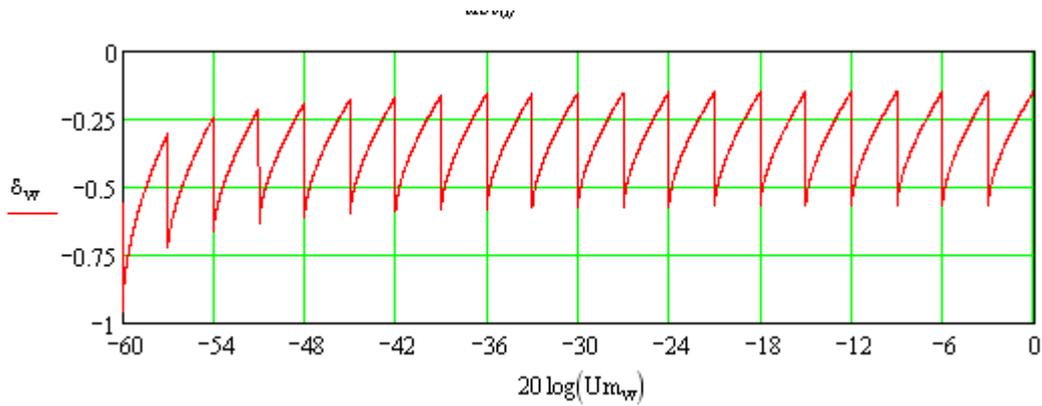


Рисунок 2.13 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ ишаге квантования $N=3$ дБ.

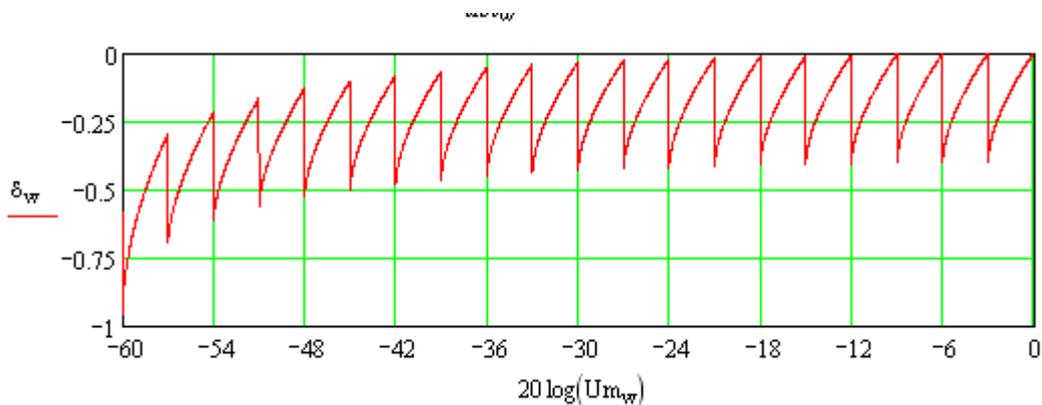


Рисунок 2.14 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ ишаге квантования $N=3$ дБ.

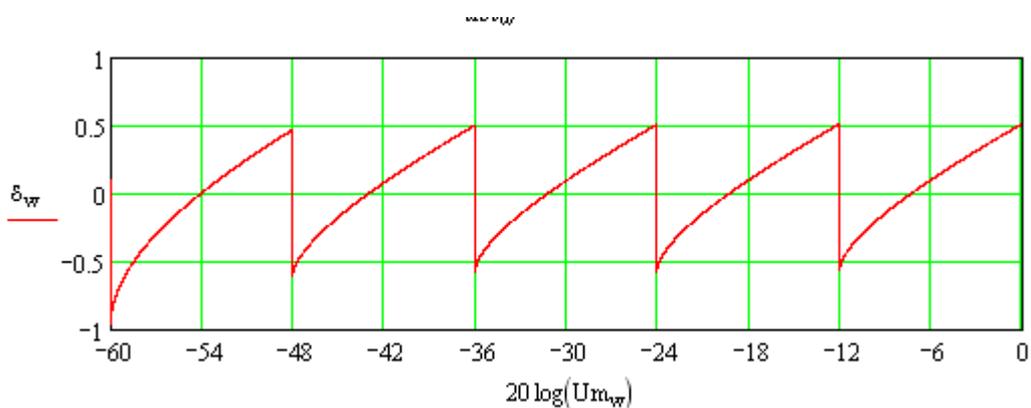


Рисунок 2.15 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ ишаге квантования $N=12$ дБ.

Из графиков рис.2.13 – 2.15 можно сделать следующие выводы:

Моменты переходов с одного порога на другой обуславливают пилообразный характер систематической погрешности измерителя длительности многопороговым измерителем.

Погрешность формирования длительности импульсов существенно зависит от шага квантования амплитуды N и от коэффициента формы импульса m .

Относительная погрешность формирования длительности экспоненциально-степенных импульсов во всех практически важных случаях достигает 60-120%.

2.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса [31]

Пусть на вход измерителя поступает синусный импульс (рисунок 2.16), описываемый функцией (1.11). Истинная длительность синусного импульса по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

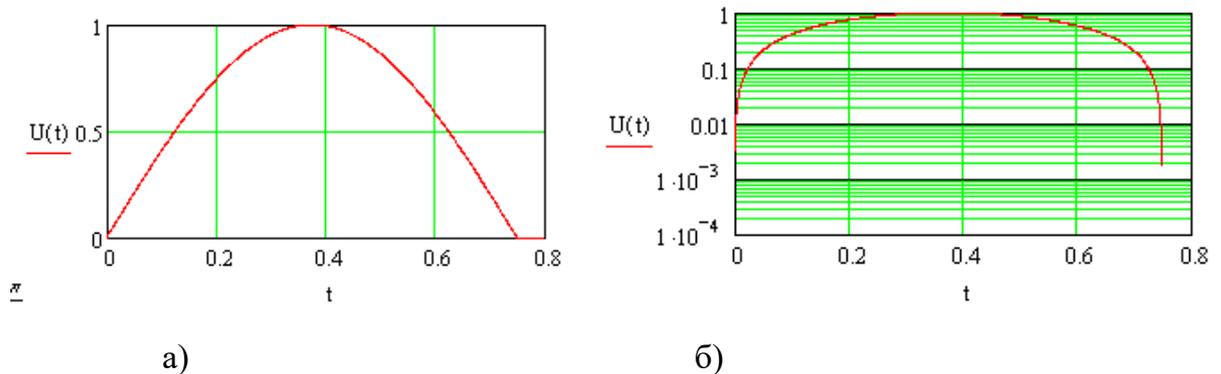


Рисунок 2.16 Форма синусного импульса: а) линейный масштаб;
б) логарифмический масштаб

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.16), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin(2\pi t / (3\tau_{ucm})) & \text{при } 0 \leq t \leq 1,5\tau_{ucm}; \\ 0 & \text{при } t > 1,5\tau_{ucm}; \end{cases}$$

$$U_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin(2\pi t / (3\tau_{\text{ист}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 1,5\tau_{\text{ист}}; \\ 0 & \text{при } t > 1,5\tau_{\text{ист}}. \end{cases}$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпущения первого сверху порога $t_{\text{кизм}}$:

$$t_{\text{низм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right),$$

$$t_{\text{кизм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) \right).$$

Измеренная длительность импульса определяется следующим выражением:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) - \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right) \right].$$

Систематическая погрешность измерения длительности синусного импульса

$$\delta(U_m) = \frac{3}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) - \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right) \right].$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.17 и 2.18.

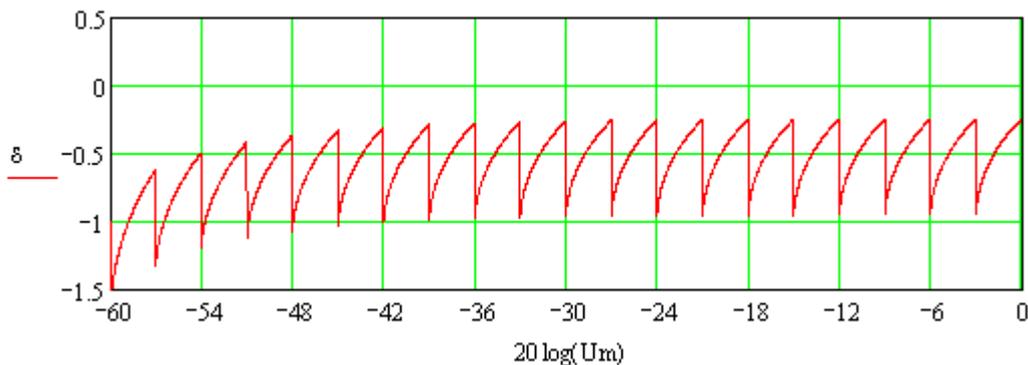


Рисунок 2.17 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

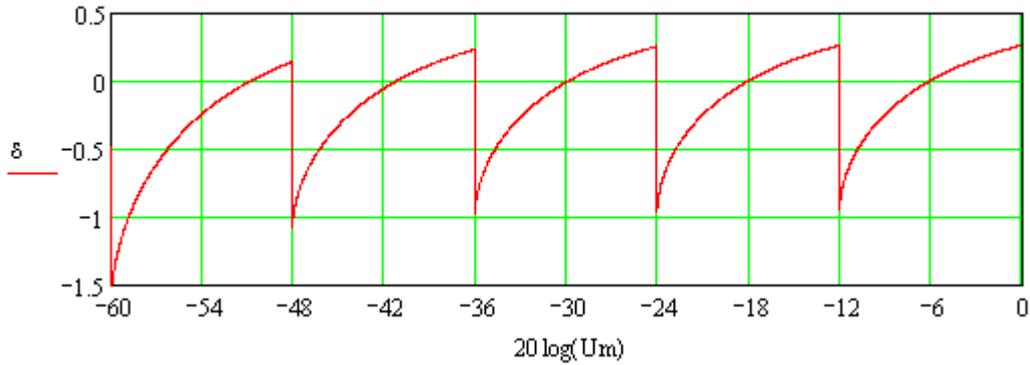


Рисунок 2.18 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синус-квадратный импульс (рисунок 2.19), описываемый функцией (1.12). Истинная длительность синус-квадратного импульса по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

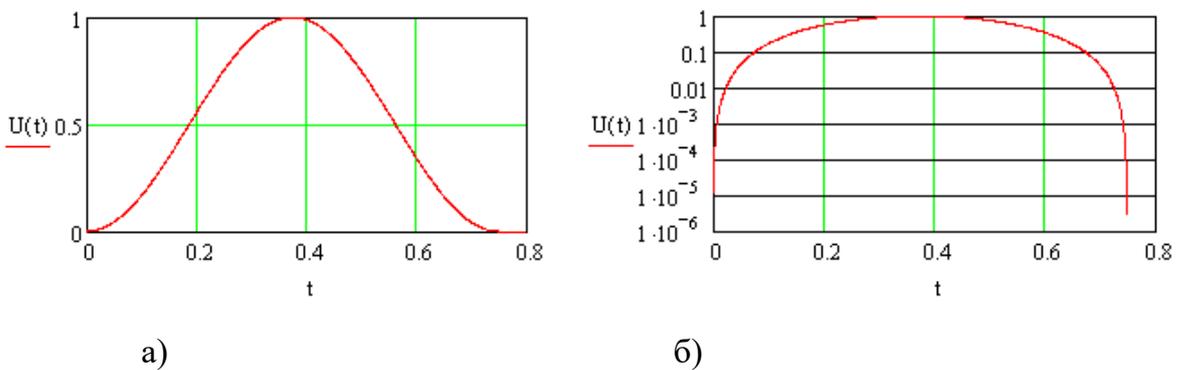


Рисунок 2.19 Форма синус-квадратного импульса: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.12), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin^2(\pi/(2\tau_{\text{исм}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{исм}}; \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{исм}}; \end{cases}$$

$$U_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin^2(\pi/(2\tau_{\text{исм}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{исм}}. \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{исм}}. \end{cases}$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$:

$$t_{\text{низм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right),$$

$$t_{\text{квизм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) \right].$$

Запишем измеренную длительность импульса:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right) \right].$$

Тогда систематическая погрешность измерения длительности синус-квадратного импульса

$$\delta(U_m) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right) \right].$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ приведены на рисунках 2.20 и 2.21.

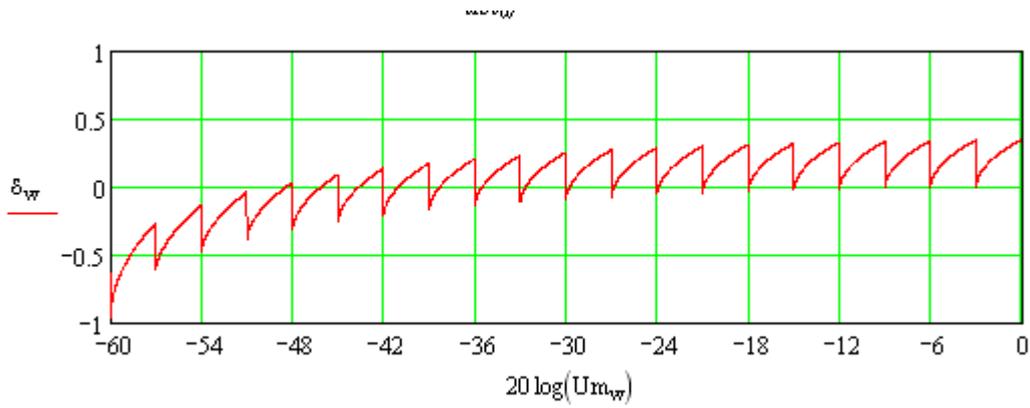


Рисунок 2.20 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

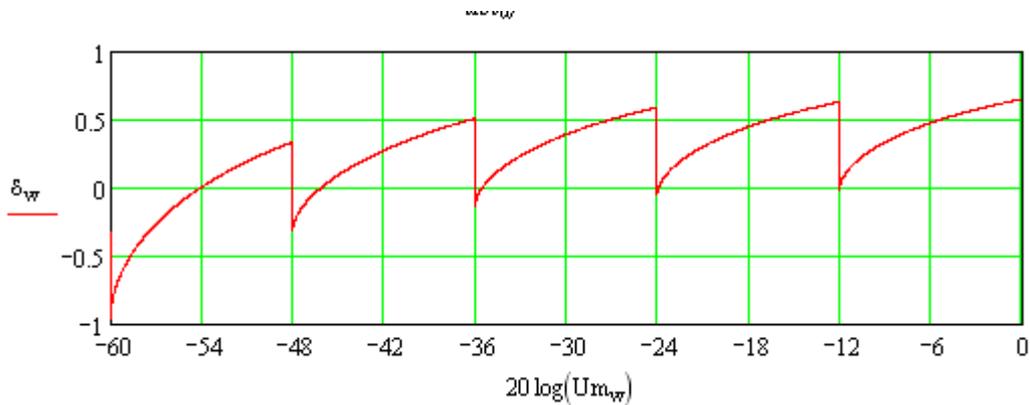


Рисунок 2.21 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.7 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Пусть на вход измерителя поступает импульс с провалом на вершине (рисунок 2.22), описываемый функцией (1.13). Истинная длительность импульса с провалом на вершине по уровню половины амплитудного значения U_m равна $\tau_{\text{ист}}$. Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

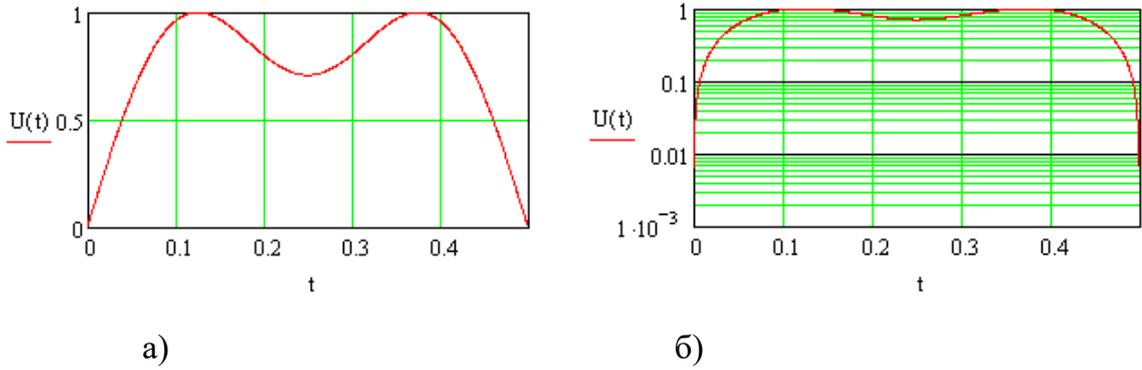


Рисунок 2.22 Форма импульса с провалом на вершине: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.13), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ U_m \frac{3}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) \right], & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{осн}}; \\ 0, & \text{при } t > \tau_{\text{осн}} \end{cases}$$

$$U_k = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ U_m \frac{3}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) \right], & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{осн}}. \\ 0, & \text{при } t > \tau_{\text{осн}} \end{cases}$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 2.23 и 2.24 для значений шага квантования 3 дБ, 12 дБ.

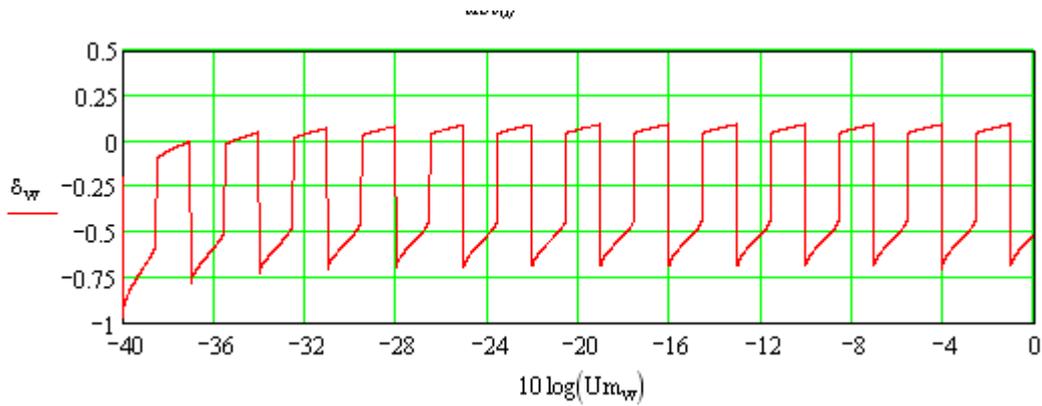


Рисунок 2.23 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

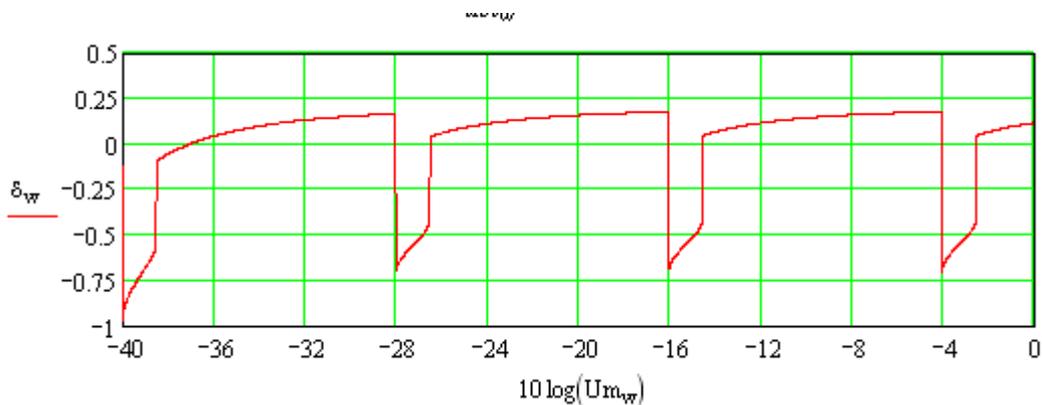


Рисунок 2.24 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает двухэкспоненциальный импульс (рисунок 2.25), описываемый функцией (1.14). Истинная длительность двухэкспоненциального импульса по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

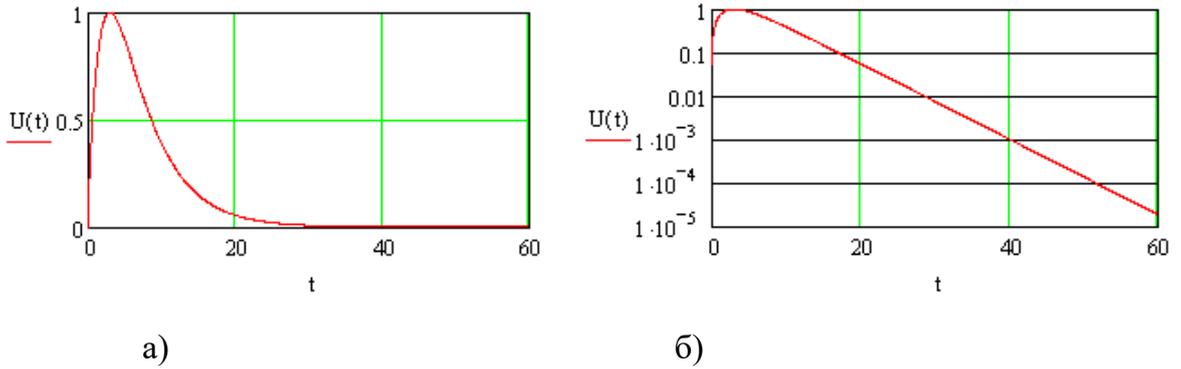


Рисунок 2.25 Форма двухэкспоненциального импульса: а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя выражение (1.14) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \cdot K \cdot (e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t}),$$

$$U_k = U_m \cdot K \cdot (e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t}).$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ изображены на рисунках 2.25 – 2.26.

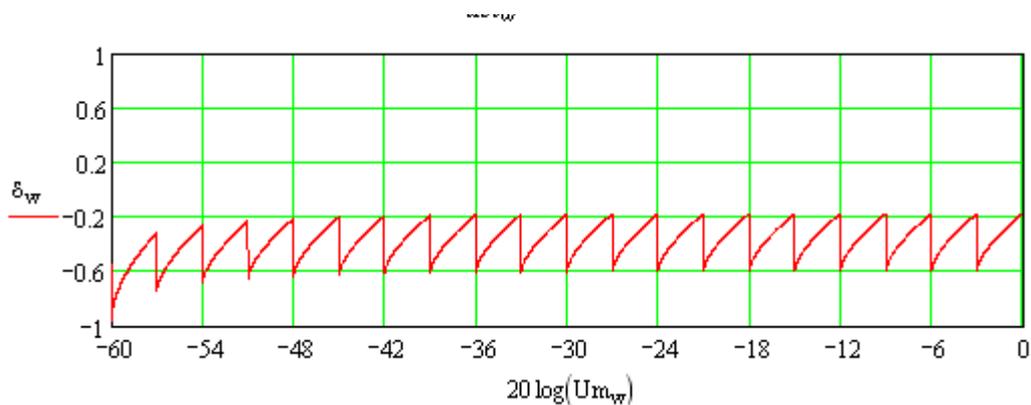


Рисунок 2.25 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{ дБ}$.

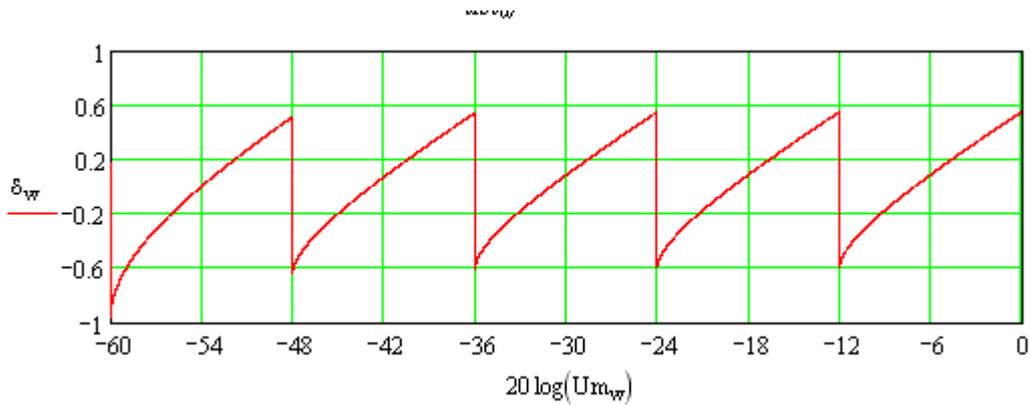


Рисунок 2.26 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.2.9 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94]

Пусть на вход измерителя поступает импульс с осцилляциями на вершине и после среза (рисунок 2.27), описываемый функцией (1.15). Истинная длительность импульса с осцилляциями на вершине и после среза по уровню половины амплитудного значения U_m равна τ_{ist} . Тогда при измеренной длительности импульса τ_{izm} систематическая погрешность измерения определяется формулой (2.9).

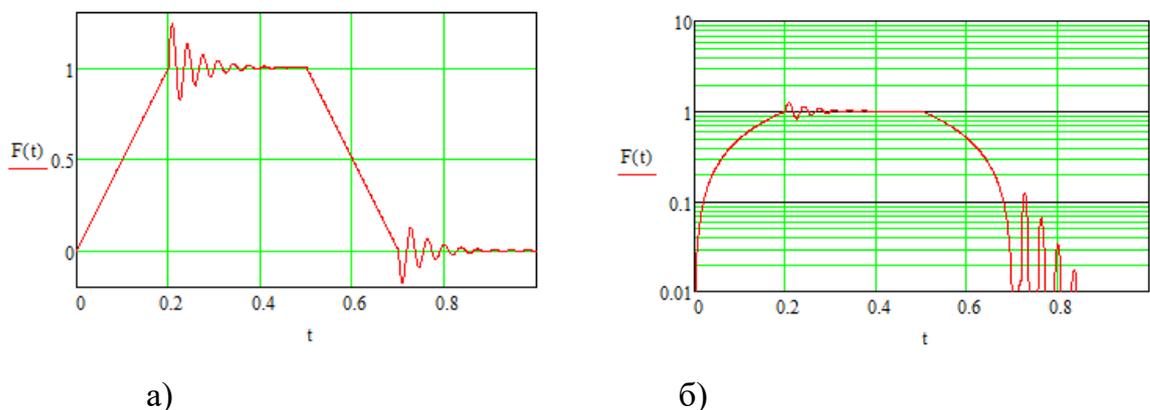


Рисунок 2.27 Форма импульса с осцилляциями на вершине и после среза:
а) линейный масштаб; б) логарифмический масштаб

Подставляя выражение (1.15) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения, описывающие моменты срабатывания порогов.

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{клизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ изображены на рисунках 2.28 – 2.29.

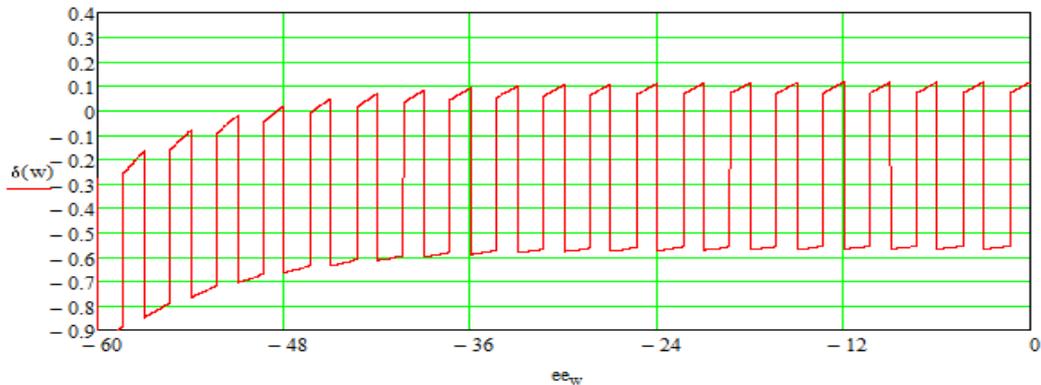


Рисунок 2.28 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

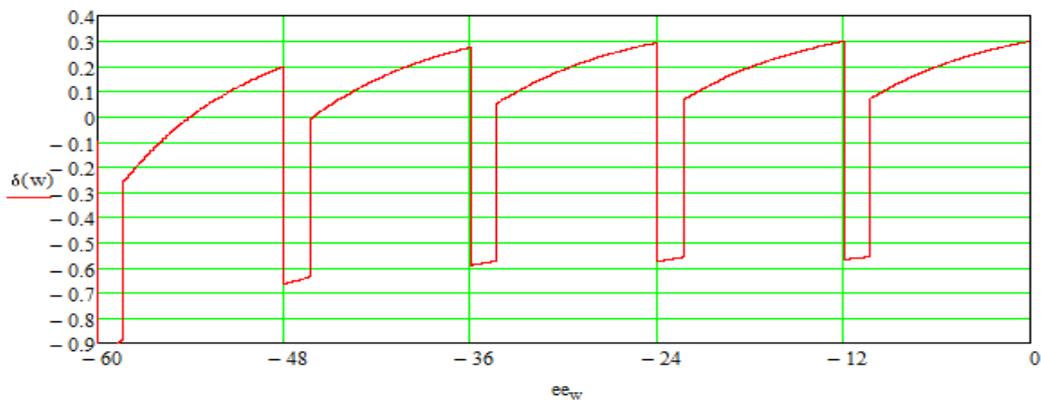


Рисунок 2.29 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

2.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов

2.3.1 Методика расчета случайной погрешности измерения

Отдельные вопросы расчета случайной погрешности освещены в ряде работ [33,34,36-42].

Поскольку моменты срабатывания и отпускания пороговых устройств будут смещаться под влиянием шума, среднеквадратическое значение момента срабатывания порогового устройства из-за наличия шума при $\sigma_{ш}$ – уровне шума на входе порогового устройства, S – крутизне фронта импульса в окрестности порогового уровня, определяется как [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ш}}{S}, \quad (2.13)$$

Крутизна фронта (среза) импульса является производной от функции, описывающей форму импульса.

Выражение для суммарной среднеквадратической погрешности, при независимых шумах в области фронта и среза будет иметь вид:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2.14)$$

где σ_1, σ_2 – среднеквадратическое отклонения моментов срабатывания фронта и среза соответственно.

Подставляя в (2.13) крутизну импульса в момент срабатывания самого чувствительного порога $S(t_1)$, находим среднеквадратическую погрешность формирования фронта

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_1)}. \quad (2.15)$$

Подставляя в (2.13) крутизну импульса в момент отпускания второго сверху из сработавших порогов $S(t_2)$, находим среднеквадратическую погрешность формирования среза

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_2)}, \quad (2.16)$$

Подставляя (2.15) и (2.16) в (2.14), получаем выражение для суммарной среднеквадратической погрешности формирования длительности нормированного импульса

$$\sigma_\tau = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_1)} + \frac{1}{S^2(t_2)}}. \quad (2.17)$$

Из выражения (2.17) следует, что погрешность формирования длительности нормированного импульса, вызванная наличием шума на входе многопорогового измерителя, зависит только от уровня входного шума и крутизны фронта и среза измеряемого импульса. Среднеквадратическое значение погрешности формирования нормированного импульса прямо пропорционально среднеквадратическому значению шума на входе и уменьшается с увеличением крутизны фронта и среза импульса. Полученное выражение (2.17) позволяет провести анализ зависимости среднеквадратического отклонения длительности нормированного импульса от крутизны фронта и среза измеряемого импульса и, следовательно, от его формы.

2.3.2 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса [36]

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса находим производную функции (1.7), описывающей его форму:

$$S(t) = U(t)' = \begin{cases} \frac{U_m}{\tau_f}, & \text{при } 0 \leq t < \tau_f \\ 1, & \text{при } \tau_f \leq t < \tau_{ист} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ \frac{U_m}{\tau_s}, & \text{при } \tau_{ист} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ист} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases}$$

Моменты срабатывания самого чувствительного порога $t_{низм}$ и отпускания первого сверху из сработавших порогов $t_{квизм}$ определяются выражениями:

$$S(t_{низм}) = \frac{U_m}{\tau_f},$$

$$S(t_{\text{кизм}}) = \frac{U_m}{\tau_s}.$$

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_\tau = \sigma_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2}} = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{U_m} \sqrt{\tau_f^2 + \tau_s^2} \quad (2.18)$$

Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала, приведена на рисунке 2.30

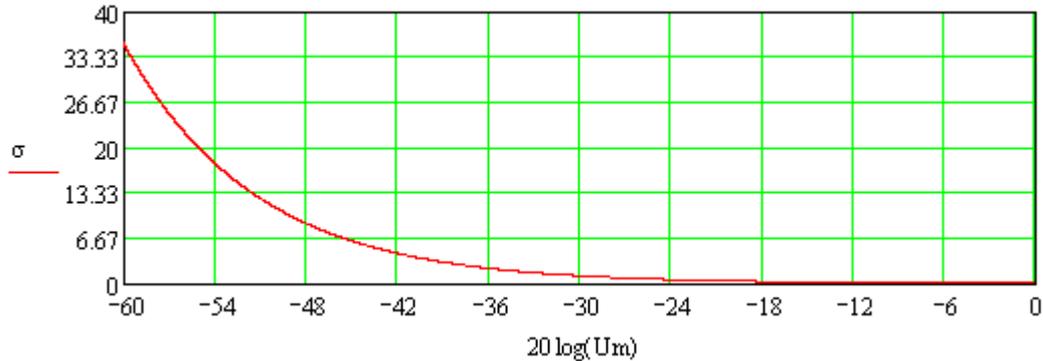


Рисунок 2.30 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала

Отличительной особенностью случайной ошибки трапецеидального импульса является то, что она не зависит от шага квантования.

2.3.3 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса находим производную функции (1.8), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{U_m}{\tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{усм}}; \\ -\frac{U_m}{\tau_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_u}{\tau_1}\right)\right) \exp\left(-\frac{t - \tau_u}{\tau_2}\right). & \end{cases} \quad (2.19)$$

Моменты срабатывания самого чувствительного порога и отпускания первого сверху из сработавших порогов определяются выражениями:

$$t_{\text{низм}} = -\tau_1 \ln\left(1 - \frac{U_0}{U_m}\right), \quad (2.20)$$

$$t_{\text{кизм}} = \tau_{\text{ист}} - \tau_2 \left[\frac{U_k}{U_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{ист}}}{\tau_1}\right) \right) \right], \quad (2.21)$$

где U_0 – уровень срабатывания самого чувствительного порога;

U_k – уровень срабатывания первого сверху из сработавших порогов.

Подставляя выражения (2.20) и (2.21) в (2.19), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$:

$$S(t_{\text{низм}}) = \frac{U_m - U_0}{\tau_1}, \quad (2.22)$$

$$S(t_{\text{кизм}}) = -\frac{U_k}{\tau_2}. \quad (2.23)$$

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_\tau = \sigma_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\tau_1^2}{(U_m - U_0)^2} - \frac{\tau_2^2}{U_k^2}}. \quad (2.24)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности экспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.24) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 2.31-2.33.

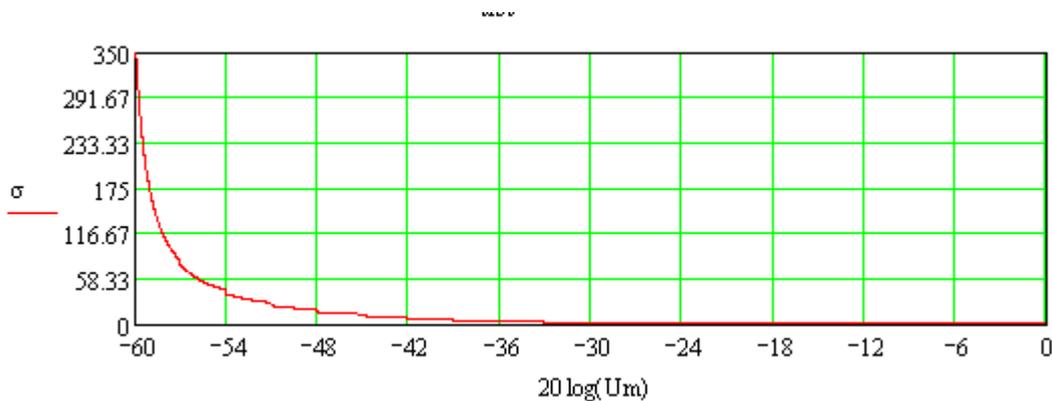


Рисунок 2.31 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

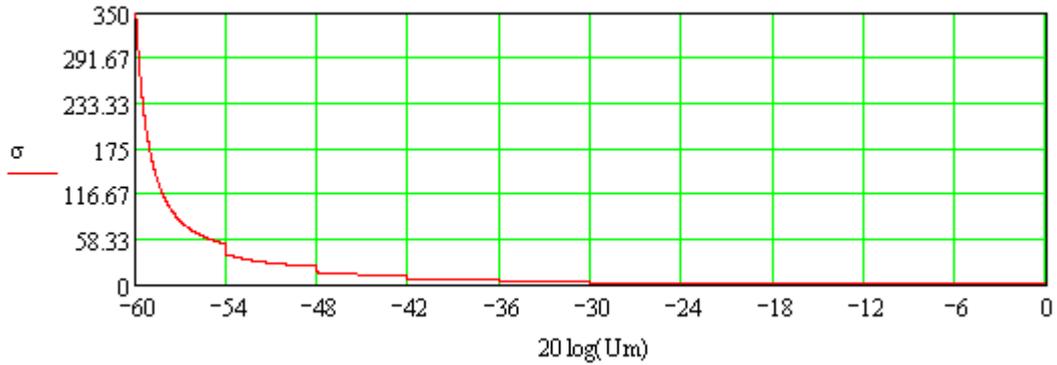


Рисунок 2.32 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

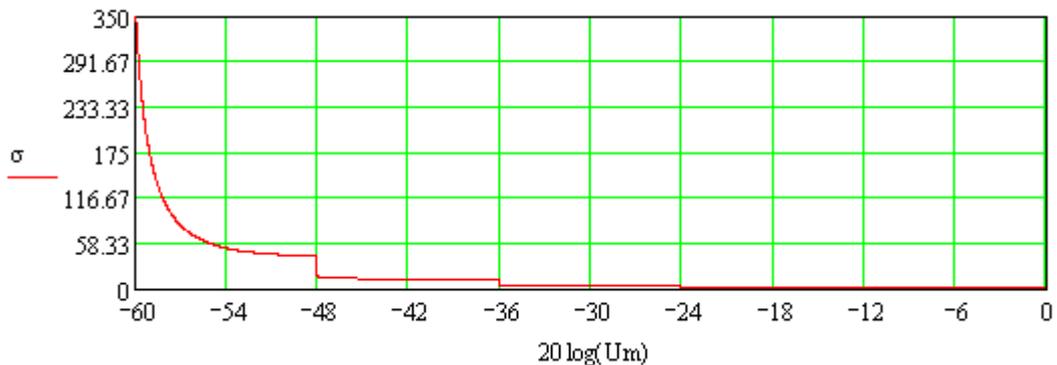


Рисунок 2.33 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.4 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса находим производную функции (1.9), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = -\frac{8\ln(2)U_m}{\tau_{ист}^2} t \exp\left[-4\ln(2)\left(\frac{t}{\tau_{ист}}\right)^2\right]. \quad (2.25)$$

Подставляя выражения (2.15) и (2.16) для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания первого сверху из сработавших порогов, находим крутизну импульса в моменты $t_{низм}$ и $t_{квизм}$:

$$S(t_{\text{НИЗМ}}) = \frac{4\sqrt{\ln(2)}U_0}{\tau_{\text{ИСТ}}} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right)}, \quad (2.26)$$

$$S(t_{\text{НИЗМ}}) = \frac{4\sqrt{\ln(2)}U_k}{\tau_{\text{ИСТ}}} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right)}. \quad (2.27)$$

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_{\text{ш}}\tau_{\text{ИСТ}}}{4\sqrt{\ln(2)}} \sqrt{\frac{1}{U_0^2 \ln(U_m/U_0)} + \frac{1}{U_k^2 \ln(U_m/U_k)}}. \quad (2.28)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.28) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 2.34-2.36.

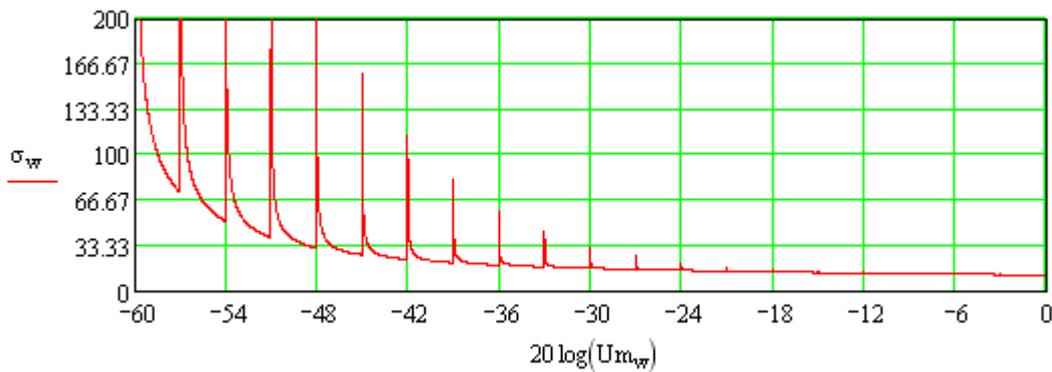


Рисунок 2.34 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

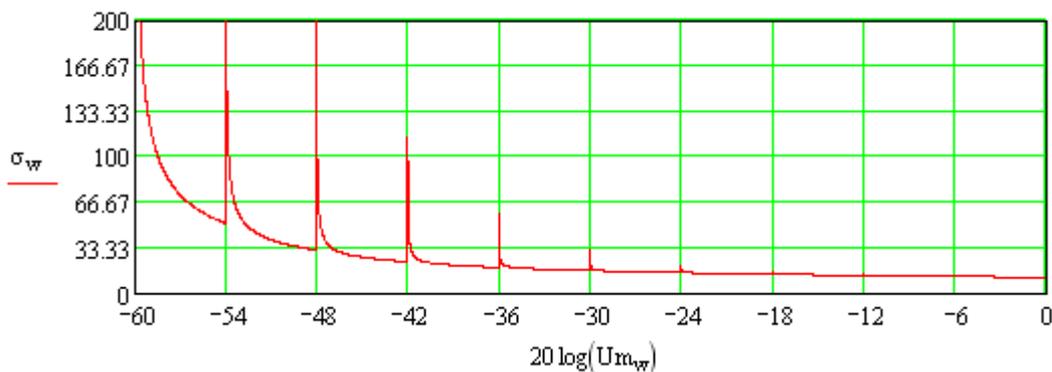


Рисунок 2.35 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

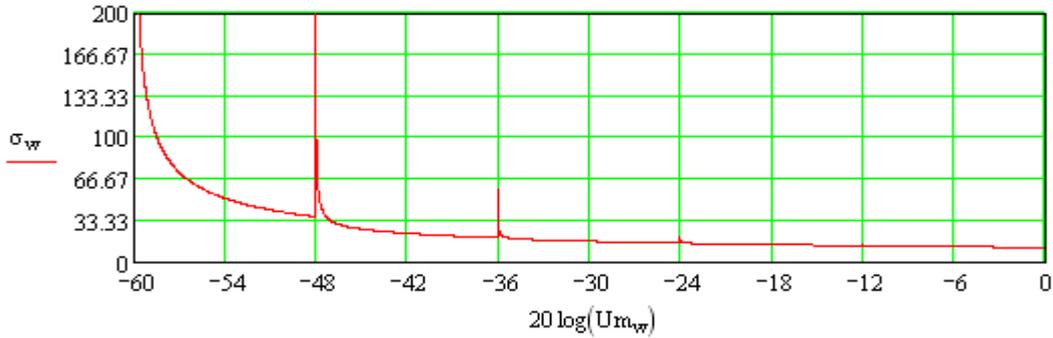


Рисунок 2.36 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.5 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.10), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = \frac{nU_m}{t_m^{2n}} \left[t_m^n \cdot t^{n-1} - t^n (t_m - t)^{n-1} \right] \exp\left(1 - \frac{t}{t_m}\right)^n. \quad (2.29)$$

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{клизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов от амплитуды входного сигнала при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.37-2.39.

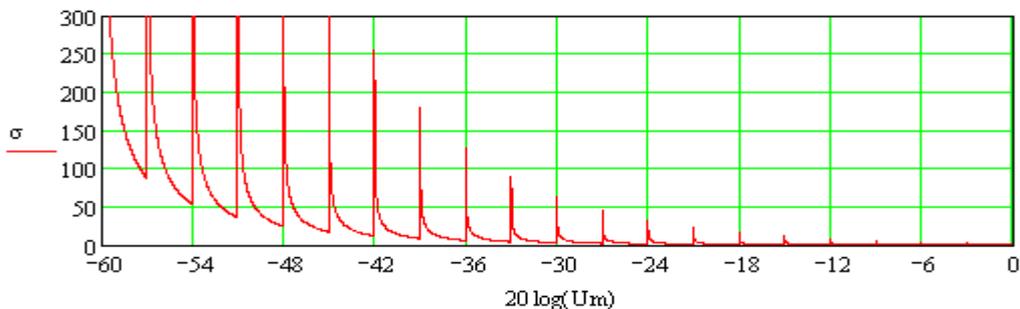


Рисунок 2.37 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

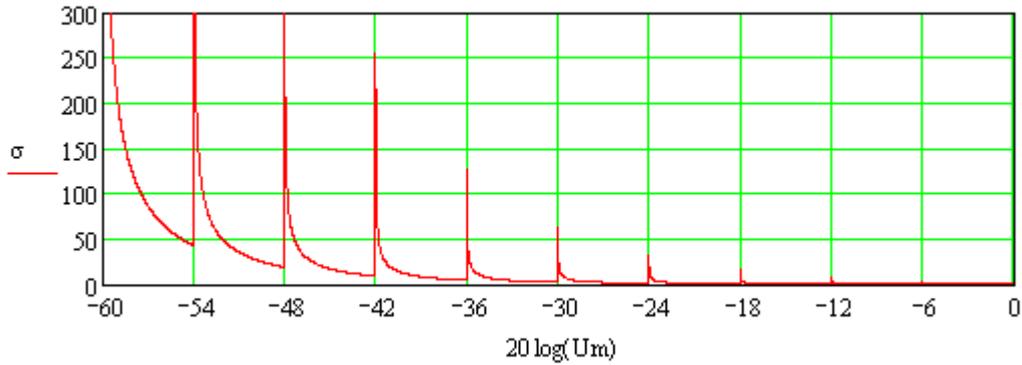


Рисунок 2.38 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

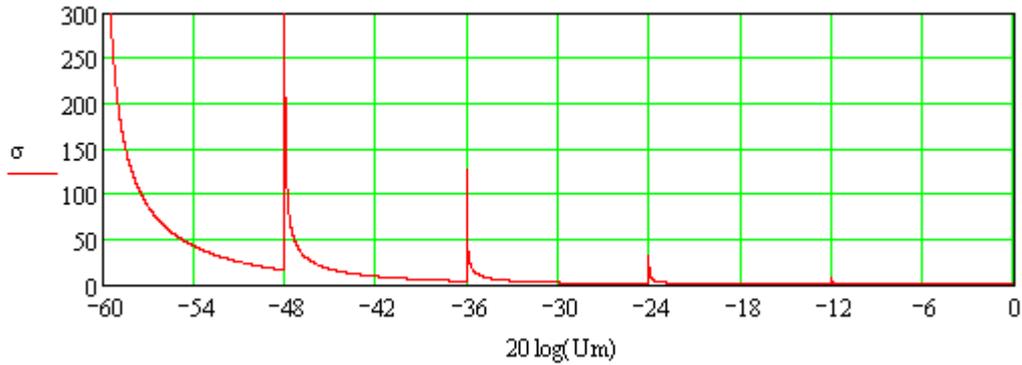


Рисунок 2.39 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.6 Случайная погрешность измерения синусного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса находим производную функции (1.11), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{2\pi U_m}{3\tau_{\text{усм}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{3\tau_{\text{усм}}}\right) & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{3\tau_{\text{усм}}}{2}; \\ 0 & \text{при } t > \frac{3\tau_{\text{усм}}}{2}. \end{cases} \quad (2.30)$$

Подставляя выражения для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания первого сверху из сработавших порогов (2.15) и (2.16), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$:

$$S(t_{\text{низм}}) = \frac{2\pi U_m}{3\tau_{\text{ист}}} \cos\left(\arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right)\right), \quad (2.31)$$

$$S(t_{\text{кизм}}) = \frac{2\pi U_m}{3\tau_{\text{ист}}} \cos\left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right)\right). \quad (2.32)$$

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_\tau = \frac{3\tau_{\text{ист}} \sigma_{\text{ш}}}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{U_m^2 - U_0^2} + \frac{1}{U_m^2 - U_k^2}}. \quad (2.33)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.33) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 2.40-2.41.

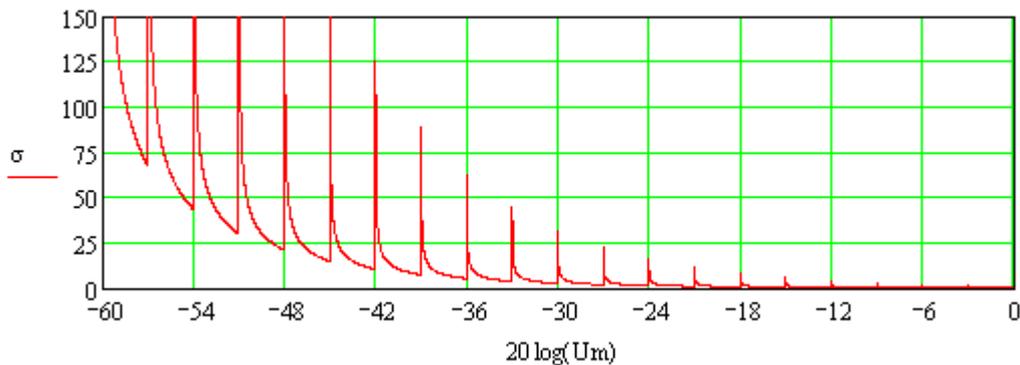


Рисунок 2.40 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

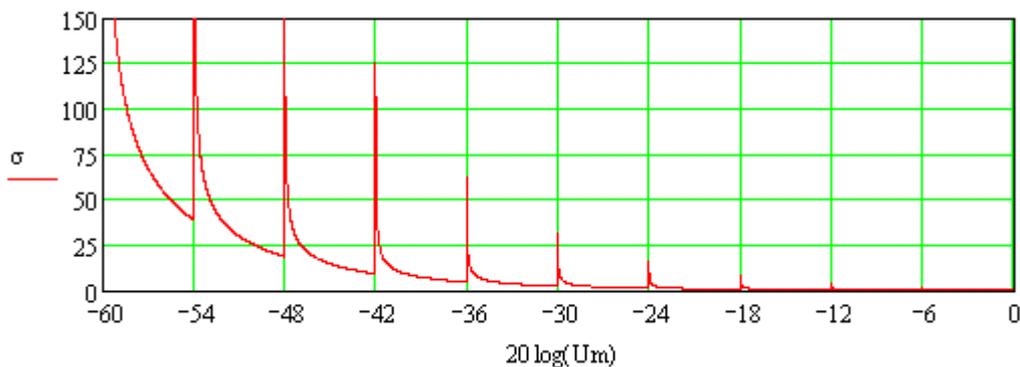


Рисунок 2.41 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

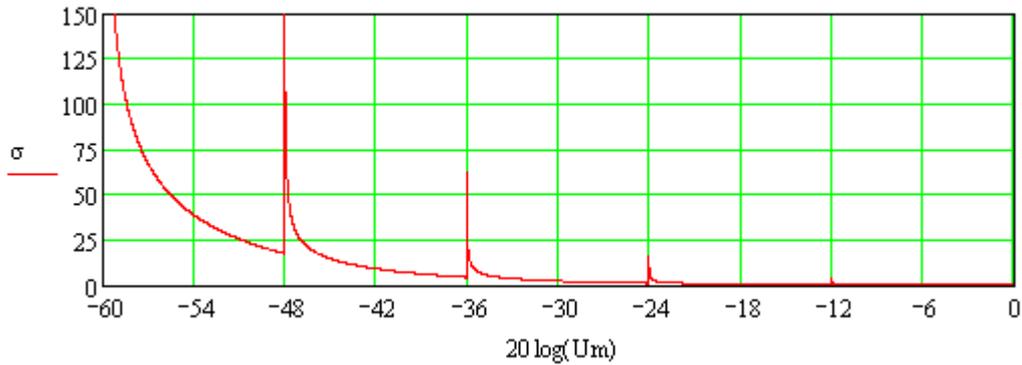


Рисунок 2.42 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.7 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса находим производную функции (1.12), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \frac{\pi}{\tau_{\text{уст}}} \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{2\tau_{\text{уст}}}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2\tau_{\text{уст}}}\right) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{уст}}; \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{уст}}. \end{cases} \quad (2.34)$$

Подставляя выражения (2.15) и (2.16) для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания второго сверху из сработавших порогов, находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{квизм}}$:

$$S(t_{\text{низм}}) = \frac{\pi U_m}{\tau_{\text{ист}}} \sqrt{\frac{U_0}{U_m}} \cos\left(\arcsin \sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right), \quad (2.35)$$

$$S(t_{\text{квизм}}) = -\frac{\pi U_m}{\tau_{\text{ист}}} \sqrt{\frac{U_k}{U_m}} \cos\left(\arcsin \sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right). \quad (2.36)$$

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_{\text{ш}} \tau_{\text{ист}}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{U_0(U_m - U_0)} + \frac{1}{U_k(U_m - U_k)}}. \quad (2.37)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.37) при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 2.43-2.45.

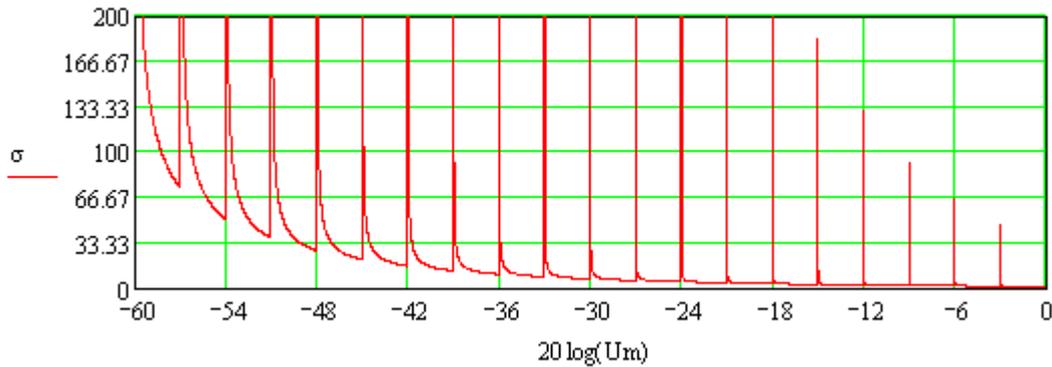


Рисунок 2.43 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

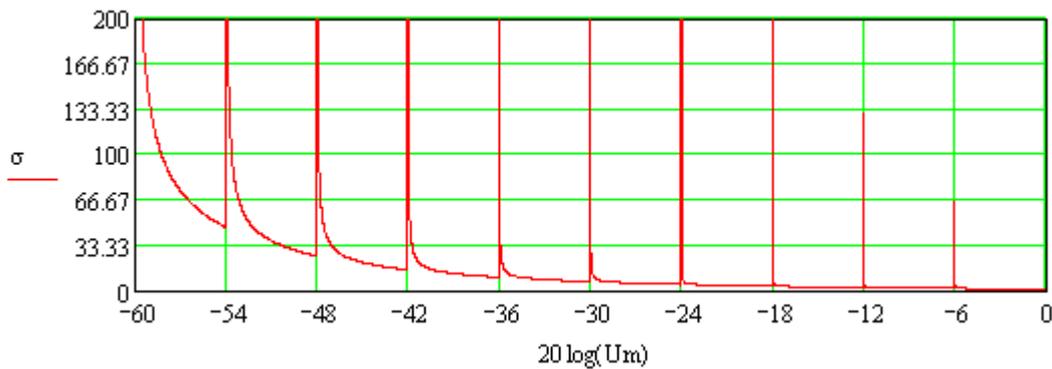


Рисунок 2.44 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

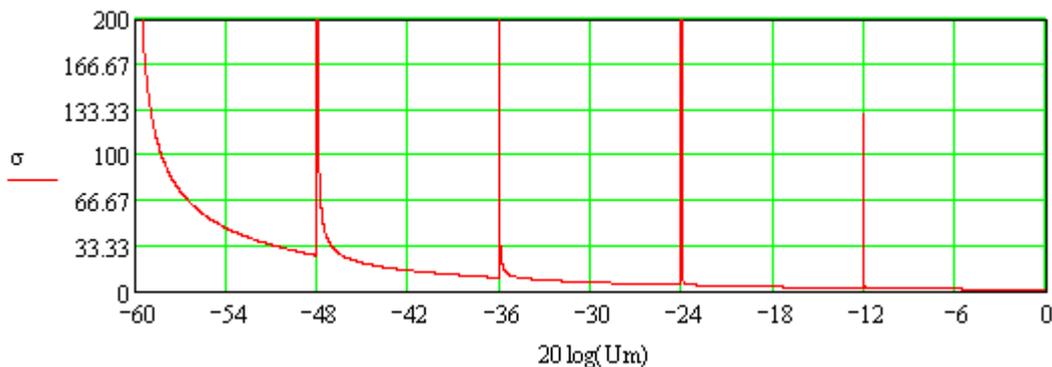


Рисунок 2.45 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.8 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.13), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{3\pi U_m}{2\sqrt{2}\tau_{осн}} \left[\cos\left(\frac{\pi t}{\tau_{осн}}\right) + \cos\left(\frac{3\pi t}{\tau_{осн}}\right) \right] & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{осн}; \\ 0 & \text{при } t > \tau_{осн}. \end{cases} \quad (2.38)$$

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{низм}$ и $t_{квизм}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульсов с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.46-2.48.

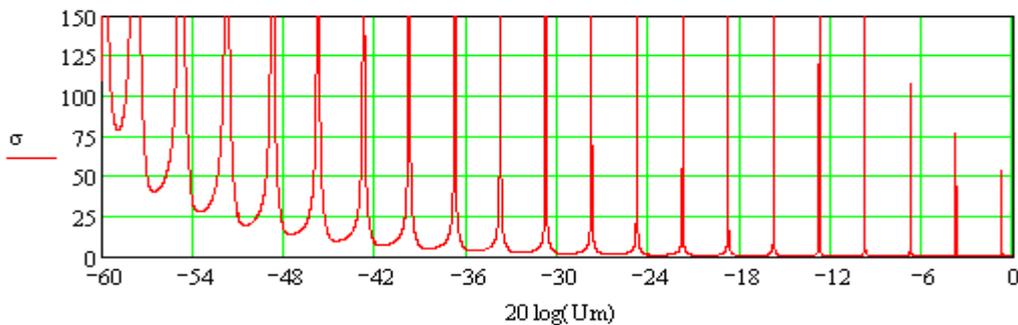


Рисунок 2.46 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

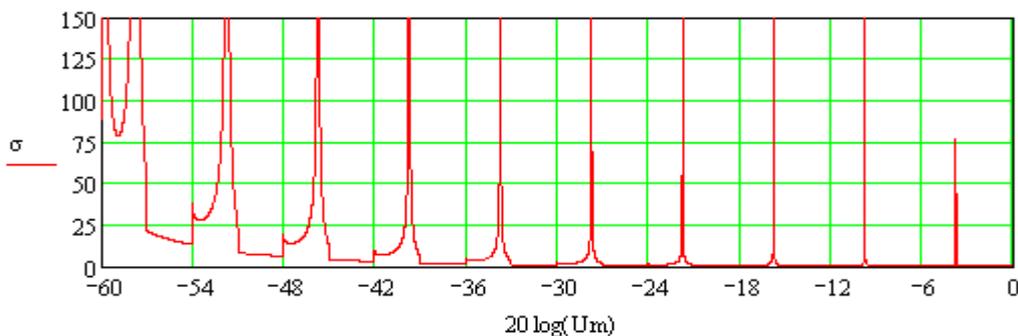


Рисунок 2.47 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

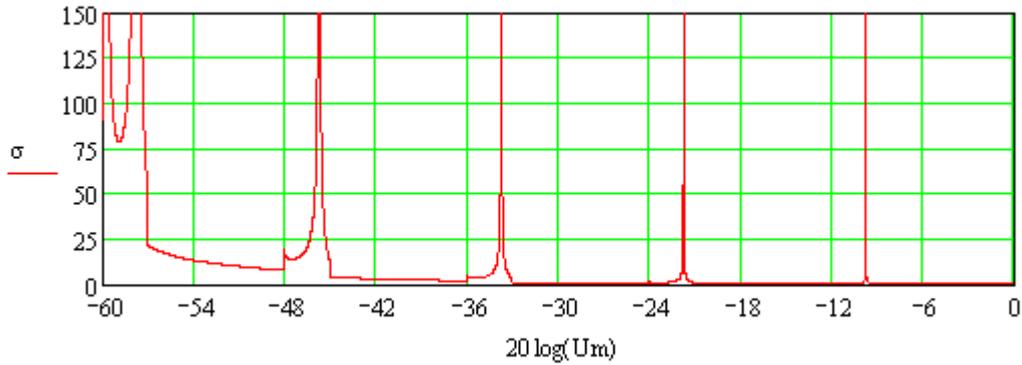


Рисунок 2.48 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.14), описывающей его форму:

$$S(t) = U'(t) = U_m \cdot K \cdot (-\beta_1 \cdot e^{-\beta_1 t} + \beta_2 \cdot e^{-\beta_2 t}). \quad (2.39)$$

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{клизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.49-2.51.

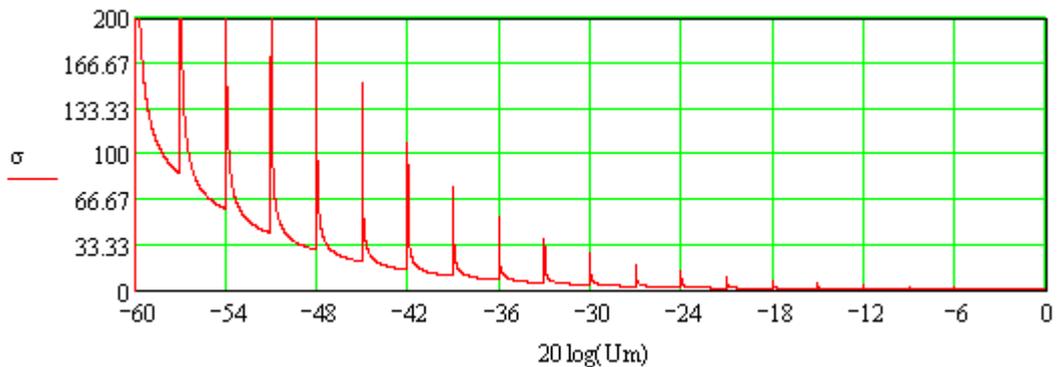


Рисунок 2.49 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

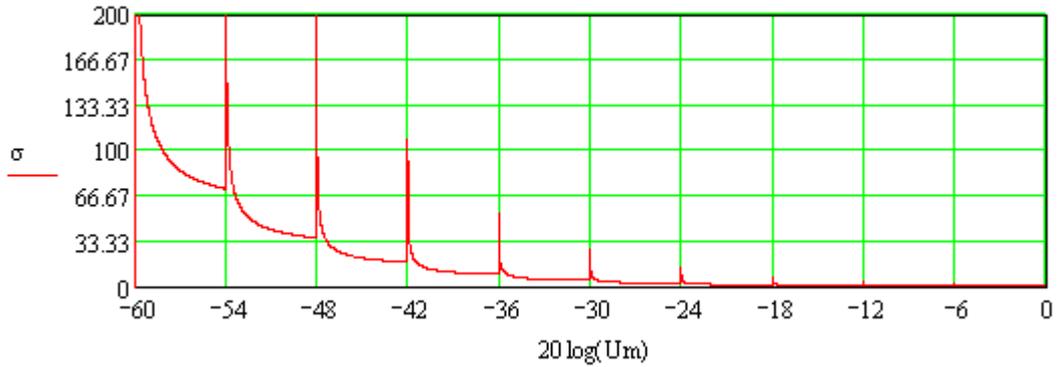


Рисунок 2.50 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

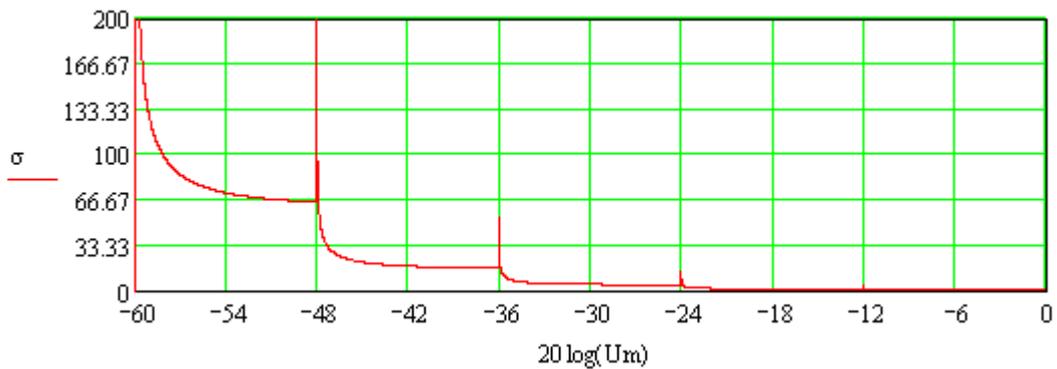


Рисунок 2.51 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.3.10 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95]

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза находим производную функции (1.15), описывающей его форму:

$$S(t) = F(t) = \left(\begin{array}{l} \frac{U_{m_w}}{\tau_f} \text{ if } 0 \leq t < \tau_f \\ 30 \cdot pp \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \cos(60 \cdot pp \cdot x) \cdot U_{m_w} - \frac{\text{shir} \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \sin(60 \cdot pp \cdot x) \cdot U_{m_w}}{2} \text{ if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ \frac{U_{m_w}}{\tau_s} \text{ if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{array} \right) \quad (2.40)$$

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 2.52-2.54.

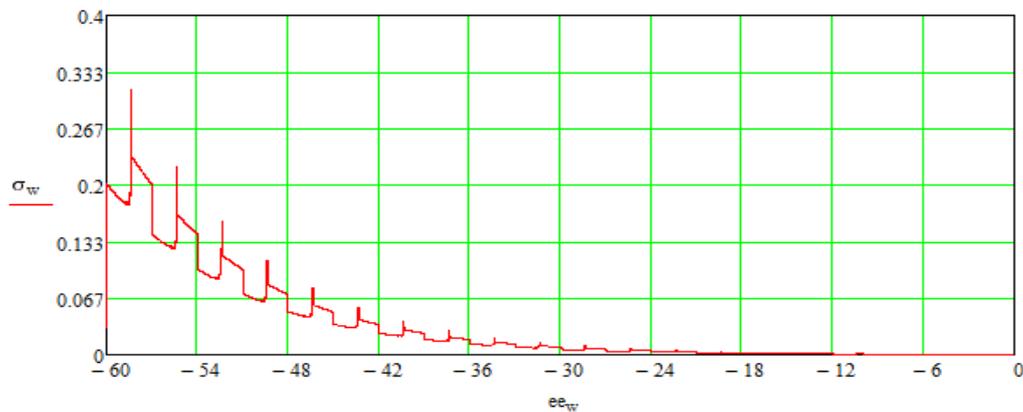


Рисунок 2.52 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

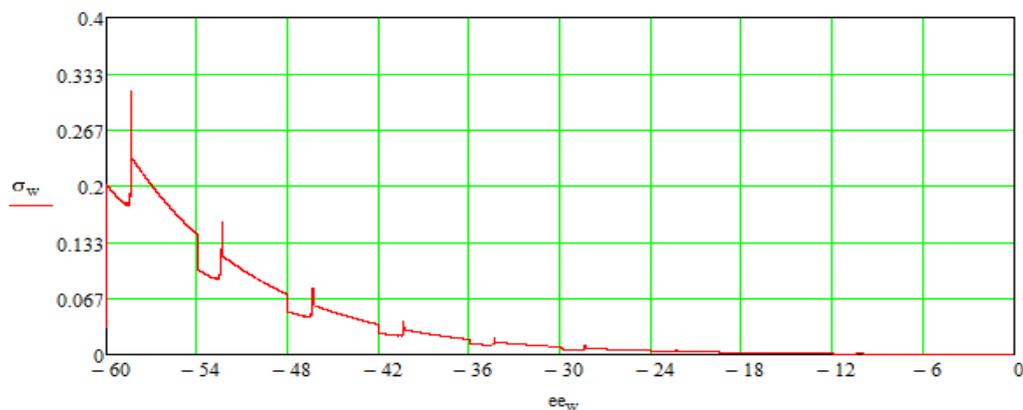


Рисунок 2.53 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

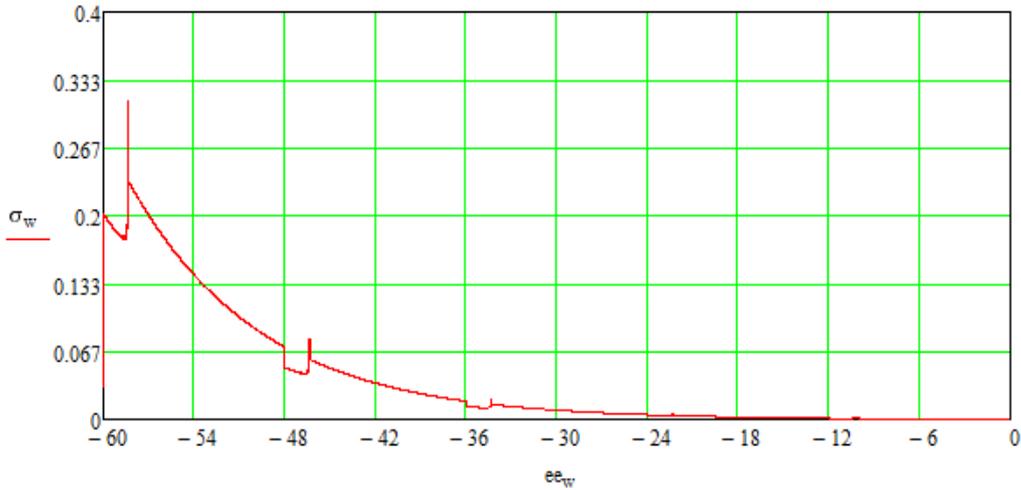


Рисунок 2.54 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

2.4 Выводы

В главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов в широком динамическом диапазоне для различных типов импульсов. Обоснована структура измерителя длительности, реализующая предложенный многопороговый алгоритм измерения.

Получение аналитических выражений для погрешностей многопорогового измерителя позволило разработать методику расчета систематической и случайной составляющих погрешности многопорогового измерителя с формированием нормированного импульса по нижнему и первому из сверху отпустивших порогов для девяти типов импульсов (трапецеидальной, экспоненциальной, гауссовской, экспоненциально-степенной, синусной, синус-квадратной, двухэкспоненциальной, с провалом на вершине и с осцилляциями на вершине и после среза), характерных для комплексов освещения радиотехнической обстановки.

Оригинальными являются результаты исследования для экспоненциального, гауссовского, синусного, синус-квадратного импульсов, импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Предложенная методика оценки ошибок измерения длительности импульсов для многопорогового алгоритма измерения с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отпущивших порогов позволяет выявить следующие особенности.

Для всех расчетов систематическая ошибка (СО) и случайная (шумовая) ошибка (ШО), определяемая шумами тракта, имеют пилообразный характер, обусловленный моментами перехода измерителя на следующий порог, за исключением ШО измерения длительности трапецеидального импульса.

Для трапецеидального импульса. СО измерения длительности трапецеидального импульса монотонно возрастает от 0% до 10%. При приближении к уровню чувствительности СО увеличивается до 40% при шаге квантования 3 дБ. При увеличении шага квантования до 12 дБ СО увеличивается до 25%. Ошибка в основном сосредоточена выше нуля и уходит в отрицательную область при приближении к уровню чувствительности. ШО измерения длительности трапецеидального импульса увеличивается по мере приближения к чувствительности измерителя и составляет не более 30%. ШО не зависит от шага квантования.

Для экспоненциального импульса. СО измерения длительности экспоненциального импульса с шагом квантования 3 дБ, в большей части динамического диапазона, составляет не более 15% и увеличивается до 70% при приближении к чувствительности. Имеет место положительное смещение ошибки. При шаге квантования 12 дБ увеличивается до 50%. ШО измерения длительности экспоненциального импульса имеет монотонный характер с выбросами. Выбросы в моменты переключения порогов обусловлены тем, что производная в точке с нулевой крутизной стремится к ∞ . В диапазоне до -48 дБ ШО составляет не более 25%, по мере приближения к уровню чувствительности увеличивается до 300%.

Для гауссовского импульса. Максимальная СО измерения длительности гауссовского импульса составляет 80%, при шаге квантования 12 дБ – 120%. Ошибка не сосредоточена в одной области, а монотонно возрастает от -80% до 80% при шаге 3 дБ. Переход через нуль происходит в районе середины динамики измерителя. При изменении шага квантования ошибка возрастает до 120%. ШО измерения длительности гауссовского импульса в диапазоне от 0 дБ до -48 дБ составляет не более 30%, далее увеличивается по мере приближения к уровню чувствительности до 200% с характерными выбросами в точках с нулевой крутизной.

Для экспоненциально-степенного импульса. СО измерения длительности экспоненциально-степенного импульса при шаге квантования 3 дБ составляет не более 55% и увеличивается в районе чувствительности до 75%. Ошибка смещена в отрицательную область. При параметре $m=2$ и шаге 12 дБ, СО составляет 45%, характеристика смещается ближе к нулю. При шаге 3 дБ и $m=2$, ошибка становится симметричной относительно нуля и составляет не более 50%. ШО измерения длительности экспоненциально-степенного импульса в большей части динамического диапазона не превышает 30%. Скачкообразное изменение ШО происходит при переходе на новый порог. При приближении к уровню чувствительности ШО увеличивается до 300%.

Для синусного импульса. Максимальная СО измерения длительности синусного импульса при шаге квантования 3 дБ составляет 150%. Ошибка смещена в отрицательную область и имеет постоянную составляющую на уровне минус 60%, разброс от этого значения составляет $\pm 25\%$. В данном случае, имеет место систематическая ошибка метода измерения. При шаге квантования 12 дБ график ошибки смещается к нулю, а СО достигает 90%. ШО измерения длительности синусного импульса до половины динамического диапазона измерителя близка к 0%, далее монотонно увеличивается до 24%. Шаг квантования влияет только на положения моментов перехода на новый порог и как следствие, на положения выбросов на графике.

Для синус-квадратного импульса. СО измерения длительности синус-квадратного импульса при шаге квантования 3 дБ аналогична синусному импульсу. При шаге квантования 12 дБ ошибка смещается в сторону положительной области и увеличивается до 80%. ШО измерения длительности синус-квадратного импульса в большей части динамического диапазона составляет не более 30% и монотонно увеличивается до 200% при приближении к уровню чувствительности. Численно ШО одинакова для всех значений шага квантования.

Для импульса с провалом на вершине. Максимальная СО измерения длительности импульса с провалом на вершине составляет 75% и имеет характерный П-образный вид, обусловленный ложными срабатываниями измерителя по первому горбу. При увеличении шага квантования ошибка не изменяется, меняются только положения выбросов. ШО измерения длительности импульса с провалом на вершине отличается от остальных импульсов видом скачка при переходе на другой порог, это обусловлено

наложением 2-х факторов: стремлением к ∞ ШО при попадании порога в точку с нулевой крутизной и ложным срабатыванием измерителя по первому горбу. При шаге квантования 3 дБ ШО достигает 50%, при увеличении шага ошибка уменьшается и становятся видны области ложных срабатываний измерителя.

Для двухэкспоненциального импульса. СО измерения длительности двухэкспоненциального импульса при шаге квантования 3 дБ смещена в отрицательную область, т.е. имеет постоянную составляющую минус 40%, разброс от этого значения $\pm 20\%$. При шаге 12 дБ ошибка симметрична относительно нуля и составляет 50%. ШО измерения длительности двухэкспоненциального импульса в диапазоне амплитуд 0 дБ до -48 дБ монотонно возрастает от 0 до 32%, при приближении к уровню чувствительности имеет выбросы. При переходе на больший шаг квантования погрешность уменьшается, но 10% и между переходами с одного порога на другой имеет участки без изменения значения ошибки.

Для импульса с осцилляциями на вершине и после среза. СО измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза лежит в пределах от 5% до 90%, и в среднем составляет 65% и имеет форму меандра со скачкообразными переходами с положительных в отрицательные значения и обратно. При приближении к уровню чувствительности СО резко увеличивается до 90% при шаге квантования 3 дБ. Это обусловлено ложными срабатываниями пороговых устройств в зоне осцилляции на вершине импульса. При увеличении шага квантования до 12 дБ СО по прежнему имеет ошибку до 90%, однако основная часть СО сосредоточена в пределах 30%. Ошибка в основном сосредоточена выше нуля и уходит в отрицательную область при приближении к уровню чувствительности, а также при превышении амплитуды осцилляции на вершине импульса над шагом квантования. Очевидно, что при дальнейшем увеличении шага квантования можно получить СО без соответствующих выбросов в отрицательную область. Максимальное значение ШО измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине составляет 24% при минимальном уровне сигнала и ступенчато спадает до нуля при увеличении амплитуды сигнала. При этом ШО имеет выбросы до 30%, при минимальном уровне сигнала. Формирование выбросов на графиках шумовой ошибки в зоне амплитуд до минус 48 дБ обусловлены попаданием момента срабатывания верхнего порога измерителя на первый выброс осцилляции на вершине импульса - зону с минимальной крутизной.

Основные численные результаты расчетов систематической погрешности приведены в таблице 2.1

Основные численные результаты расчетов шумовой ошибки приведены в таблице 2.2

Таблица 2.1. Систематическая погрешность

Тип импульса	Измеритель 1 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отсутствующих порогов			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	6±5	[-40..+5]	10±10	[-40..+20]
Экспоненциальный	7±8	[-75..+10]	30±25	[-85..+50]
Гауссовский	[-25..+90]	[-90..+25]	[-25..+120]	[-90..+48]
Экспоненциально-степенной	-30±25	[-75..-25]	-0±50	[-80..+50]
Синусный	-60±25	[-150..-35]	-40±50	[-150..+15]
Синус-квадратный	-70±20	[-160..-30]	-50±45	[-160..+30]
Импульс с провалом на вершине	-30±35	[-90..+5]	-30±35	[-80..+15]
Двухэкспоненциальный	-40±20	-40±20	0±60	0±60
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	-30±40,с	-50±40	[-60..+30],с	[-90..+20],с

Таблица 2.2. Шумовая ошибка

Тип импульса	Измеритель 1 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпущивших порогов			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	[10..0],м	[35..10],м	[10..0],м	[35..10],м
Экспоненциальный	[25..0],м,*	[25..300],м,*	[25..0],м,*	[25..300],м,*
Гауссовский	[30..10],п,*	[30..200],п,*	[33..10],п,*	[33..200],п,*
Экспоненциально-степенной	[30..0],п,*	[30..300],п,*	[25..0],п,*	[25..300],п,*
Синусный	[24..0],п,*	[24..150],п,*	[22..0],п,*	[22..150],п,*
Синус-квадратный	[30..0],п,*	[30..200],п,*	[30..0],п,*	[30..200],п,*
Импульс с провалом на вершине	[50..0],п,*	[50..150],п,*	[15..0],п,*	[15..150],п,*
Двухэкспоненциальный	[32..0],п,*	[32..200],п,*	[25..0],п,*	[25..200],п,*
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	[6..0],м,п,*	[6..30],м,п,*	[6..0],м,п,*	[6..30],м,п,*

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

$XX \pm X$ - среднее значение величины и разброс;

[XX...XX] - диапазон изменения величины;

* - наличие выбросов;

п - пилообразный характер;

м - монотонно;

с - ступенчатый характер.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что многопороговый измеритель длительности с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов наиболее пригоден для измерения длительности импульсов симметричной формы. Недостатком такого алгоритма формирования нормированного импульса является то, что наличие даже небольших выбросов на вершине импульса может привести к значительной погрешности в формировании нормированного импульса. А попадание порога на вершину импульса приводит к значительному скачкообразному увеличению случайной ошибки измерения длительности.

Основные результаты данной главы опубликованы [28,30,31,94,95].

Методика оценки погрешности измерения длительности алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения различных типов импульсов позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителя длительности импульсов изделия МП-405, что отмечено в акте внедрения (приведены в приложении).

3 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО НИЖНЕМУ И ВТОРОМУ СВЕРХУ ИЗ ОТПУСТИВШИХ ПОРОГОВ

3.1 Анализ алгоритма формирования нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов многопорогового измерителя длительности

Для уменьшения влияния искажений на вершине импульса формирование среза нормированного импульса необходимо проводить по второму сверху из сработавших порогов. Многопороговый измеритель длительности с формированием длительности по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов лишен этого недостатка. Данный алгоритм формирования нормированного импульса частично описан в работе [37]. Рассмотрим его более подробно.

Данный измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов, исключает ошибку измерения в случае затянутого среза измеряемого импульса, а также ошибку, связанную с провалом на вершине импульса.

Структурная схема измерителя приведена на рисунке 2.1.

На рисунке 3.1 показаны эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя. Измеритель работает следующим образом: измеряемый импульс поступает на вход измерителя длительности и далее на все пороговые устройства (рисунок 3.1.а). Уровни срабатывания пороговых устройств расположены в логарифмическом масштабе по динамическому диапазону измерителя. В зависимости от формы и амплитуды импульса срабатывает определенное количество ПУ, триггеры формируют временные ворота (рисунки 3.1.б-е), соответствующие длительности входного импульса по уровню ПУ. Отклики от триггеров поступают на вход логического устройства, где формируется нормированный импульс согласно выбранному методу (рисунок 3.1.ж). Нормированный импульс попадает на измеритель длительности, где заполняется счетными импульсами и производится их подсчет.

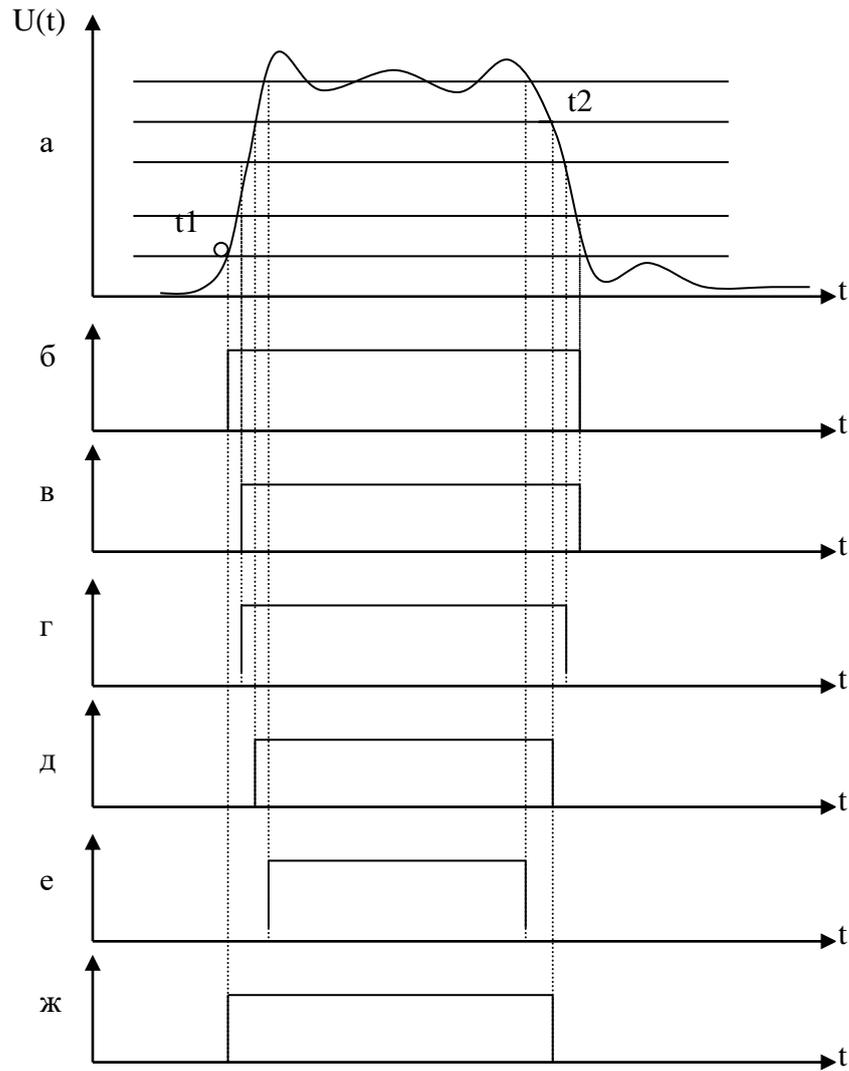


Рисунок 3.1 Эпюры напряжений

На рисунке 3.1.а показан измеряемый импульс и характерные точки формирования фронта и среза нормированного импульса. На рисунках 3.1.б-3.1.е показаны сформированные импульсы по каждому порогу. На рисунке 3.1.ж – искомый нормированный импульс.

Пусть U_0 – уровень самого чувствительного порога, N – шаг квантования амплитуды, тогда уровень i -го порога определяется по формуле (2.1):

$$U_i = U_0 \cdot N^i,$$

Моменты срабатывания и отпускания порога с уровнем $U_{пор}$, при поступлении на вход порогового устройства сигнала $U_{вх}(t)$ можно записать:

$$U_{вх}(t) = U_{пор} \cdot \quad (3.1)$$

Номер первого сверху из сработавших порогов при амплитуде входного сигнала U_m будет равен:

$$k = \text{floor} \left(\log_N \left(\frac{U_m}{U_0} \right) \right) - 1,$$

В выражении $\text{floor}(x)$ – функция выделения целой части из числа x .

Амплитуда срабатывания первого порога будет равна:

$$U_k = U_0 \cdot N^{\text{floor} \left(\log_N \left(\frac{U_m}{U_0} \right) \right) - 1} \quad (3.2)$$

Измеренная длительность импульса равна

$$\tau_{\text{изм}} = t_{\text{кизм}} - t_{\text{низм}}, \quad (3.3)$$

где $t_{\text{низм}}$ – момент времени срабатывания самого чувствительного порога;

$t_{\text{кизм}}$ – момент времени отпускания второго сверху из сработавших порогов.

Измеренная длительность находится из уравнений (2.5), (2.6), и определяется моментами срабатывания самого чувствительного порога и момент отпускания второго сверху порога.

Проведем расчет систематической и случайной погрешностей для девяти типов импульсов: трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, импульса с провалом на вершине, двухэкспоненциального импульса и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

3.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов

2.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса

Систематическая погрешность измерения длительности импульса определяется по формуле (2.9).

Пусть на вход измерителя поступает трапецеидальный импульс, описываемый функцией (1.7), рисунок 2.3.

Подставим в (2.5) уравнение (1.1):

$$U_0 = \frac{U_m(t)}{\tau f} t_1,$$

Подставим в (2.6) уравнение (1.1):

$$U_k(t) = \frac{U_m(t)}{\tau_s} (\tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s - t_2)$$

где τ_{ist} – истинная длительность импульса;

τ_f – длительность фронта;

τ_s – длительность среза;

U_m – максимальная амплитуда сигнала;

U_0 – уровень самого чувствительного порога

Решим уравнения (2.10), (2.11) относительно t :

$$t_{\text{низм}} = \frac{U_0}{U_m(t)} \tau_f,$$

$$t_{\text{клизм}} = 0.5 \left(\frac{-2 U_k(t) \tau_s + 2 U_m(t) \tau_{ist} + U_m(t) \tau_f + U_m(t) \tau_s}{U_m(t)} \right),$$

Тогда

$$\tau_{izm} = t_{\text{клизм}} - t_{\text{низм}}$$

Подставляя (2.12) в (2.9), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(U_m) = -\tau_f \frac{2U_0 - U_k}{-2U_k \cdot \tau_s + 2U_m \cdot \tau_{ist} + U_m \cdot \tau_s - U_k \cdot \tau_f}$$

U_k – определяется выражением (2.3), следовательно систематическая погрешность формирования для трапецеидального импульса зависит от шага квантования и отношения амплитуды импульса к уровню самого нижнего порога.

На рисунке 3.2 и рисунке 3.3 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

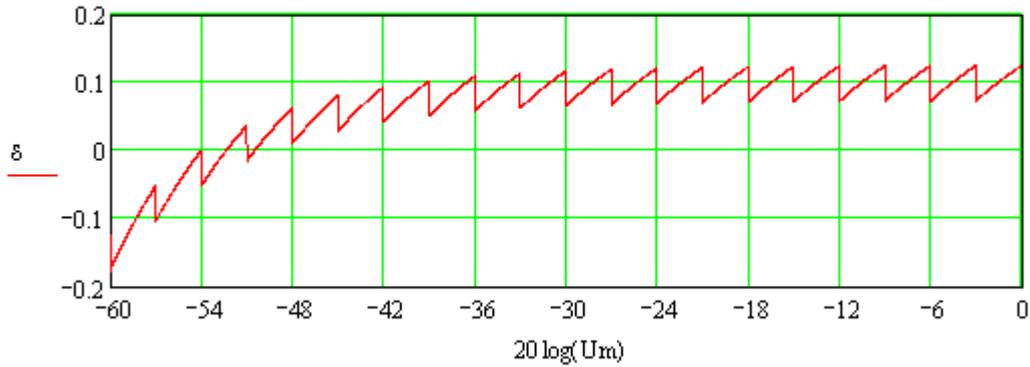


Рисунок 3.2 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

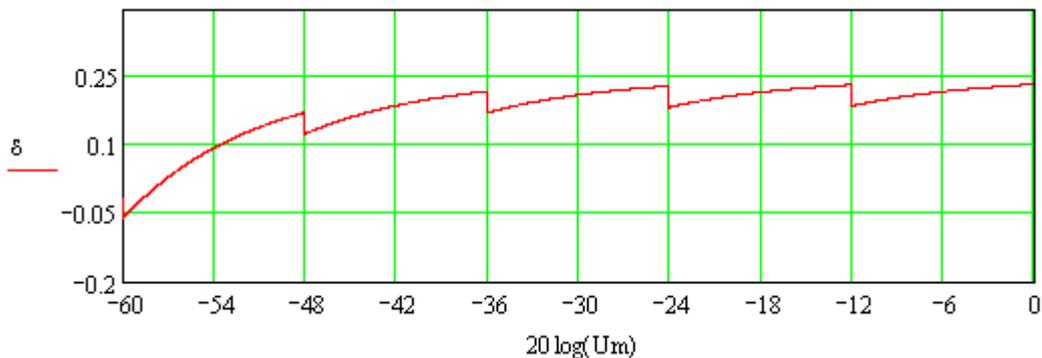


Рисунок 3.3 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса

Результаты, изложенные в п.3.2.2–3.2.8 и п. 3.3.2-3.3.8, ранее опубликованы в работе [6] и приведены для дальнейшего сопоставительного анализа измерителей длительности.

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциальный импульс, описываемый функцией (1.8), рисунок 2.6

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.8), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \cdot \left(1.1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right);$$

$$U_k = U_m \cdot \left(1.1 - \exp\left(\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}\right) \right) \cdot \exp\left(\frac{-(t-\tau_{ist})}{\tau_2}\right).$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{низм}$ порога и отпускания второго сверху порога $t_{кизм}$:

$$t_{низм} = -\ln\left(-\frac{10U_o - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1;$$

$$t_{кизм} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2.$$

Из приведенного уравнения определяем измеренную длительность импульса

$$\tau_{izm} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 + \ln\left(-\frac{10U_o - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1$$

Систематическая погрешность измерения длительности экспоненциального импульса будет равна:

$$\delta(U_m) = 1 - \ln\left(\frac{-10U_k}{U_m \left(-11 + 10e^{\frac{-\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \frac{\tau_2}{\tau_{ist}} + \ln\left(-\frac{10U_o - 11U_m}{U_m}\right) \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{ist}} - 1$$

Графики зависимости систематической погрешности формирования длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ приведены на рисунках 3.4, 3.5

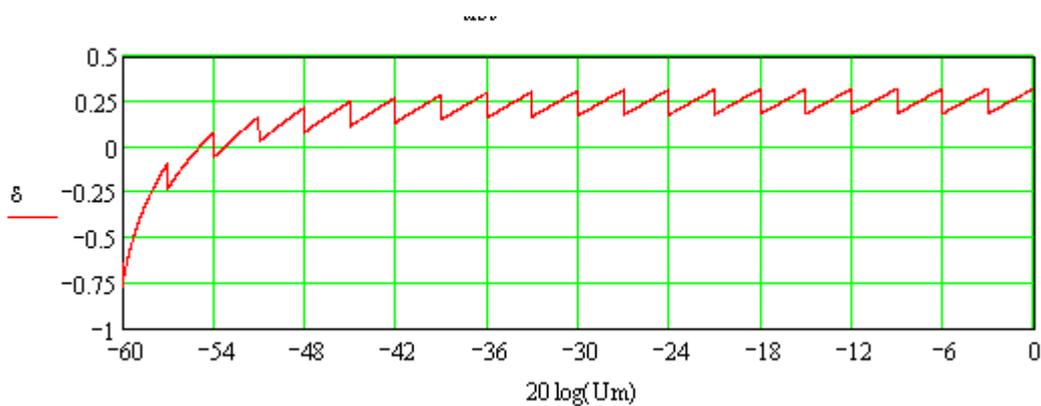


Рисунок 3.4 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

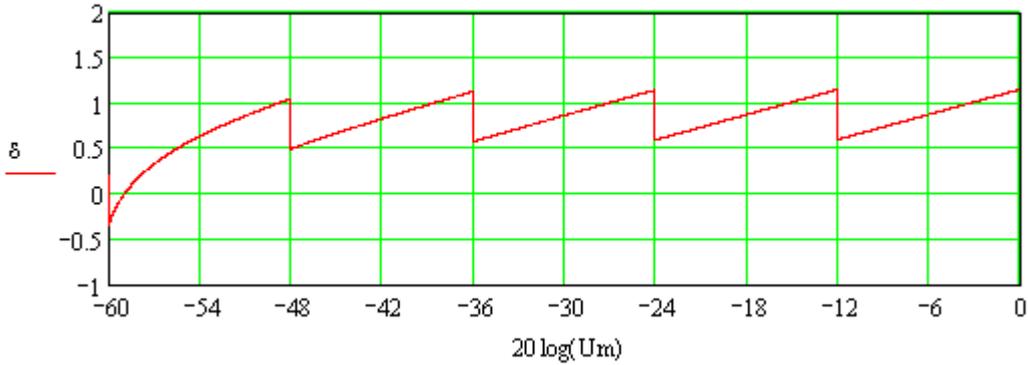


Рисунок 3.5 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса

Пусть на вход измерителя поступает гауссовский импульс, описываемый функцией (1.9), рисунок 2.9.

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.9), получаем уравнения:

$$U_m \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{t}{\tau_{уст}}\right)^2\right) = U_0,$$

$$U_m \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{t}{\tau_{уст}}\right)^2\right) = U_k.$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{низм}$ порога и отпускания второго сверху порога $t_{кизм}$:

$$t_{низм} = -\frac{\tau_{ист}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}},$$

$$t_{кизм} = \frac{\tau_{ист}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}.$$

Из приведенного уравнения определяем измеренную длительность импульса

$$\tau_{изм} = \frac{\tau_{ист}}{2\sqrt{\ln(2)}} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right)} - \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right)} \right].$$

Систематическая погрешность измерения длительности гауссовского импульса будет равна:

$$\delta(U_m) = \frac{1}{2\sqrt{\ln(2)}} \left[\sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right)} - \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_0}\right)} \right].$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 3.6, 3.7.

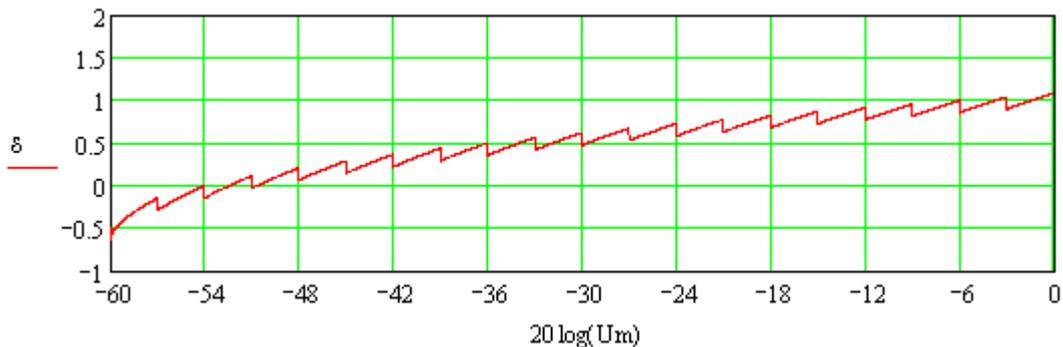


Рисунок 3.6 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

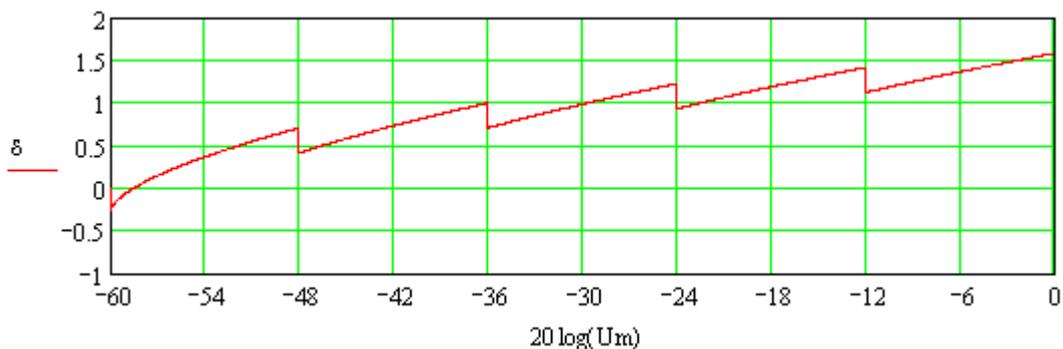


Рисунок 3.7 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.4 Систематическая погрешность измерения экспоненциально-степенного импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциально-степенной импульс, описываемый функцией (1.10), рисунок 2.12.

Подставляя выражение (1.10) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \exp \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^n,$$

$$U_k = U_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^n \exp \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^n.$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания второго сверху порога $t_{\text{квизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 3.8 – 3.11 для различных значений параметра m и шага квантования.

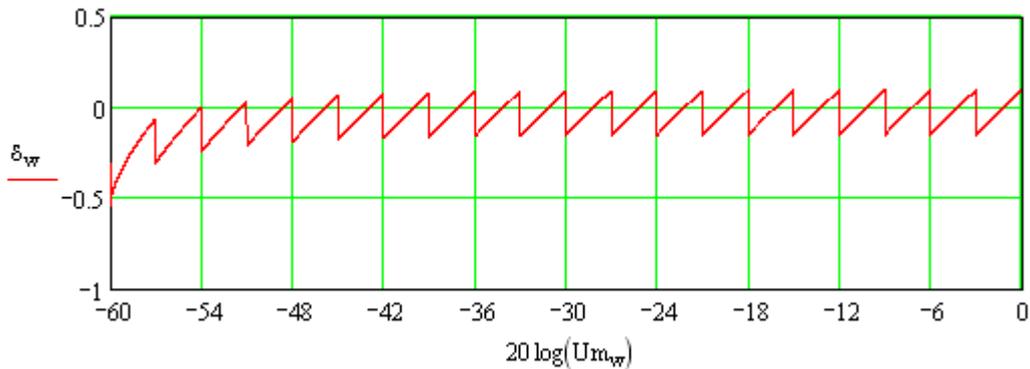


Рисунок 3.8 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

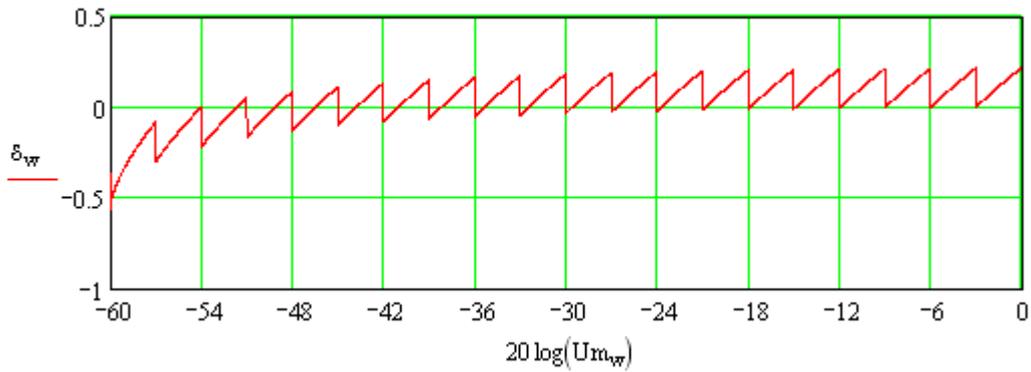


Рисунок 3.9 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

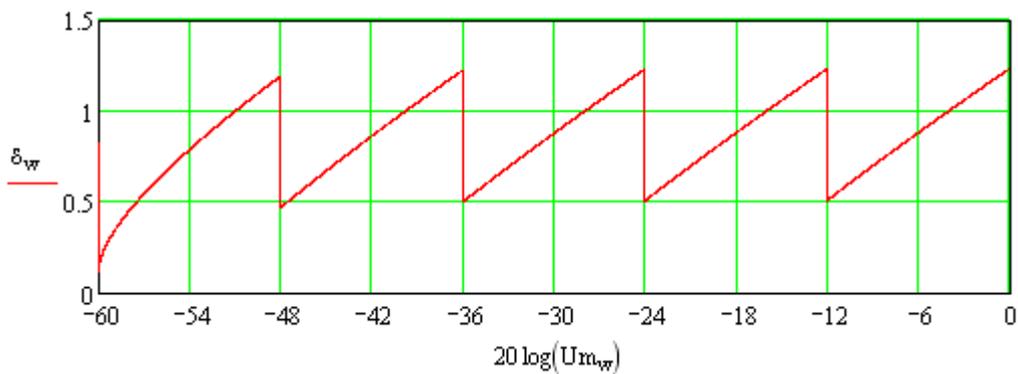


Рисунок 3.10 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

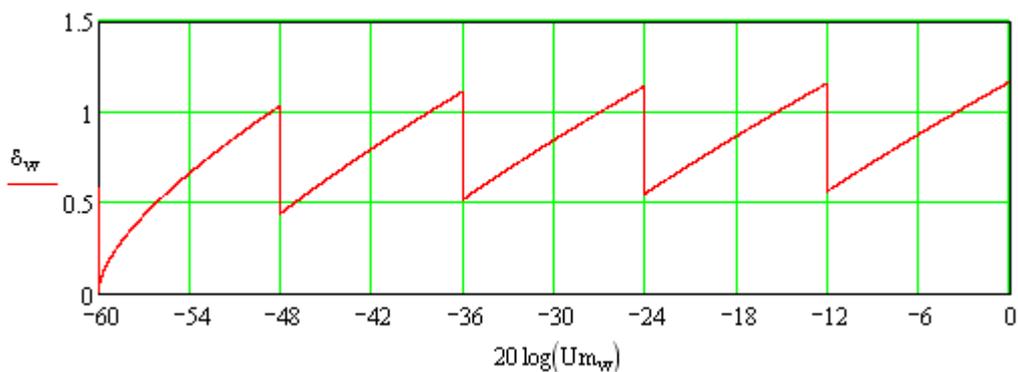


Рисунок 3.11 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синусный импульс, описываемый функцией (1.11), рисунок 2.16.

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.11), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin(2\pi t / (3\tau_{\text{ист}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 1,5\tau_{\text{ист}} \\ 0 & \text{при } t > 1,5\tau_{\text{ист}}; \end{cases} ;$$

$$U_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin(2\pi t / (3\tau_{\text{ист}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 1,5\tau_{\text{ист}} \\ 0 & \text{при } t > 1,5\tau_{\text{ист}}. \end{cases} .$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$:

$$t_{\text{низм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right),$$

$$t_{\text{квизм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) \right).$$

Измеренная длительность импульса определяется следующим выражением:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{3\tau_{\text{ист}}}{2\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) - \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right) \right].$$

Систематическая погрешность измерения длительности синусного импульса

$$\delta(U_m) = \frac{3}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} - \arcsin\left(\frac{U_k}{U_m}\right) - \arcsin\left(\frac{U_0}{U_m}\right) \right].$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ приведены на рисунках 3.12 и 3.13.

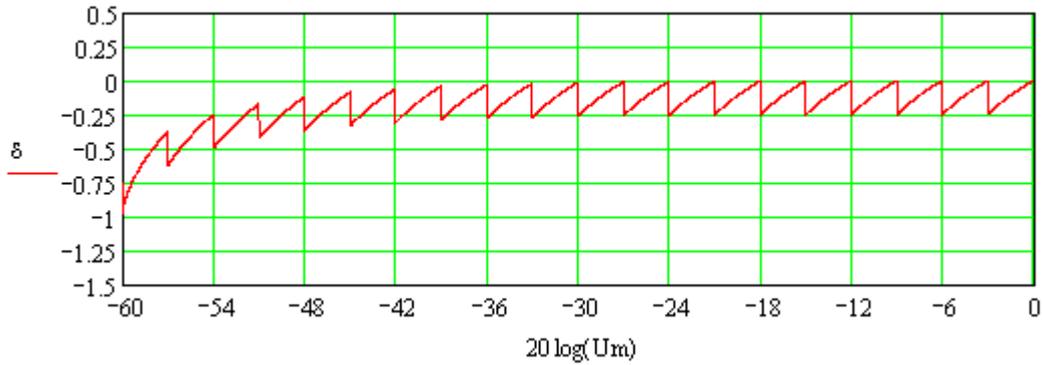


Рисунок 3.12 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

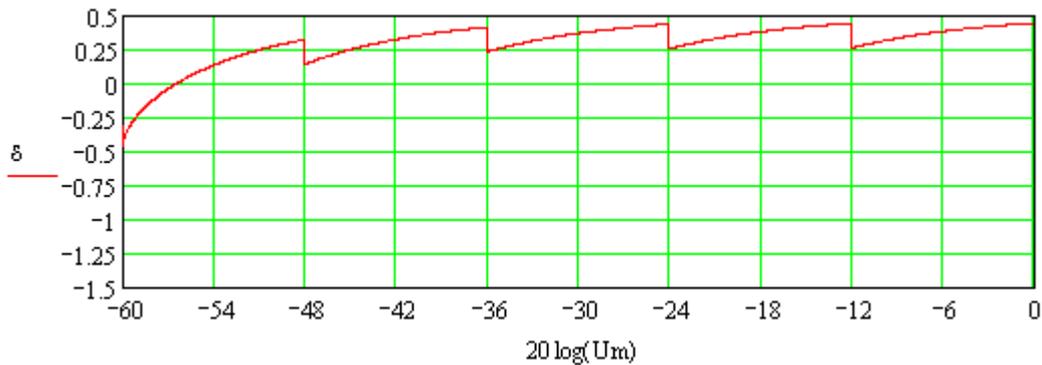


Рисунок 3.13 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квадратного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синус-квадратный импульс, описываемый функцией (1.12), рисунок 2.19.

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.12), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin^2(\pi/(2\tau_{\text{исм}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{исм}} \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{исм}}; \end{cases} ;$$

$$U_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ U_m \cdot \sin^2(\pi t / (2\tau_{\text{исм}})) & \text{при } 0 \leq t \leq 2\tau_{\text{исм}} \\ 0 & \text{при } t > 2\tau_{\text{исм}}. \end{cases}$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$:

$$t_{\text{низм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right),$$

$$t_{\text{квизм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) \right].$$

Запишем измеренную длительность импульса:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{2\tau_{\text{ист}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right) \right].$$

Тогда систематическая погрешность измерения длительности синус-квадратного импульса

$$\delta(U_m) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_k}{U_m}}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_0}{U_m}}\right) \right].$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ приведены на рисунках 3.14 и 3.15.

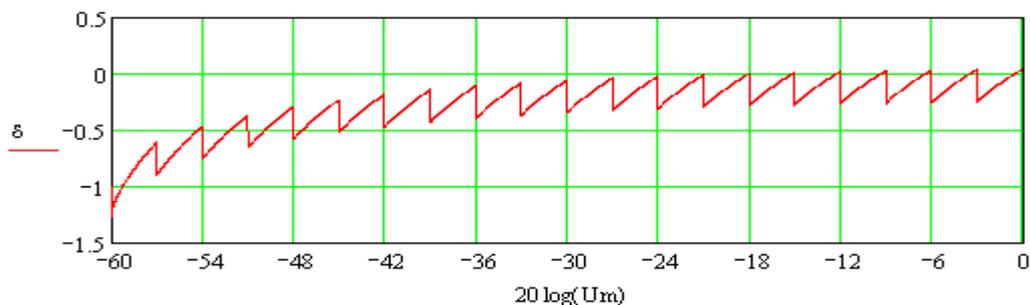


Рисунок 3.14 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{ дБ}$.

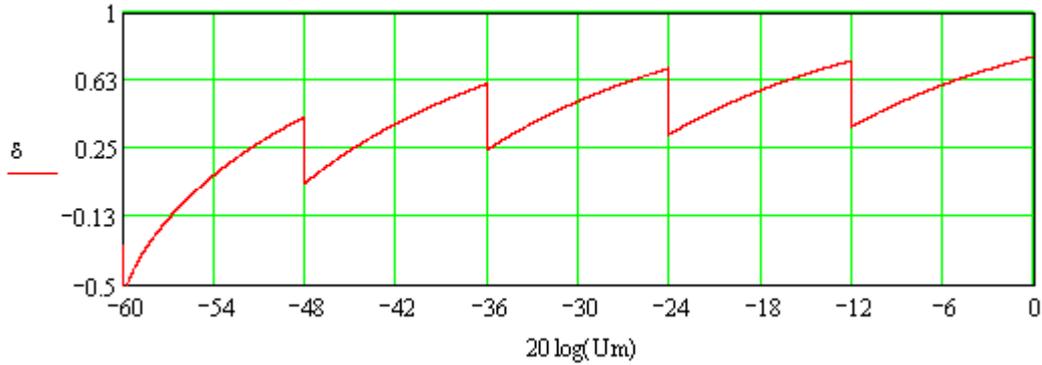


Рисунок 3.15 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.7 Систематическая погрешность измерения импульса с провалом на вершине

Пусть на вход измерителя поступает импульс с провалом на вершине, описываемый функцией (1.13), рисунок 2.22.

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя в (2.5) и (2.6) выражение (1.13), получаем уравнения:

$$U_0 = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ U_m \frac{3}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) \right], & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{осн}}, \\ 0, & \text{при } t > \tau_{\text{осн}} \end{cases}$$

$$U_k = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0 \\ U_m \frac{3}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi t}{\tau_{\text{осн}}}\right) \right], & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{осн}}, \\ 0, & \text{при } t > \tau_{\text{осн}} \end{cases}$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания второго сверху порога $t_{\text{кизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 3.16 и 3.17 для значений шага квантования 3 дБ, 12 дБ.

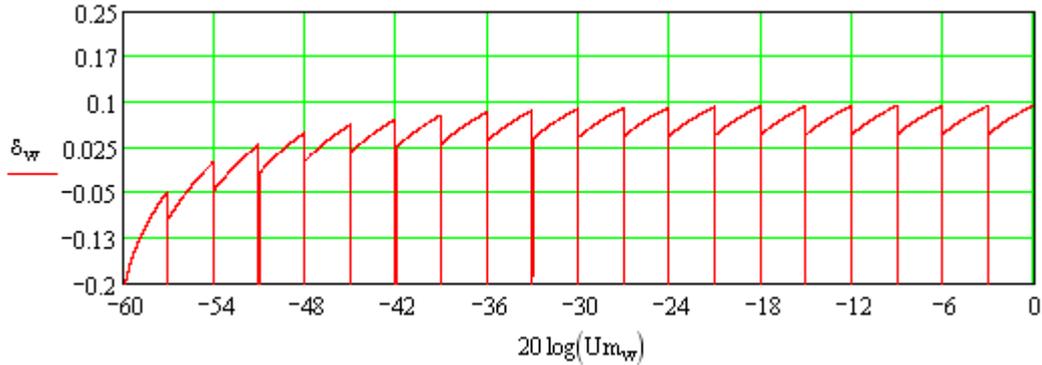


Рисунок 3.16 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

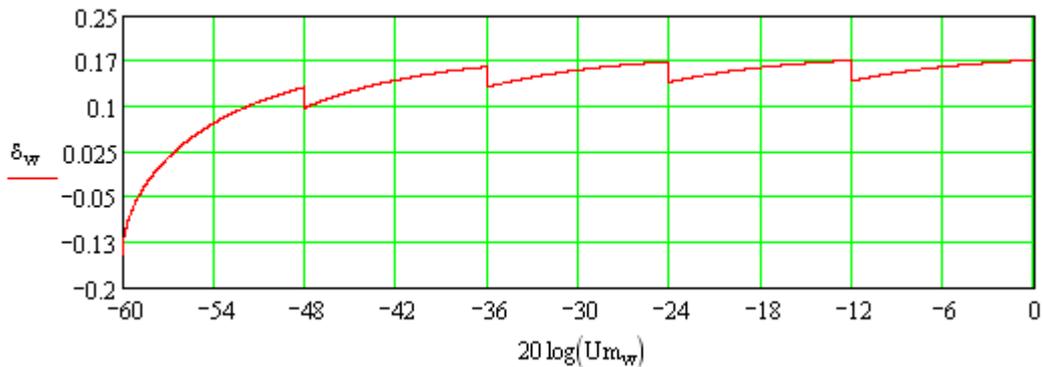


Рисунок 3.17 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.8 Систематическая погрешность измерения двухэкспоненциального импульса

Двухэкспоненциальный импульс, описываемый функцией (1.14), рисунок 2.25, поступает на вход измерителя.

Рассчитаем измеренную длительность импульса.

Подставляя выражение (1.14) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения:

$$U_0 = U_m \cdot K \cdot (e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t}),$$

$$U_k = U_m \cdot K \cdot (e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t})$$

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания второго сверху порога $t_{\text{квизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ изображены на рисунках 3.18 – 3.19.

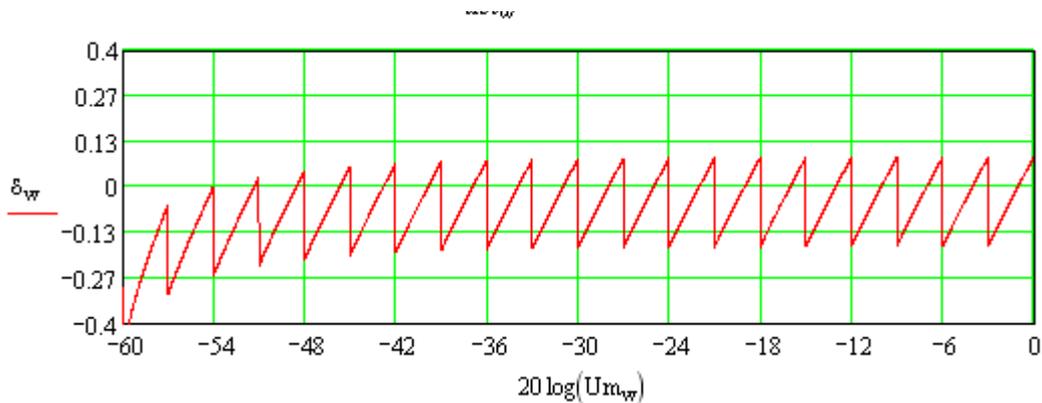


Рисунок 3.18 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

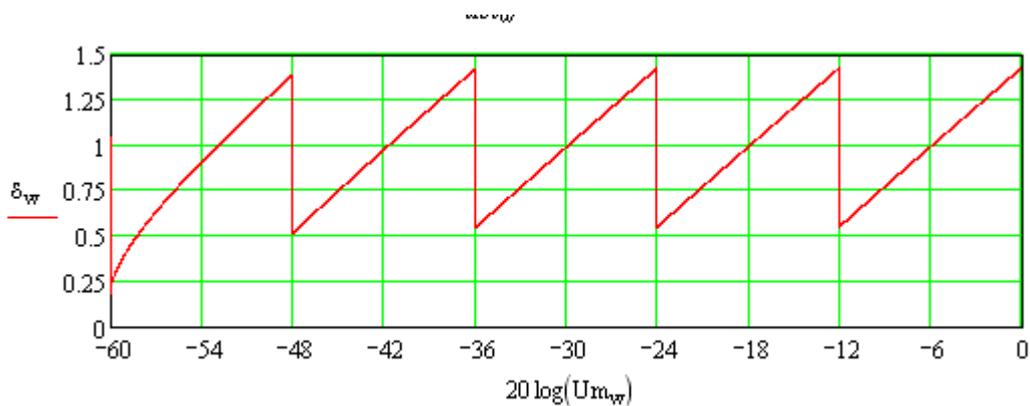


Рисунок 3.19 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.2.9 Систематическая погрешность измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94]

Пусть на вход измерителя поступает импульс с осцилляциями на вершине и после среза, описываемый функцией (1.15), рисунок 2.27.

Определим измеренную длительность импульса.

Подставляя выражение (1.15) в выражения (2.5) и (2.6), получаем уравнения, описывающие моменты срабатывания порогов.

Решая эти уравнения, находим моменты срабатывания самого чувствительного $t_{\text{низм}}$ порога и отпускания первого сверху порога $t_{\text{квизм}}$. Поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ изображены на рисунках 3.20, 3.21.

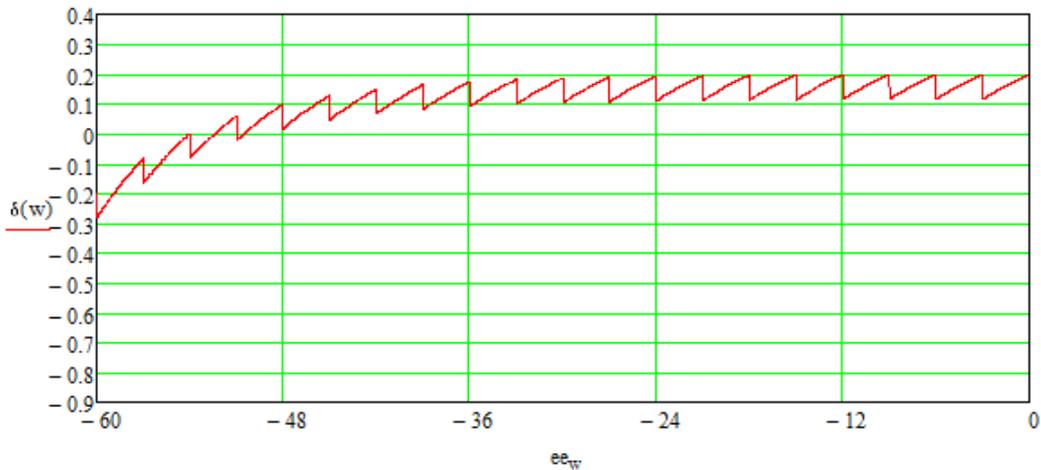


Рисунок 3.20 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

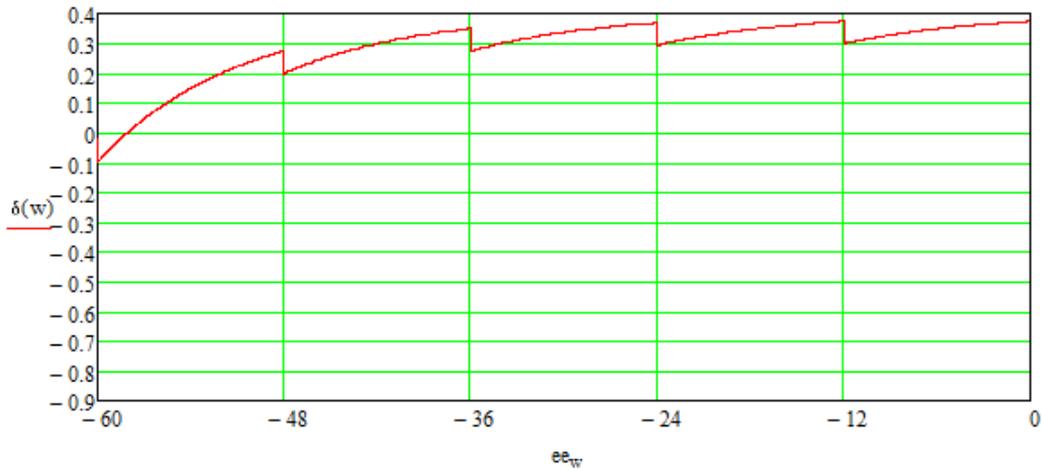


Рисунок 3.21 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

3.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с формированием нормированной длительности по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов

3.3.1 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса

Существенное влияние на моменты срабатывания и отпускания пороговых устройств многопорогового измерителя длительности оказывают шумы приемника. Методика расчета приведена в п.2.3.1.

Расчет случайной ошибке полностью совпадает с п. 2.3.2.

Суммарная ошибка равна:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2}} = \frac{\sigma_{ш}}{U_m} \sqrt{\tau_f^2 + \tau_s^2}$$

Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала, приведена на рисунке 3.22

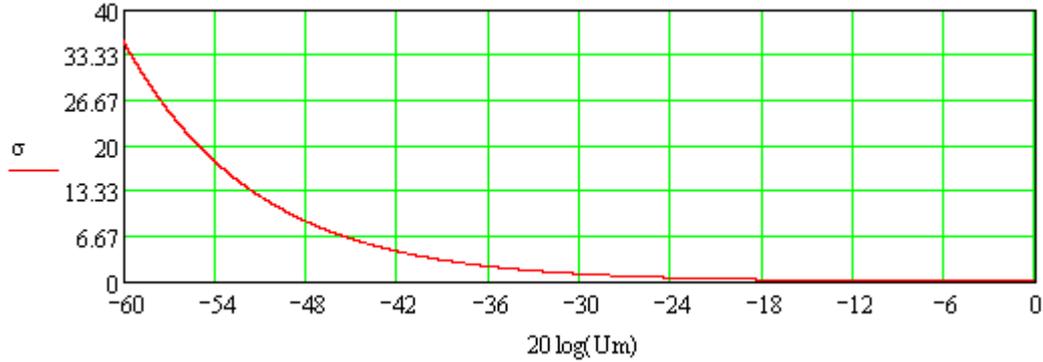


Рисунок 3.22 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала

Отличительной особенностью случайной ошибки трапецеидального импульса является то, что она не зависит от шага квантования, т.к. в формулу 2.15 не входит шаг квантования.

3.3.2 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса находим производную функции (1.8), описывающей его форму (2.19)

Моменты срабатывания самого чувствительного порога и отпускания первого сверху из сработавших порогов определяются выражениями (2.20), (2.21).

Подставляя выражения (2.20) и (2.21) в (2.19), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{клизм}}$.

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку (2.24):

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\tau_1^2}{(U_m - U_0)^2} - \frac{\tau_2^2}{U_k^2}}$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности экспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.24) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 3.23-3.25.

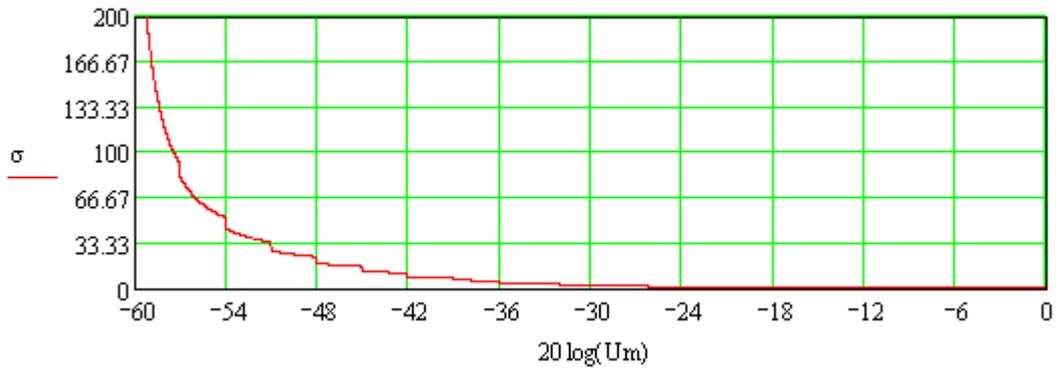


Рисунок 3.23 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

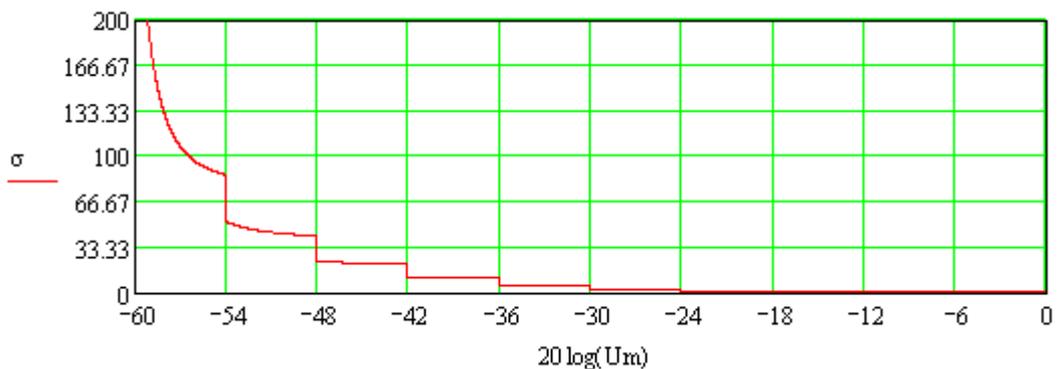


Рисунок 3.24 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

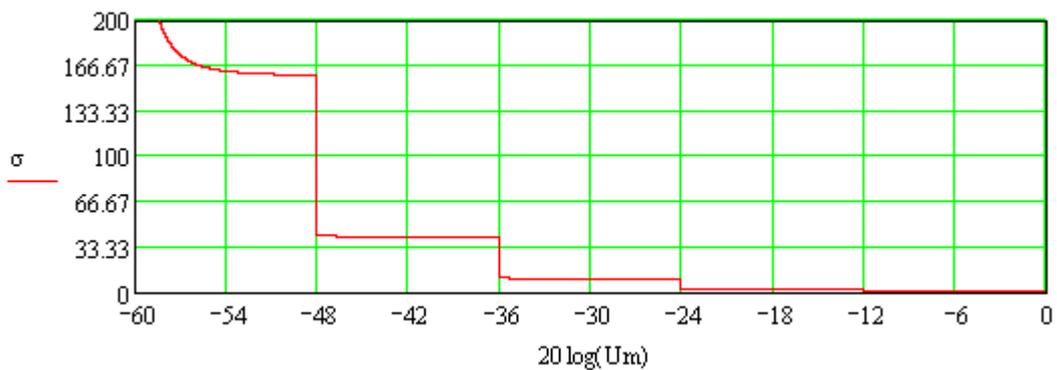


Рисунок 3.25 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.3 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса находим производную функции (1.9), описывающей его форму (2.25).

Подставляя выражения (2.5) и (2.6) для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания второго сверху из сработавших порогов, находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$, получим (2.26, 2.26).

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{\text{ш}} \tau_{\text{ист}}}{4\sqrt{\ln(2)}} \sqrt{\frac{1}{U_0^2 \ln(U_m/U_0)} + \frac{1}{U_k^2 \ln(U_m/U_k)}}.$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.28) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 3.26-3.28.

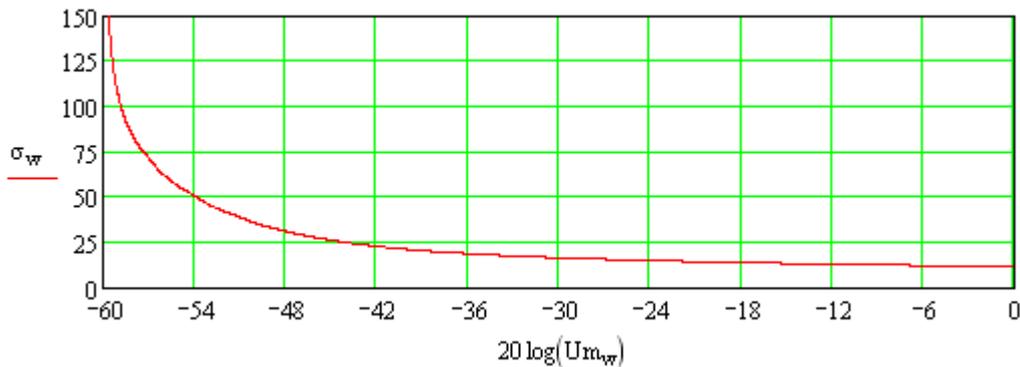


Рисунок 3.26 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

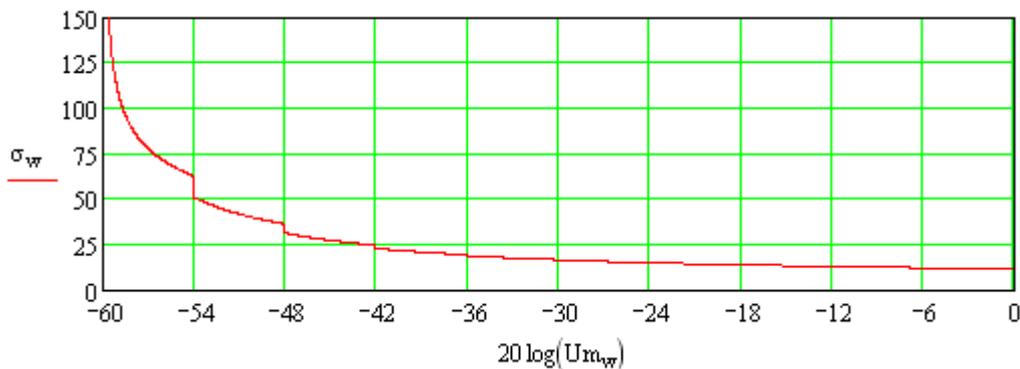


Рисунок 3.27 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

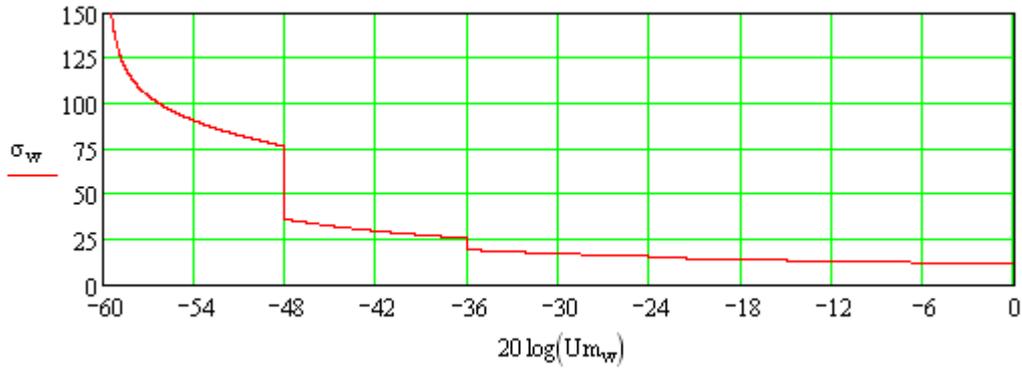


Рисунок 3.28 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.4 Случайная погрешность измерения экспоненциально-степенного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.10), описывающей его форму (2.29).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов от амплитуды входного сигнала при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 3.29-3.31.

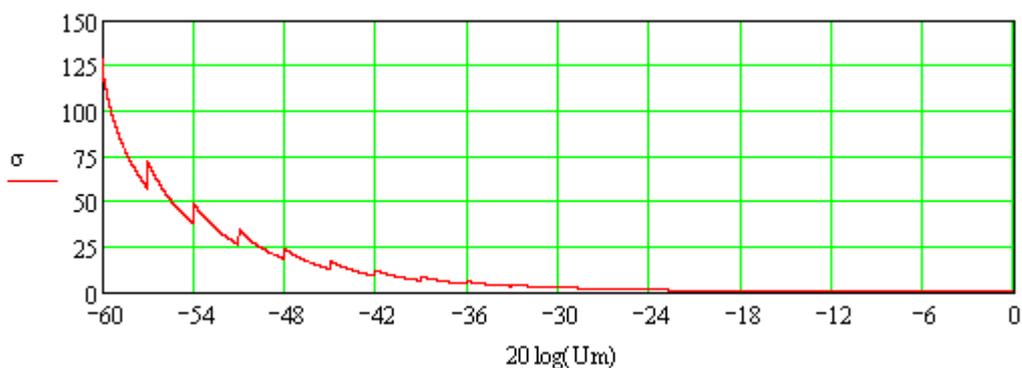


Рисунок 3.29 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

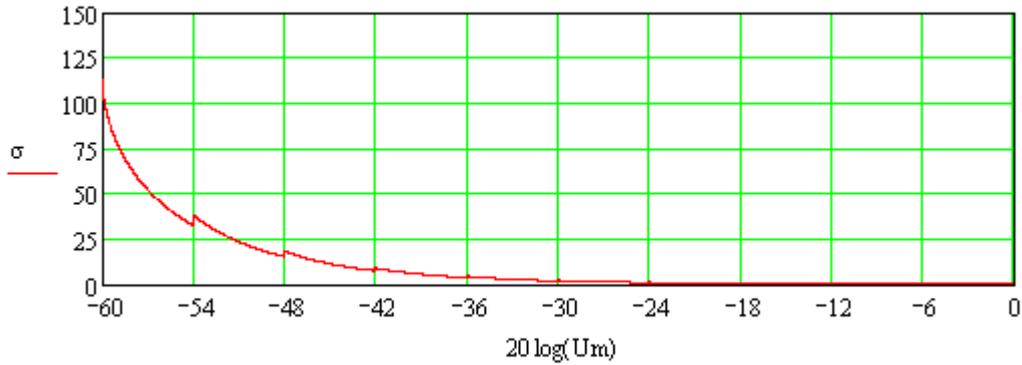


Рисунок 3.30 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

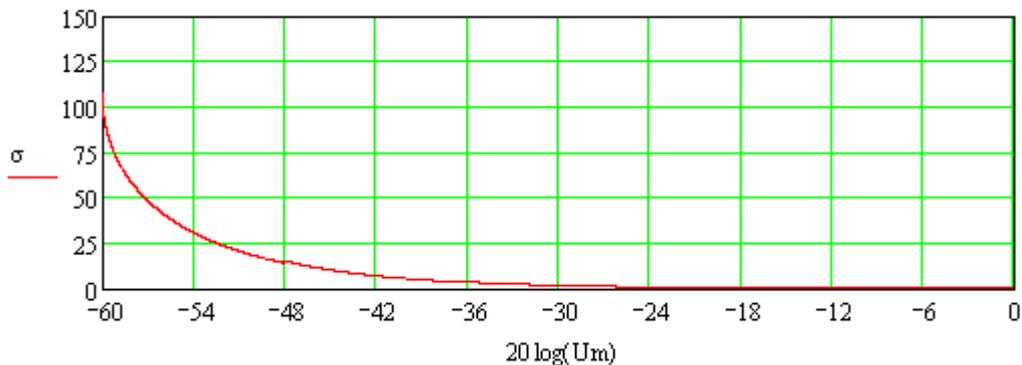


Рисунок 3.31 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.5 Случайная погрешность измерения синусного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса находим производную функции (1.11), описывающей его форму (2.30).

Подставляя выражения для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания первого сверху из сработавших порогов (2.5) и (2.6), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ (2.31, 2.32).

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку (2.33):

$$\sigma_{\tau} = \frac{3\tau_{\text{ист}}\sigma_{\text{ш}}}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{U_m^2 - U_0^2} + \frac{1}{U_m^2 - U_k^2}}$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.33) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 3.32-3.34.

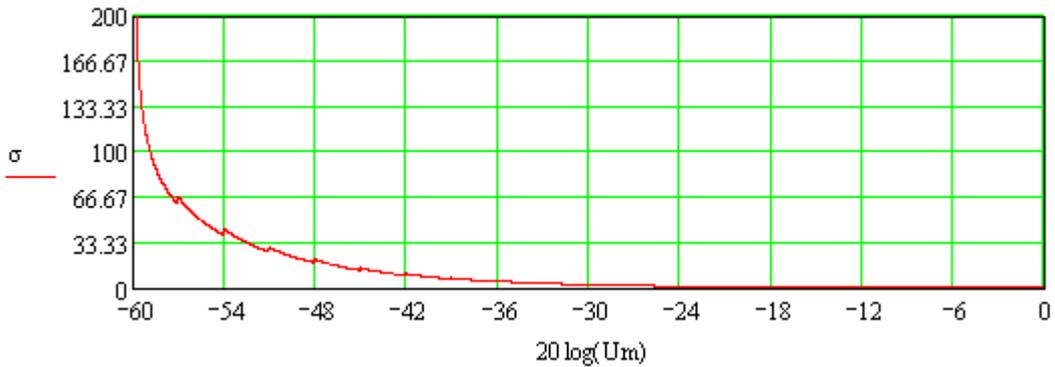


Рисунок 3.32 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

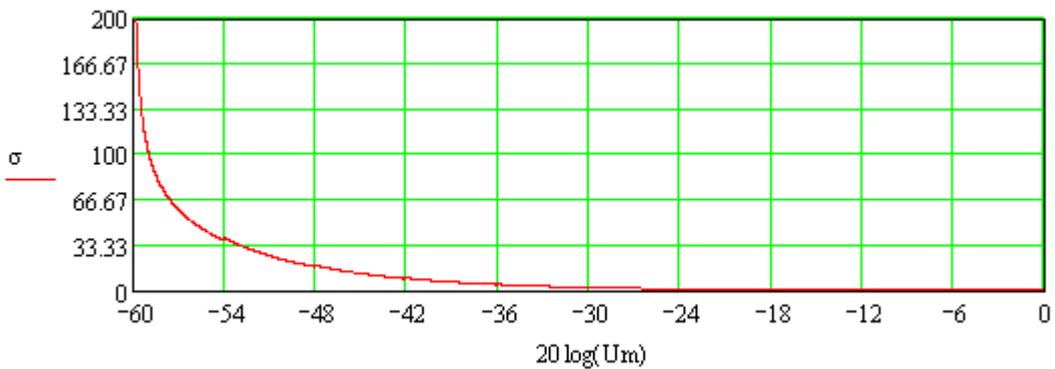


Рисунок 3.33 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

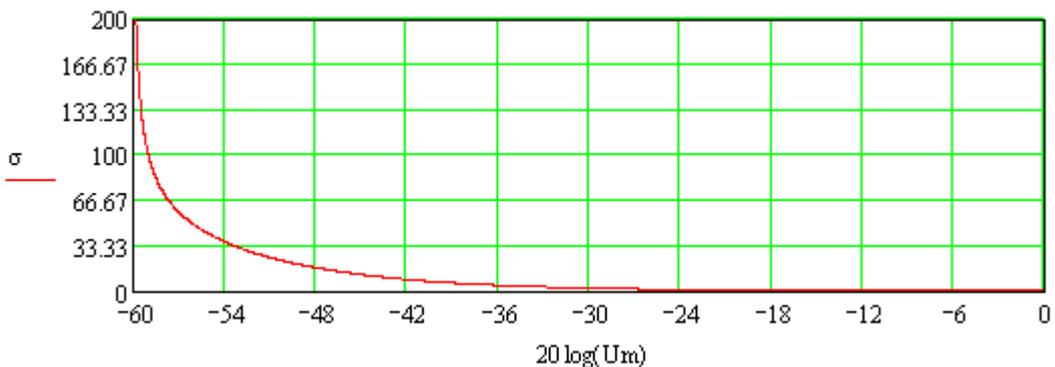


Рисунок 3.34 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.6 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса находим производную функции (1.12), описывающей его форму (2.34).

Подставляя выражения (2.5) и (2.6) для моментов срабатывания самого чувствительного порога и отпускания второго сверху из сработавших порогов, находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ (2.35, 2.36).

По формуле (2.17) находим суммарную ошибку (2.37):

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{\text{ш}} \tau_{\text{ист}}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{U_0(U_m - U_0)} + \frac{1}{U_k(U_m - U_k)}}.$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (2.34) при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 3.35-3.37.

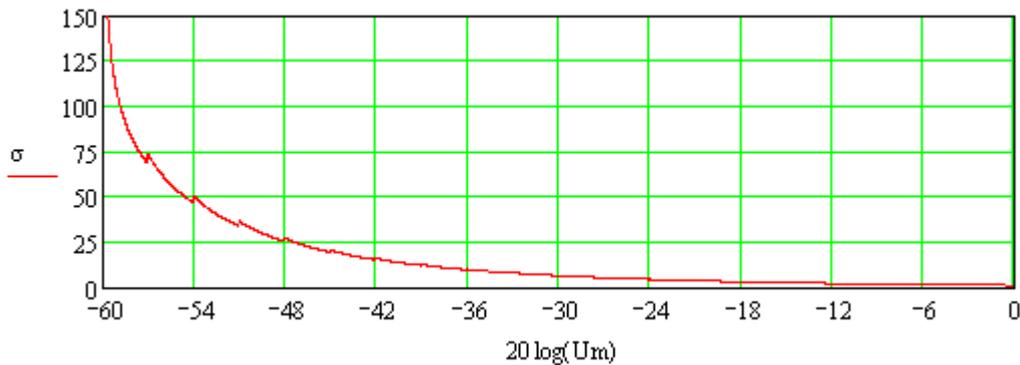


Рисунок 3.35 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

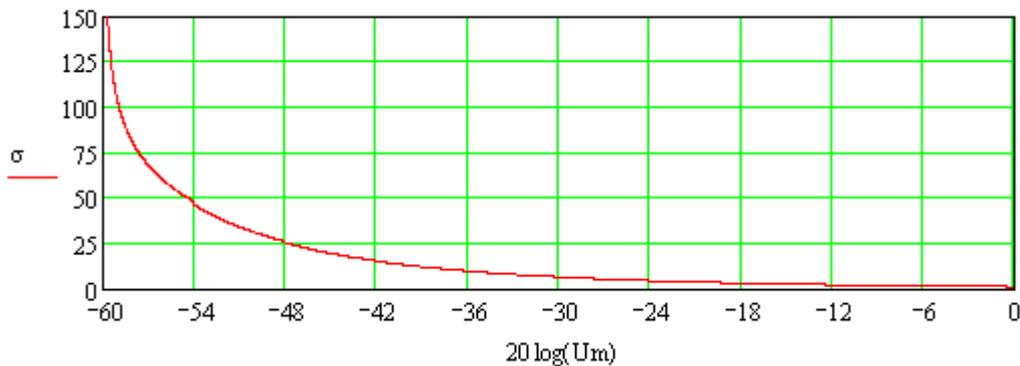


Рисунок 3.36 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

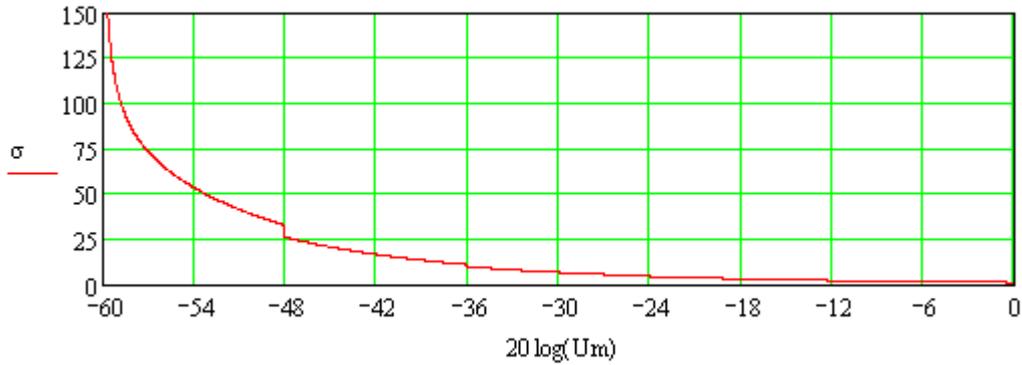


Рисунок 3.37 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.7 Случайная погрешность измерения импульса с провалом на вершине

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.13), описывающей его форму (2.38).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низ}}$ и $t_{\text{квиз}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульсов с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 3.38-3.40.

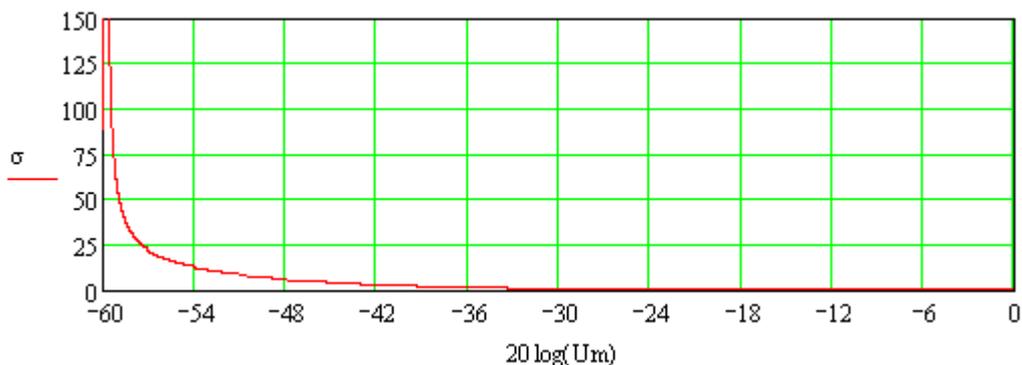


Рисунок 3.38 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

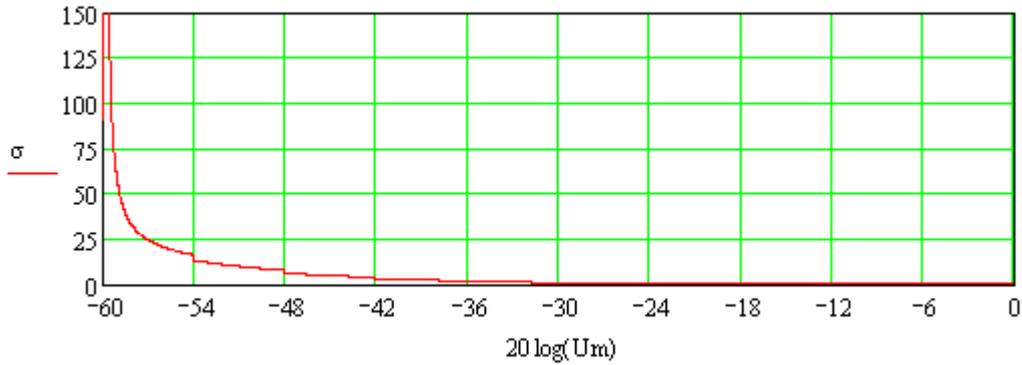


Рисунок 3.39 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

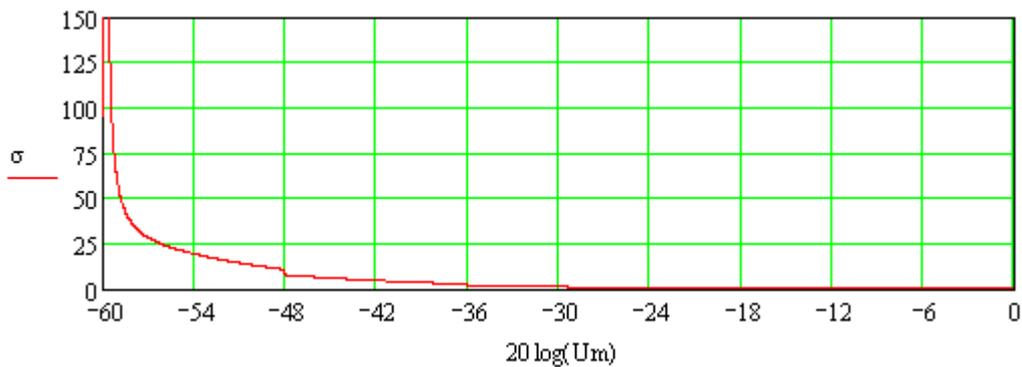


Рисунок 3.40 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.8 Случайная погрешность измерения двухэкспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.14), описывающей его форму (2.39).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 3.41-3.43.

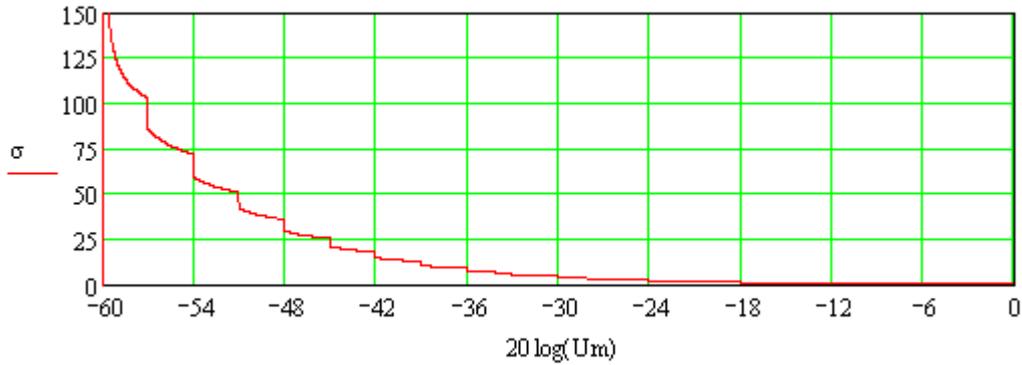


Рисунок 3.41 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

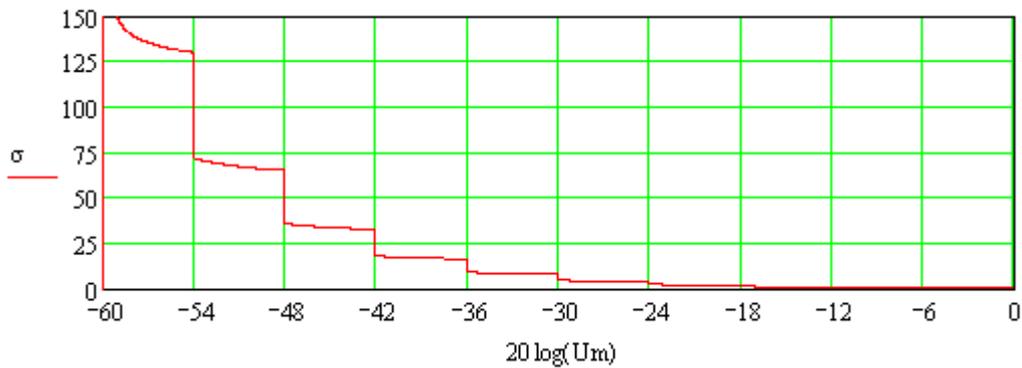


Рисунок 3.42 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

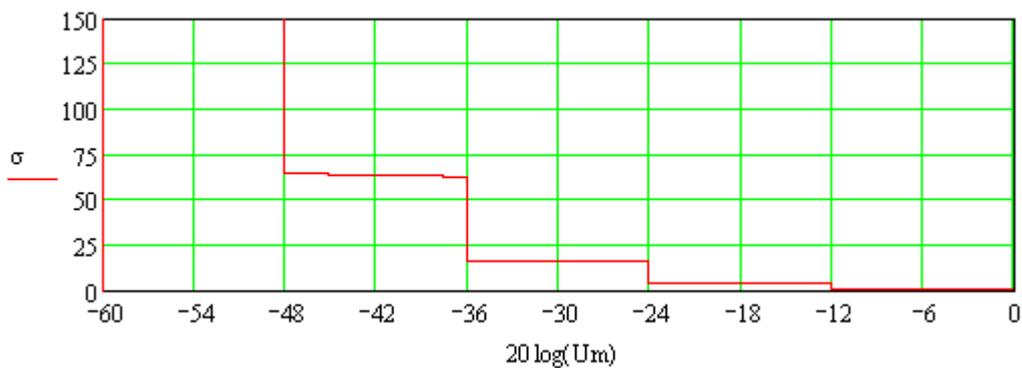


Рисунок 3.43 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

3.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95]

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза находим производную функции (1.15), описывающей его форму (2.40).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{клизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ не зависят от шага квантования и приведены на рисунке 3.44.

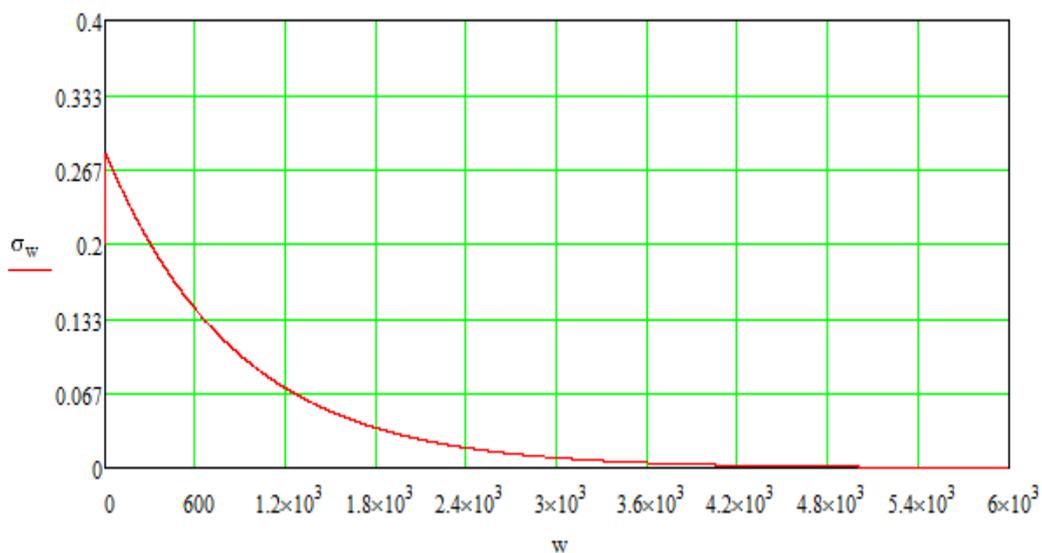


Рисунок 3.44 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3,6,12$ дБ

3.4 Выводы

В главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов в широком динамическом диапазоне для различных типов

импульсов. Обоснована структура измерителя длительности, реализующая предложенный многопороговый алгоритм измерения.

Аналитические выражения для погрешностей многопорогового измерителя позволили разработать методику расчета систематической и случайной составляющих погрешности многопорогового измерителя с формированием нормированного импульса по нижнему и второму из сверху отпущивших порогов для двух импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Приведены, известные ранее [33-43], результаты расчетов систематической и случайной погрешностей при работе по трапецеидальным, экспоненциальным, гауссовским, экспоненциально-степенным, синусным, синус-квадратным и двухэкспоненциальным импульсам и импульсу с провалом на вершине.

Оригинальными являются результаты исследования для импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Предложенная методика оценки ошибок измерения длительности импульсов для многопорогового алгоритма измерения с формированием длительности по нижнему и второму из сверху отпущивших порогов позволяет выявить следующие особенности.

Для трапецеидального импульса. Максимальная СО составляет 12% при шаге квантования 3 дБ и увеличивается до 24% с увеличением шага квантования 12 дБ. В основном, ошибка измерения сосредоточена относительно 8% и в большей части динамического диапазона имеет разброс 4% от этого значения. ШО монотонно возрастает до 35% с приближением к уровню чувствительности.

Для экспоненциального импульса. Максимальное значение СО составляет 26% и увеличивается при шаге квантования 12 дБ до 105%. В основном ошибка сосредоточена относительно $25\% \pm 3\%$ при шаге 3 дБ и $75\% \pm 30\%$ при шаге 12 дБ. ШО имеет ступенчатый характер и возрастает с приближением к уровню чувствительности до 200%, а в динамическом диапазоне до 48 дБ составляет не более 40%.

Для гауссовского импульса. СО монотонно возрастает с ростом амплитуды сигнала от -50 до +110% при шаге 3 дБ и от -50 до +150% при шаге 12 дБ. Максимальная ошибка составляет 100% и 150% для разных значений шага квантования. ШО имеет ступенчатый характер и возрастает с уменьшением сигнала до 50, 50, 75% при шаге 3,6,12 дБ соответственно, а также проявляется пилообразный характер, обусловленный порогами срабатывания.

Для экспоненциально-степенного импульса. СО составляет 10% мало меняется при изменении параметра n , при увеличении шага квантования ошибка увеличивается до 110%. ШО измерения длительности монотонно возрастает с уменьшением уровня сигнала и достигает 25% в диапазоне уровней сигнала до 48 дБ. Шаг квантования в данном случае не влияет на ШО, а определяет только положение переходов на другой порог, отмеченные незначительным увеличением ошибки.

Для синусного импульса. СО при шаге квантования 3 дБ составляет 25% сосредоточена в области минус 12%, имеет разброс $\pm 12\%$, при шаге 12 дБ – 30%, сосредоточена 35% и имеет разброс 5%. ШО монотонно возрастает до 18% в диапазоне входных сигналов до 48 дБ и не зависит от шага квантования, при приближении к уровню чувствительности увеличивается до 200%.

Для синус-квадратного импульса. СО равна 45% при шаге 3 дБ и увеличивается до 67% при шаге квантования 12 дБ. ШО аналогична ошибке измерения синусного импульса и имеет максимальное значение 25% в диапазоне входных сигналов до 48 дБ и монотонно возрастает с уменьшением амплитуда до 150%.

Для импульса с провалом на вершине. СО измерения составляет 8% при шаге 3 дБ и возрастает до 17% при увеличении расстояния между порогами до 12 дБ. Максимальная шумовая ошибка равна 15% в диапазоне входных сигналов до 48 дБ и не зависит от шага квантования.

Для двухэкспоненциального импульса. При шаге квантования 3 дБ максимальное значение СО составляет 8%, однако при увеличении шага квантования до 12 дБ, ошибка возрастает до 130%. ШО измерения длительности имеет выраженный ступенчатый характер и меняется в зависимости от шага квантования.

Для импульса с осцилляциями на вершине и после среза. СО измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза лежит в пределах 20% при шаге квантования 3 дБ и увеличивается до 37% при шаге квантования 12 дБ. В основном ошибка сосредоточена в районе 15% при шаге квантования 3 дБ и 30% - при шаге квантования 12 дБ, и имеет разброс не более 6% в обоих случаях от среднего значения. Максимальное значение ШО измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине не зависит от шага квантования и составляет 29% при малых сигналах и монотонно уменьшается до нуля при увеличении амплитуды сигнала.

Основные численные результаты расчетов систематической погрешности приведены в таблице 3.1

Основные численные результаты расчетов шумовой ошибки приведены в таблице 3.2

Таблица 3.1. Систематическая погрешность

Тип импульса	Измеритель 2 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отсутствующих порогов			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	8±4,п	[-18..+5],п	20±4,п	[0..+15],м
Экспоненциальный	20±6,п	[-70..+20],п	75±30,п	[-40..+100]
Гауссовский	[10..110],м, п	[-50..10],м,п	[40..150],м,п	[-20..40],м,п
Экспоненциально-степенной	-10±20,п	-20±20,п	75±50,п	[20..120],м
Синусный	-12±12,п	[-85..-20],п	35±10,п	[-35..30],м
Синус-квадратный	-25±20,п	[-120..-35],п	40±23,п	[-50..+35],м
Импульс с провалом на вершине	6±2,п,*	[-20..5],п	14±3,п	[-12..12],м
Двухэкспоненциальный	-7±9,п	[-50..5],п	100±35,п	[25..135],м
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	15±5,п	[-30..10],п	33±4,п	[-10..28],м

Таблица 3.2. Шумовая ошибка

Тип импульса	Измеритель 2 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отпущивших порогов			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	[10..0],м	[35..10],м	[10..0],м	[35..10],м
Экспоненциальный	[18..0],м	[18..200],м	[40..0],с	[40..200],с
Гауссовский	[30..10],м	[30..150],м	[35..10],п	[35..150],п
Экспоненциально-степенной	[25..0],п,м	[25..120],п,м	[15..0],м	[15..100],м
Синусный	[18..0],м	[18..200],м	[18..0],м	[18..200],м
Синус-квадратный	[25..5],м	[25..150],м	[25..2],м	[30..150],п,м
Импульс с провалом на вершине	[5..0],м	[5..150],м	[10..0],м	[10..150],п,м
Двухэкспоненциальный	[27..0],с	[27..150],с	[35..0],с	[35..150],с
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	[-6..0],м	[29..6],м	[-6..0],м	[29..6],м

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

$XX \pm X$ - среднее значение величины и разброс;

[XX...XX] - диапазон изменения величины;

* - наличие выбросов;

п - пилообразный характер;

м - монотонно;

с - ступенчатый характер.

Многопороговый измеритель с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов имеет меньшую систематическую погрешность по сравнению с измерителем с формированием длительности по нижнему и первому сверху из отпустивших порогов при измерении трапецеидального, экспоненциально-степенного, синусного импульсов, импульса с провалом на вершине, импульса с осцилляциями на вершине и после среза. По случайной ошибке имеет меньшую погрешность при измерении трапецеидального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного импульсов, импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

Таким образом многопороговый измеритель с формированием длительности нормированного импульса по нижнему и второму сверху из отпустивших порогов идеально подходит для измерения импульсов с провалом на вершине и с осцилляциями на вершине и после среза при условии, что шаг выбора порогов больше, чем величина провалов или осцилляций на вершине поступающих импульсов, однако имеет большие погрешности при измерении длительности несимметричных форм импульсов.

Основные результаты данной главы опубликованы [94,95].

Методика оценки погрешности измерения длительности импульсов алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по нижнему и второму из сверху отпустивших порогов и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения различных типов импульсов позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителя длительности изделия МП-405, что отмечено в акте внедрения (приведены в приложении).

4 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО ДВУМ СРЕДНИМ ПОРОГАМ

4.1 Анализ алгоритма формирования нормированной длительности по двум средним порогам многопорогового измерителя длительности

Для уменьшения влияния формы импульса на измеренную длительность импульса необходимо производить измерение длительности импульса на уровне половины амплитуды. Так как амплитуда импульса априорно не известна, то невозможно заранее выбрать пороговый уровень, на котором необходимо производить измерение. В связи с этим необходимо измерять длительность импульса одновременно на нескольких уровнях, а затем учитывать результаты измерения по уровню, который расположен ближе всего к уровню половинной амплитуды.

Многопороговый измеритель длительности с измерением по двум средним порогам наиболее подходит для измерения различных типов импульсов, т.к. истинную длительность импульса принято мерить по уровню половины амплитуды.

Структурная схема измерителя приведена на рисунке 4.1. На рисунке приняты следующие обозначения: ПУ 1, 2, N – пороговые устройства; Тр 1, 2, N – триггеры; ЛУ – логическое устройство; СЧ1, СЧ2 – счетчики импульсов; С – сумматор, со сдвигом на разряд влево; Г – генератор счетных импульсов; СЧ – счетные импульсы.

На рисунке 4.2 показаны эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя. Измеритель работает следующим образом, измеряемый импульс поступает на вход измерителя длительности и далее на все пороговые устройства (рисунок 4.2.а). Уровни срабатывания пороговых устройств расположены в логарифмическом масштабе по динамическому диапазону измерителя. В зависимости от формы и амплитуды импульса срабатывает определенное количество ПУ, триггеры формируют временные ворота (рисунки 4.2.б-е), соответствующие длительности входного импульса по уровню ПУ. Отклики от триггеров поступают на вход логического устройства, которое измеряя максимальную амплитуду, производит расчет средней амплитуды и выбирает два отклика от ПУ, находящиеся выше и ниже этого значения (рисунок 4.2.в,д). Далее эти отклики попадают на счетные устройства и сумматор со сдвигом на один разряд влево. Таким образом, на выходе устройства получается длительность, усредненная по

измеренным откликом от двух ПУ, находящихся выше и ниже уровня половинной амплитуды.

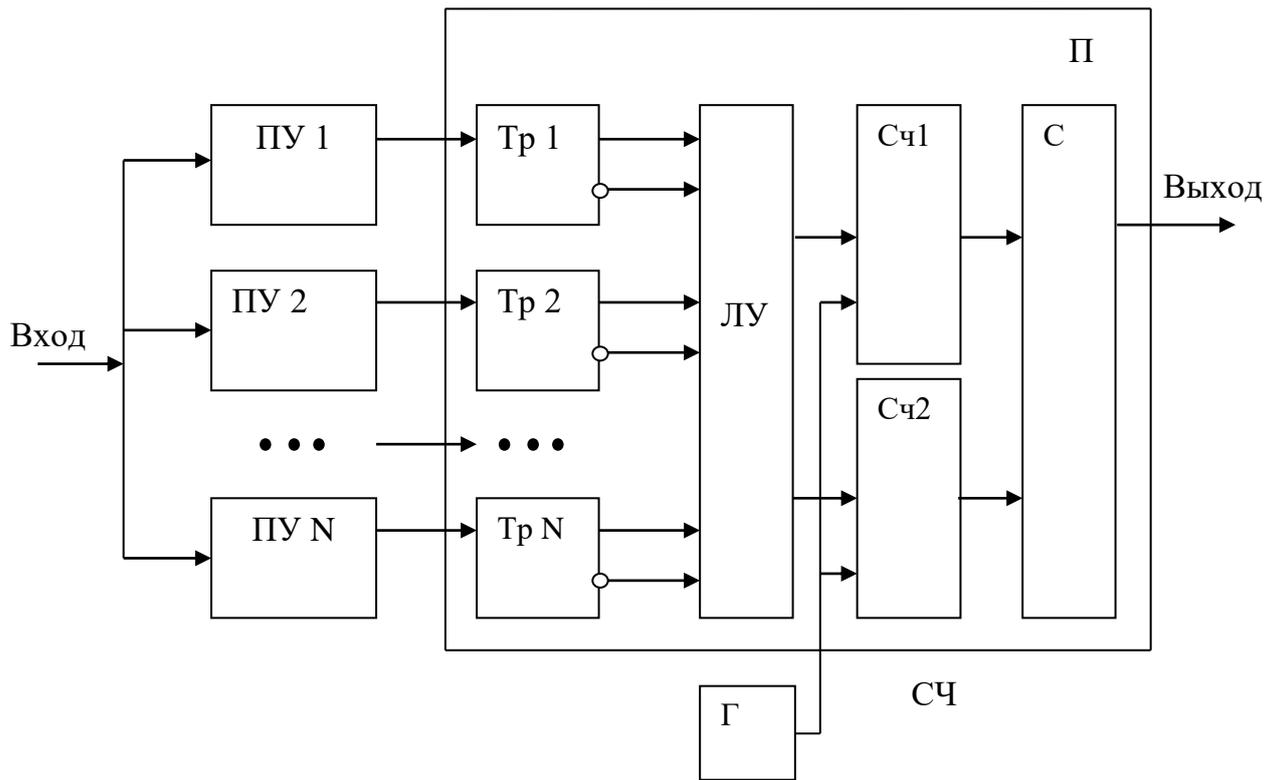


Рисунок 4.1 Структурная схема многопорогового измерителя длительности с усреднением по двум порогам.

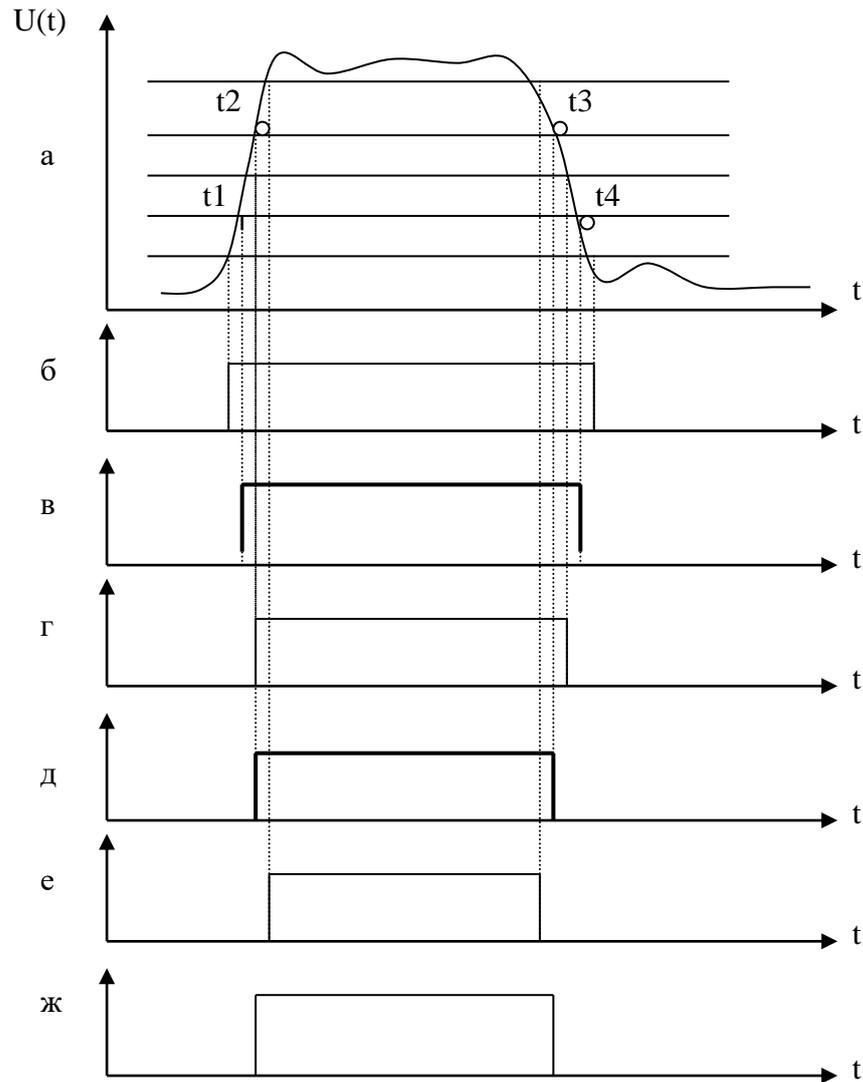


Рисунок 4.2 Эпюры напряжений

Пусть на вход многопорогового измерителя поступает импульс с амплитудой U_m :

$$U_{\text{вх}}(t) = U_m \cdot f(t).$$

Номер верхнего сработавшего порога можно определить используя функцию выделения целой части числа $\text{floor}(x)$:

$$k = \text{floor} \left(\log_N \left(\frac{U_m}{U_0} \right) \right), \quad (4.1)$$

Амплитуда импульса будет находиться в пределах: $U_k \leq U_m < U_{k+1}$. Истинная длительность импульса измеряется на уровне половины амплитуды. Уровень половины амплитуды будет находиться в пределах: $0.5U_k \leq 0.5U_m < 0.5U_{k+1}$.

Результаты измерения снимаются со счетчиков, подключенных к пороговым устройствам, уровни срабатывания которых расположены ближе всего к уровням $0.5U_k$ и $0.5U_{k+1}$. Пусть номер порогового устройства, уровень срабатывания которого ближе всего к уровню $0.5U_k$, будет А, номер порогового устройства, уровень срабатывания которого ближе всего к уровню $0.5U_{k+1}$, будет В.

Тогда измеренная длительность импульса определяется как среднее значение результатов измерения счетчиков А и В:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{\tau_A + \tau_B}{2}, \quad (4.2)$$

где τ_A – длительность импульса, измеренная счетчиком с номером А;

τ_B – длительность импульса, измеренная счетчиком с номером В.

Номер верхнего порога, расположенного ниже уровня $0.5 U_m$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} n_1 &= \text{floor} \left(\log_N \left(\frac{0.5U_k}{U_0} \right) \right) = \text{floor} \left(\log_N \left(\frac{0.5U_0 N^k}{U_0} \right) \right), \\ n_1 &= \text{floor}(\log_N(0.5N^k)), \\ n_1 &= k + \text{floor}(\log_N(0.5)). \end{aligned}$$

Если, $0.5U_k - U_0 N^{n_1} \leq U_0 N^{n_1+1} - 0.5U_k$ то номер порогового устройства, порог срабатывания которого расположен ближе всего к уровню $0.5U_k$, будет n_1 , иначе – n_1+1 .

$$A = \begin{cases} k + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } 0.5U_k - U_0 N^{n_1} \leq U_0 N^{n_1+1} - 0.5U_k \\ k + 1 + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } 0.5U_k - U_0 N^{n_1} > U_0 N^{n_1+1} - 0.5U_k \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} k + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } (N+1)N^{\text{floor}(\log_N(0.5))} \geq 1 \\ k + 1 + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } (N+1)N^{\text{floor}(\log_N(0.5))} < 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

Аналогично для уровня $0.5U_{k+1}$ номер ближайшего порогового устройства будет:

$$B = \begin{cases} k + 1 + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } (N+1)N^{\text{floor}(\log_N(0.5))} \geq 1 \\ k + 2 + \text{floor}(\log_N(0.5)), & \text{если } (N+1)N^{\text{floor}(\log_N(0.5))} < 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Длительность импульса, измеренная i -м пороговым устройством, определяется выражением:

$$\tau_i = t_{i2} - t_{i1}, \quad (4.5)$$

где t_{i1} , t_{i2} – моменты срабатывания и отпускания i -го порогового устройства соответственно.

Подставляя в (4.2) измеренную длительность (4.5) счетчиками А и В, находим:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{t_{B2} - t_{B1} + t_{A2} - t_{A1}}{2}, \quad (4.6)$$

Т.к. из-за логарифмического расположения порогов и априорно неизвестной амплитуды входных импульсов, измеренная длительность будет отличаться от истинной, то будет присутствовать систематическая ошибка измерения, а шумы приемного тракта добавят случайную (шумовую) ошибку.

Систематическая ошибка измерения будет равна:

$$\tau_{\text{изм}} = \frac{t_{B2} - t_{B1} + t_{A2} - t_{A1}}{2\tau_{\text{ист}}} - 1 \quad (4.7)$$

Проведем расчет систематической и случайной погрешностей для девяти типов импульсов: трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, импульса с провалом на вершине, двухэкспоненциального импульса и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

4.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум средним порогам

4.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса

Пусть на вход измерителя поступает трапецеидальный импульс.

Систематическая погрешность измерения длительности импульса определяется по формуле (4.7).

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.7), описывающую трапецеидальный импульс, решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств:

$$t_{\text{низм1}} = \frac{U_{S-1}}{U_m(t)} \tau f, \quad (4.8)$$

$$t_{\text{кизм1}} = 0.5 \left(\frac{-2 U_{S-1}(t) \tau s + 2 U_m(t) \tau i s t + U_m(t) \tau f + U_m(t) \tau s}{U_m(t)} \right), \quad (4.9)$$

$$t_{\text{низм2}} = \frac{U_{s+1}}{U_m(t)} \tau f \quad (4.10)$$

$$t_{\text{кизм2}} = 0.5 \left(\frac{-2 U_{s+1}(t) \tau s + 2 U_m(t) \tau i s t + U_m(t) \tau f + U_m(t) \tau s}{U_m(t)} \right) \quad (4.11)$$

где $U_{s-1}(t)$ - уровень порога ниже уровня половины амплитуды;

$U_{s+1}(t)$ - уровень порога выше уровня половины амплитуды.

Подставляя (4.7)-(4.10) в (4.11), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(U_m) = \frac{U_{s+1} \cdot \tau s - U_m \cdot \tau f - U_m \cdot \tau s + U_{s+1} \cdot \tau f + U_{s-1} \cdot \tau s + U_{s-1} \cdot \tau f}{U_m \cdot \tau i s t} \quad (4.12)$$

На рисунках 4.3, 4.4 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

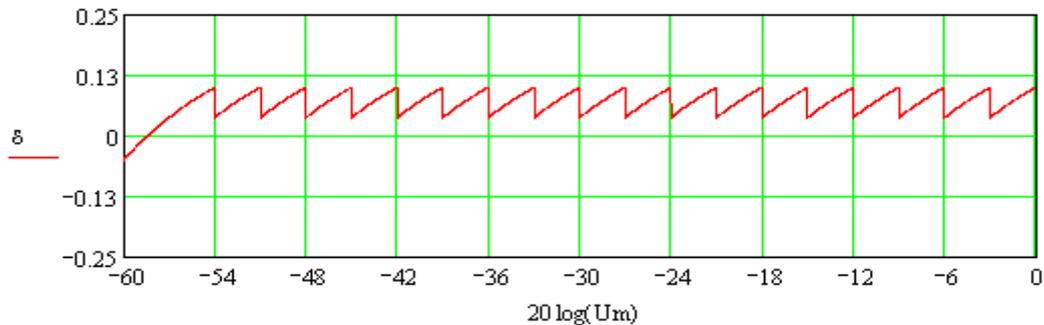


Рисунок 4.3 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

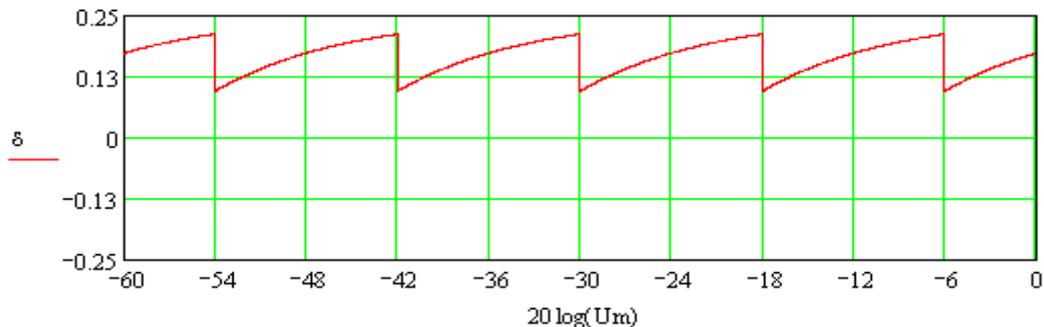


Рисунок 4.4 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциальный импульс.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.8), описывающее экспоненциальный импульс, решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств:

$$t_{\text{низм1}} = -\ln\left(-\frac{10U_{S-1}-11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1 \quad (4.13)$$

$$t_{\text{кизм1}} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_{S-1}}{U_m\left(-11+10e^{-\frac{\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 \quad (4.14)$$

$$t_{\text{низм2}} = -\ln\left(-\frac{10U_{S+1}-11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1 \quad (4.15)$$

$$t_{\text{кизм2}} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_{S+1}}{U_m\left(-11+10e^{-\frac{\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 \quad (4.16)$$

Подставляя (4.13)-(4.16) в (4.7), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности экспоненциального импульса. На рисунках 4.5, 4.6 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

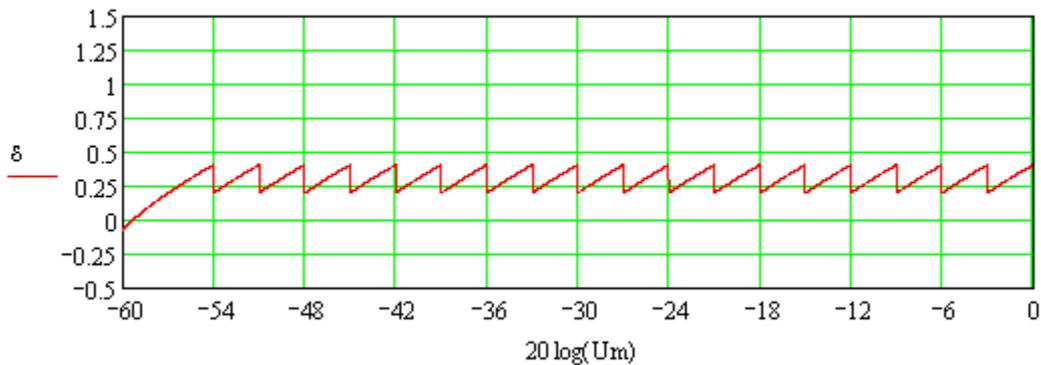


Рисунок 4.5 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

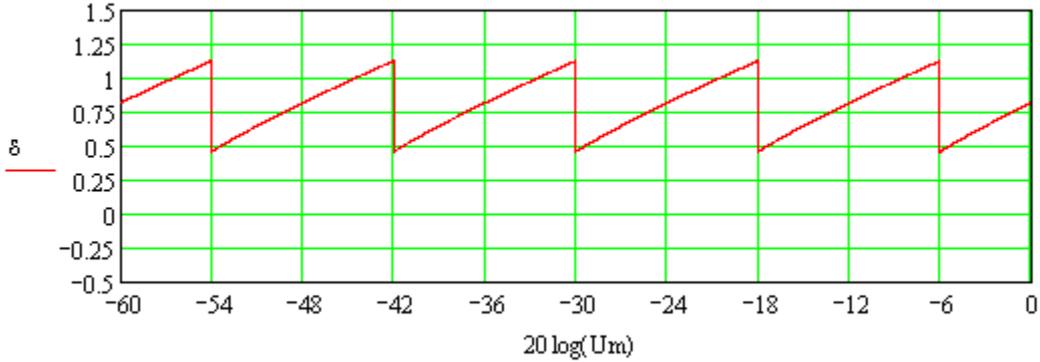


Рисунок 4.6 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса

Пусть на вход измерителя поступает гауссовский импульс.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.9), описывающую гауссовский импульс, решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств:

$$t_{\text{низм1}} = -\frac{\tau_{\text{усм}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_{s-1}}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}, \quad (4.17)$$

$$t_{\text{квизм1}} = \frac{\tau_{\text{усм}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_{s-1}}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}} \quad (4.18)$$

$$t_{\text{низм2}} = -\frac{\tau_{\text{усм}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_{s+1}}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}, \quad (4.19)$$

$$t_{\text{квизм2}} = \frac{\tau_{\text{усм}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_{s+1}}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}} \quad (4.20)$$

Подставляя (4.17)-(4.20) в (4.7), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(U_m) = \frac{\sqrt{-\ln(2) \cdot \ln\left(\frac{U_s-1}{U_m}\right)} + \sqrt{-\ln(2) \cdot \ln\left(\frac{U_s+1}{U_m}\right)}}{2\ln(2)} \quad (4.21)$$

На рисунках 4.7, 4.8 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

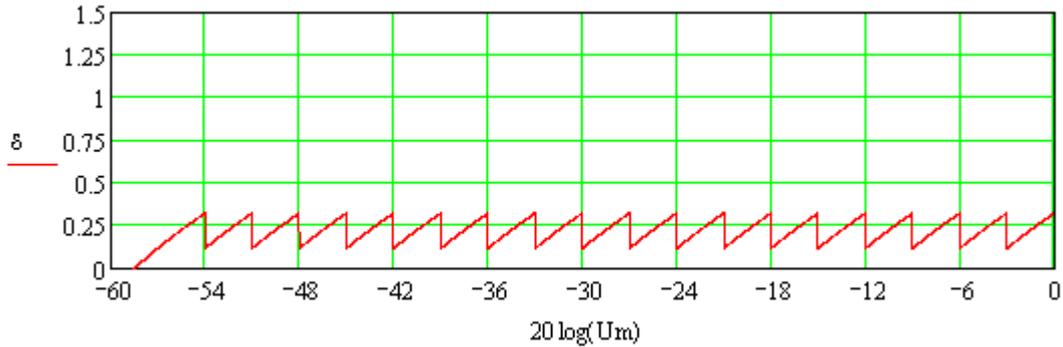


Рисунок 4.7 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования N=3 дБ.

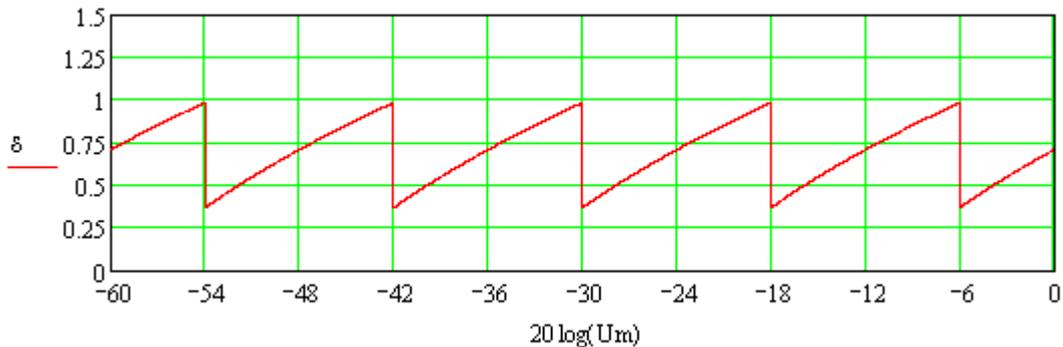


Рисунок 4.8 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования N=12 дБ.

4.2.4 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциально-степенной импульс.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.10), описывающую экспоненциально-степенной импульс, рассчитаем получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств, поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 4.9 – 4.12 для различных значений параметра m и шага квантования.

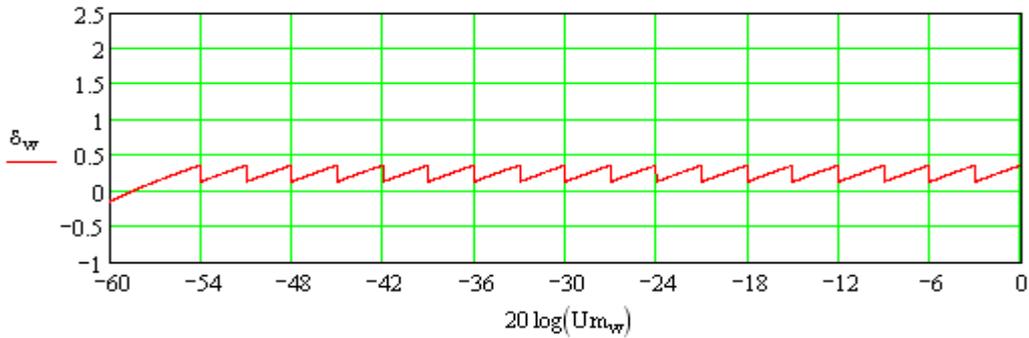


Рисунок 4.9 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

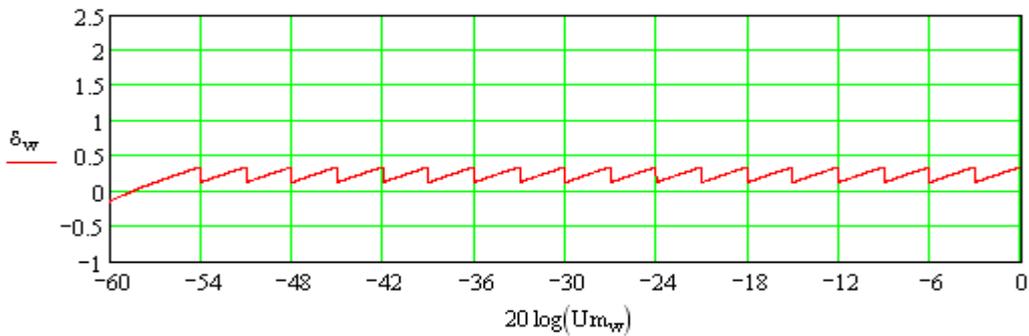


Рисунок 4.10 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

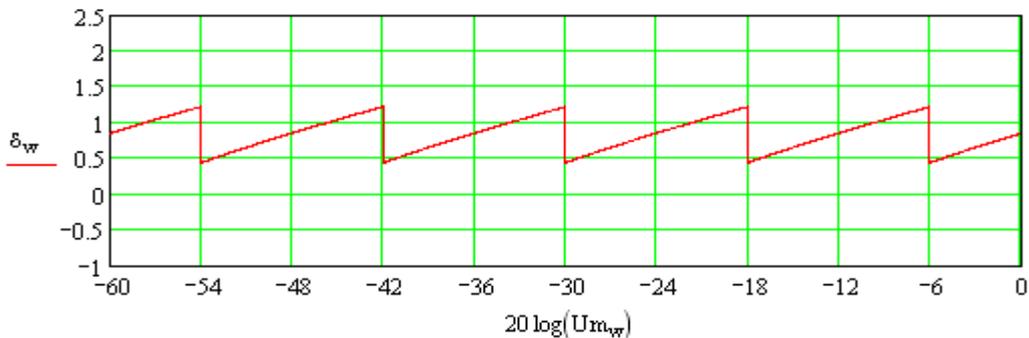


Рисунок 4.11 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

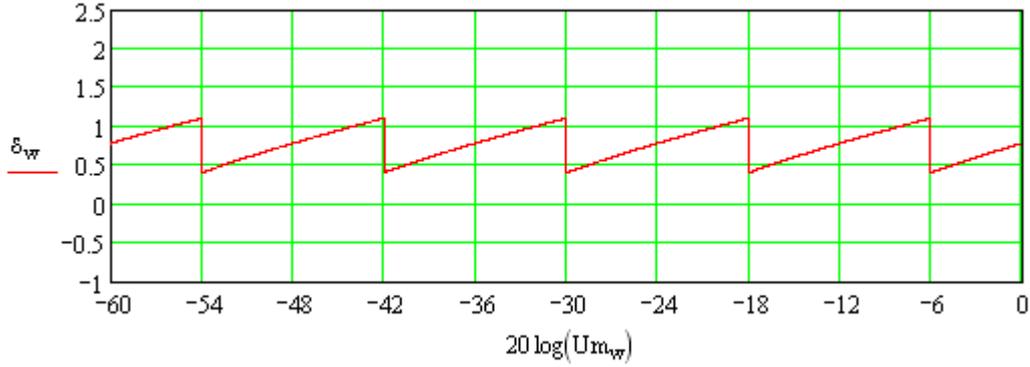


Рисунок 4.12 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синусный импульс.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.11), описывающую синусный импульс, решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств:

$$t_{низм1} = \frac{3\tau_{uct}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_{s-1}}{U_m}\right), \quad (4.22)$$

$$t_{квизм1} = \frac{3\tau_{uct}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_{s-1}}{U_m}\right) \right), \quad (4.23)$$

$$t_{низм2} = \frac{3\tau_{uct}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_{s+1}}{U_m}\right), \quad (4.24)$$

$$t_{квизм2} = \frac{3\tau_{uct}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_{s+1}}{U_m}\right) \right). \quad (4.25)$$

Подставляя (4.22)-(4.25) в (4.7), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности синусного импульса:

$$\delta(U_m) = -\frac{3}{2} \cdot \frac{-\pi + \arcsin\left(\frac{U_{s-1}}{U_m}\right) + \arcsin\left(\frac{U_{s+1}}{U_m}\right)}{\pi} \quad (4.26)$$

На рисунках 4.13, 4.14 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

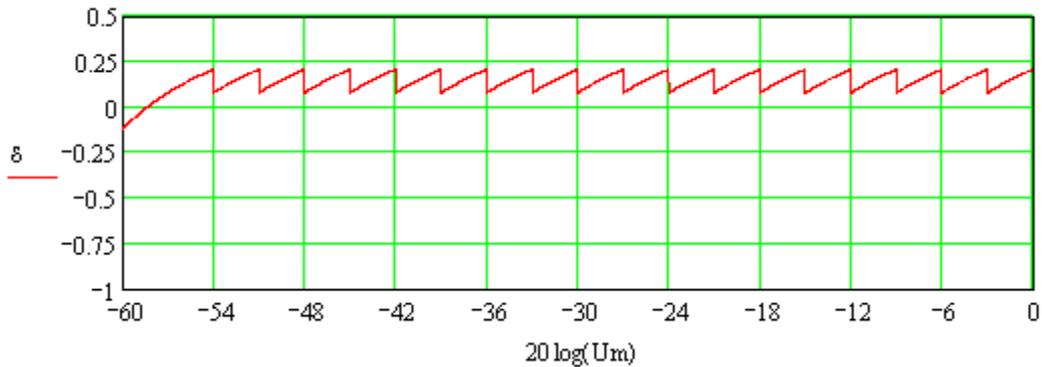


Рисунок 4.13 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

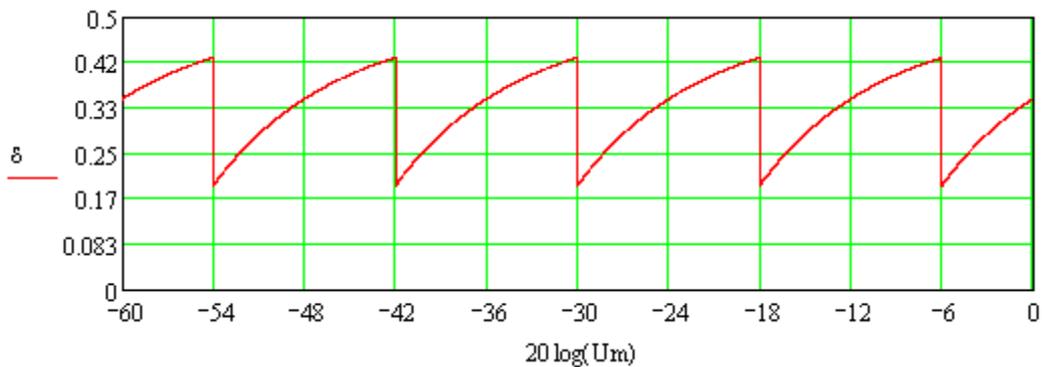


Рисунок 4.14 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квadratного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синус-квadratный импульс.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.12), описывающую синус-квadratный импульс, решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания и отпускания 2-х пороговых устройств:

$$t_{\text{низм1}} = \frac{2\tau_{\text{усм}}}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s-1}}{U_m}}\right), \quad (4.27)$$

$$t_{\text{квизм1}} = \frac{2\tau_{\text{усм}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s-1}}{U_m}}\right) \right], \quad (4.28)$$

$$t_{\text{низм2}} = \frac{2\tau_{\text{ucm}}}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s+1}}{U_m}}\right), \quad (4.29)$$

$$t_{\text{квизм2}} = \frac{2\tau_{\text{ucm}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s+1}}{U_m}}\right) \right]. \quad (4.30)$$

Тогда систематическая погрешность измерения длительности синус-квадратного импульса:

$$\delta(U_m) = \frac{3\sqrt{\tau_{\text{ист}}}}{2} \cdot \frac{\arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s-1}}{U_m}}\right) + \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{s+1}}{U_m}}\right)}{\pi \cdot \tau_{\text{ист}}} - 1 \quad (4.31)$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ приведены на рисунках 4.15 и 4.16.

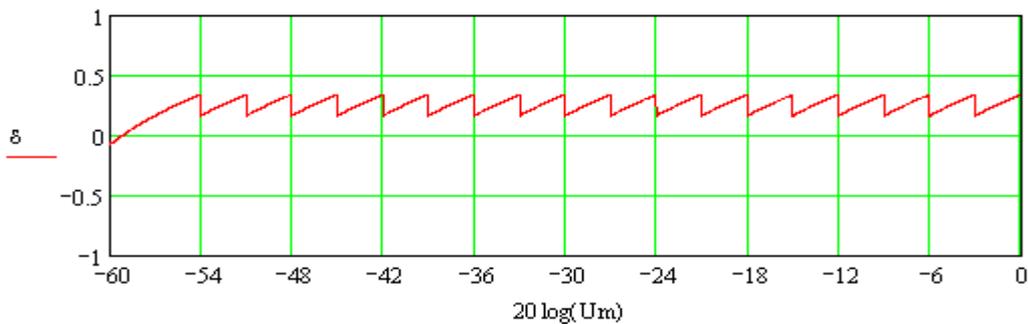


Рисунок 4.15 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{ дБ}$.

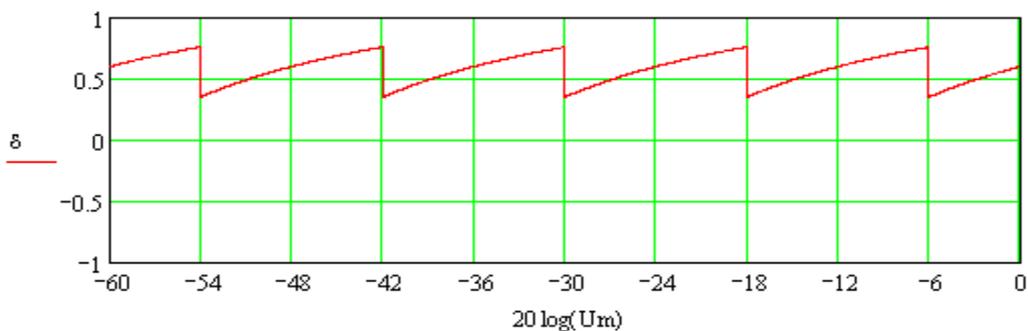


Рисунок 4.16 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12\text{ дБ}$.

4.2.7 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Пусть на вход измерителя поступает импульс с провалом на вершине.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.13), описывающую импульс с провалом на вершине, поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности импульсов с провалом на вершине изображены на рисунках 4.17, 4.18.

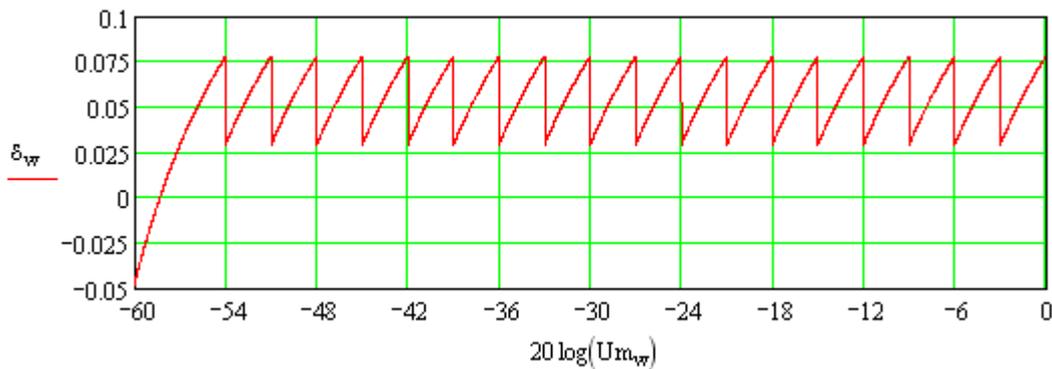


Рисунок 4.17 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

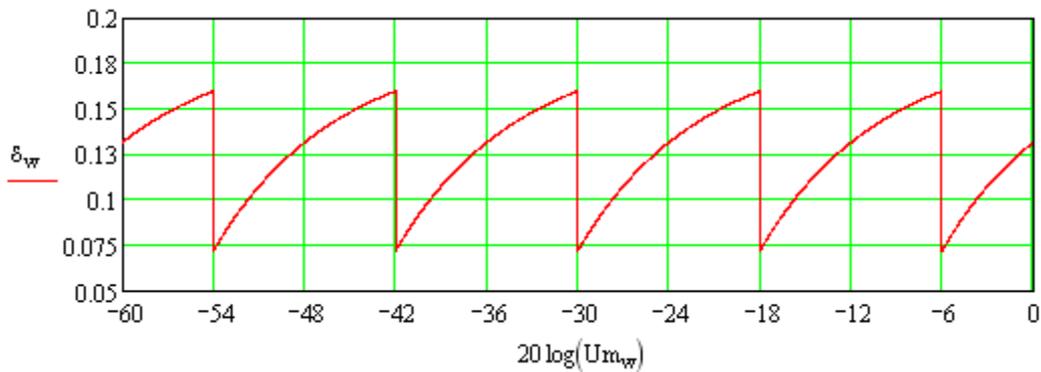


Рисунок 4.18 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает импульс с провалом на вершине.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.14), описывающую двухэкспоненциальный импульс, поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов изображены на рисунках 4.19, 4.20.

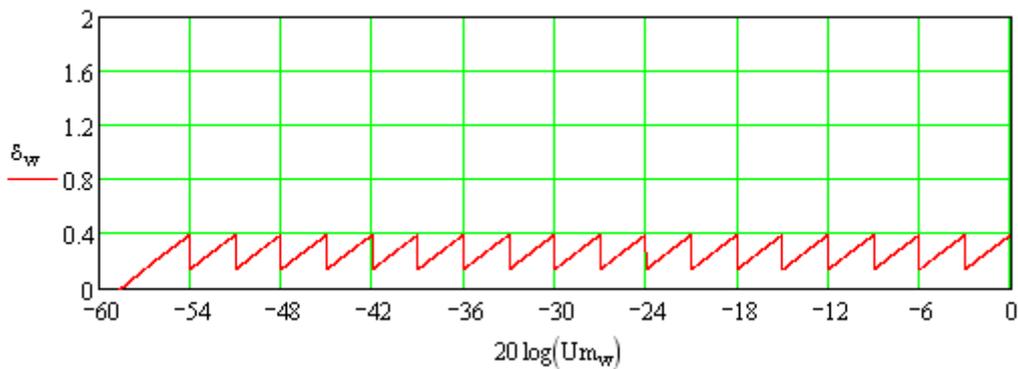


Рисунок 4.18 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

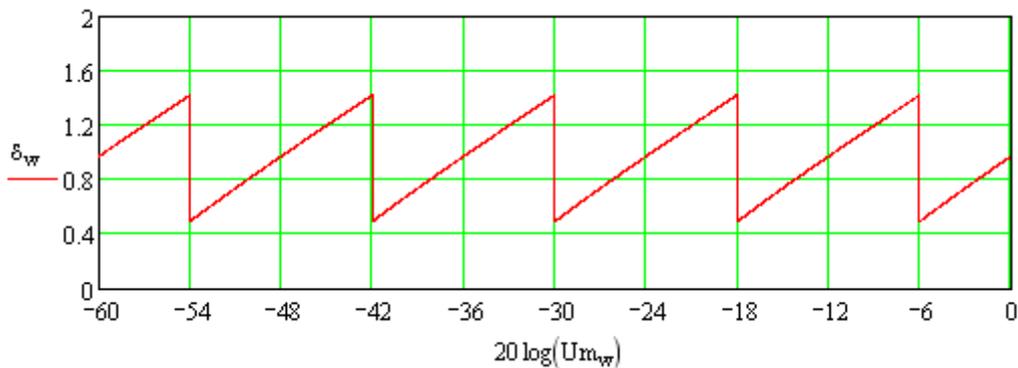


Рисунок 4.20 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.2.9 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94]

Пусть на вход измерителя поступает импульс с осцилляциями на вершине и после среза.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) функцию (1.15), описывающую импульс с осцилляциями на вершине и после среза получаем моменты срабатывания порогов, поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов изображены на рисунках 4.21, 4.22.

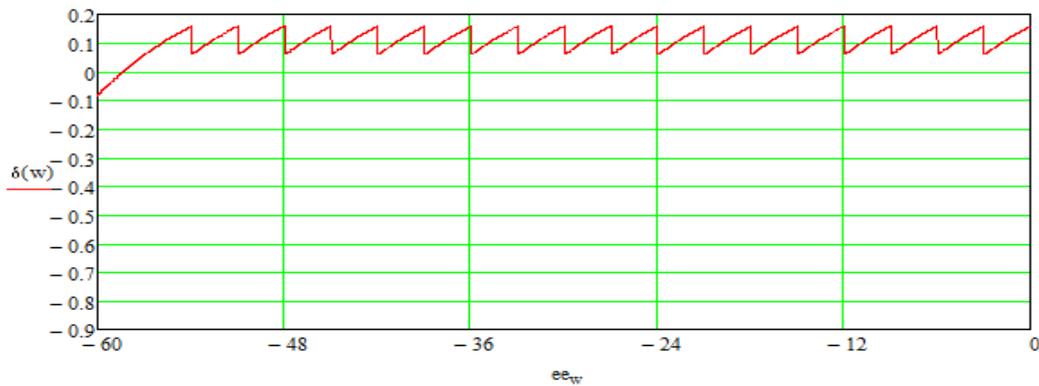


Рисунок 4.21 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

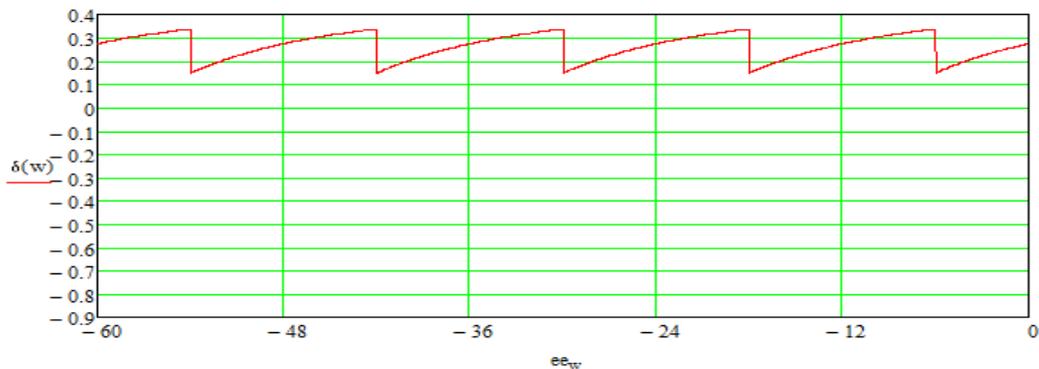


Рисунок 4.22 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

4.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум средним порогам

4.3.1 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса

Существенное влияние на моменты срабатывания и отпускания пороговых устройств многопорогового измерителя длительности оказывают шумы приемника. Обозначим: $t_{низм1}$ - момент срабатывания первого порога, $t_{квзм1}$ - момент отпускания первого порога, $t_{низм2}$ - момент срабатывания второго порога, $t_{квзм2}$ - момент отпускания второго порога. Поскольку количество срабатываний и отпусканй порога увеличилось в два раза, формула (2.14) будет иметь вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ш}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_{низм1})} + \frac{1}{S^2(t_{квзм1})} + \frac{1}{S^2(t_{низм2})} + \frac{1}{S^2(t_{квзм2})}} \quad (4.32)$$

Методика расчета случайной ошибки аналогична п. 2.3.2., с учетом большего количества моментов срабатывания.

Суммарная ошибка равна:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2} + \frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2}} = \frac{\sigma_{ш}}{U_m} \sqrt{\tau_f^2 + \tau_s^2 + \tau_f^2 + \tau_s^2} \quad (4.33)$$

Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала, приведена на рисунке 4.23

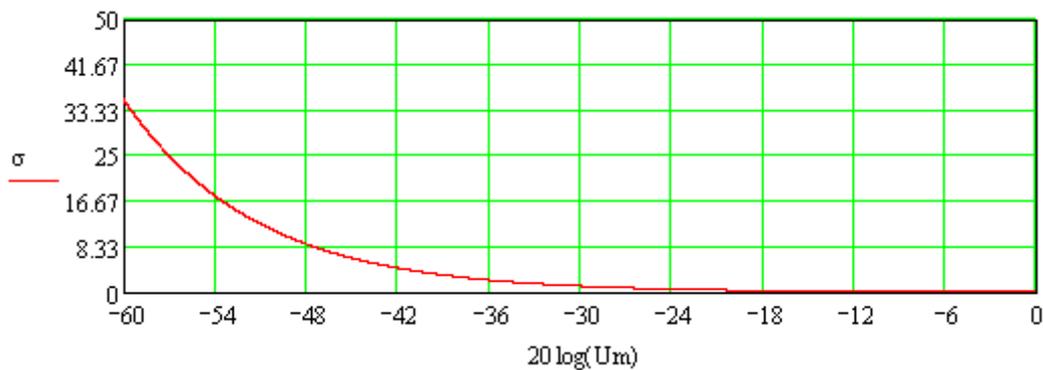


Рисунок 4.23 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала

4.3.2 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса находим производную функции (1.8), описывающей его форму (2.19).

Моменты срабатывания порогов определяются выражениями (4.13)-(4.16).

Подставляя выражения (4.13)-(4.16) в (2.19), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ш}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\tau_1^2}{(U_m - U_{s-1})^2} - \frac{2\tau_2^2}{U_{s+1}^2}} \quad (4.34)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности экспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (4.34) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 4.24-4.26.

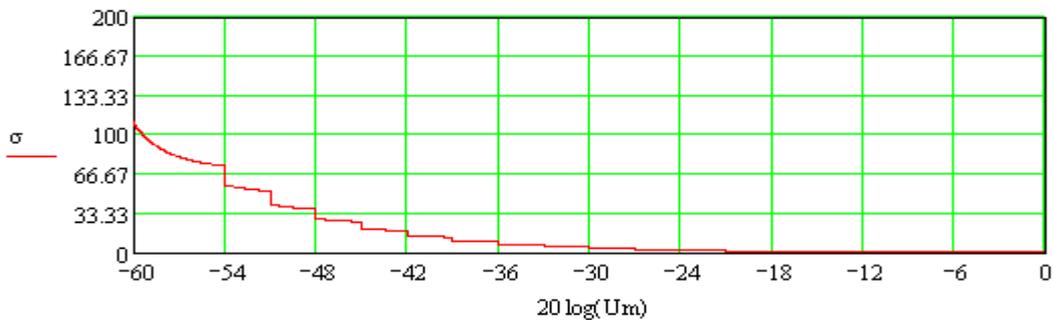


Рисунок 4.24 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

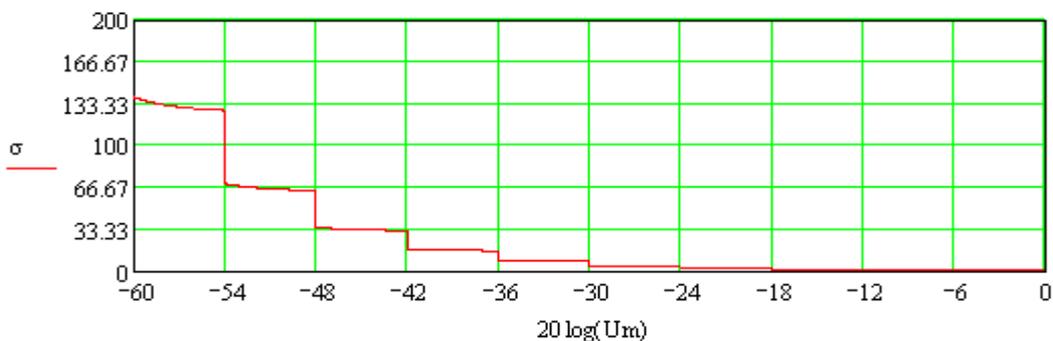


Рисунок 4.25 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

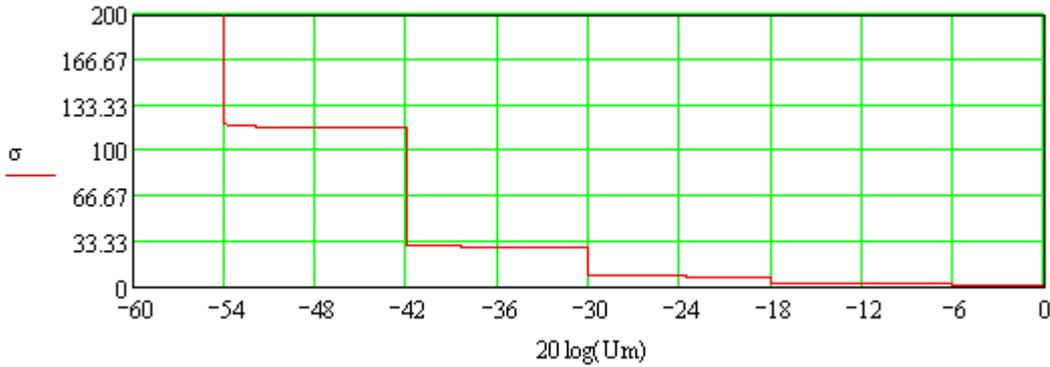


Рисунок 4.26 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.3 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса находим производную функции (1.9), описывающей его форму (2.25).

Подставляя выражения (4.17)-(4.20) в (2.25), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{\text{ш}} \tau_{\text{уст}}}{4\sqrt{2}\sqrt{\ln(2)}} \sqrt{\frac{2}{U_0^2 \ln(U_m/U_{s-1})} + \frac{2}{U_k^2 \ln(U_m/U_{s+1})}}. \quad (4.35)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (4.35) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 4.27-4.29.

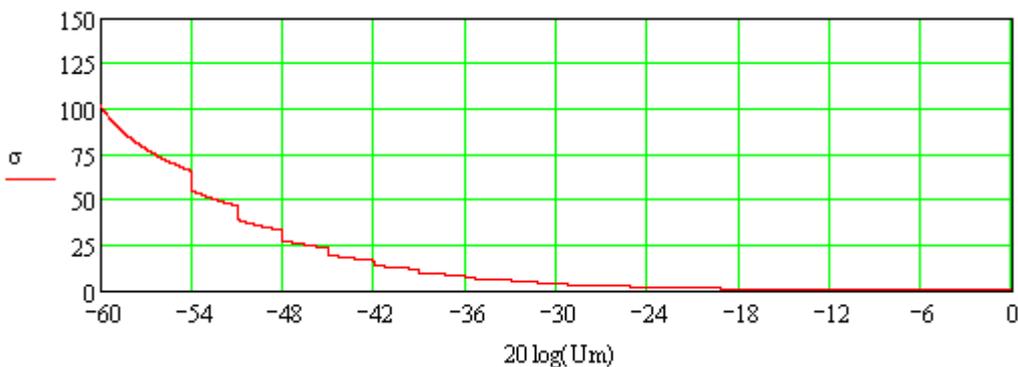


Рисунок 4.27 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

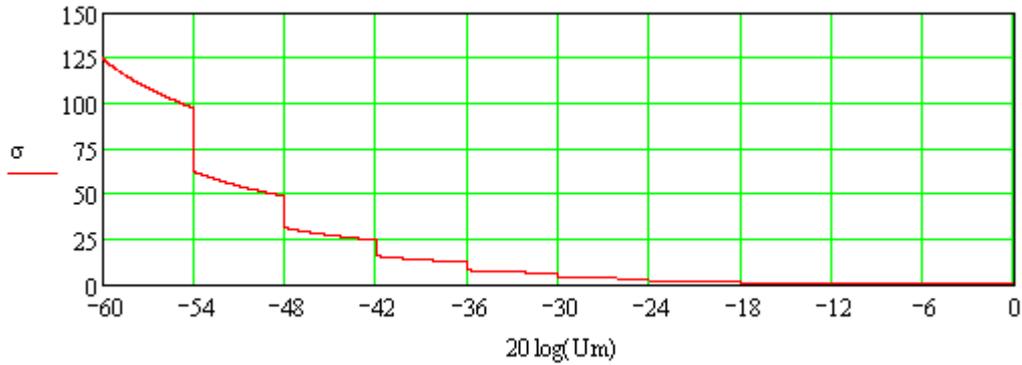


Рисунок 4.28 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

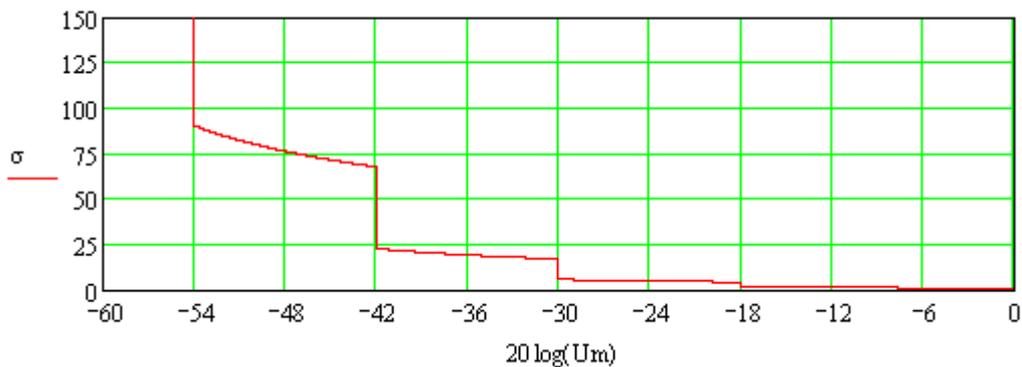


Рисунок 4.29 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.4 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.10), описывающей его форму (2.29)

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов от амплитуды входного сигнала при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 4.30-4.32.

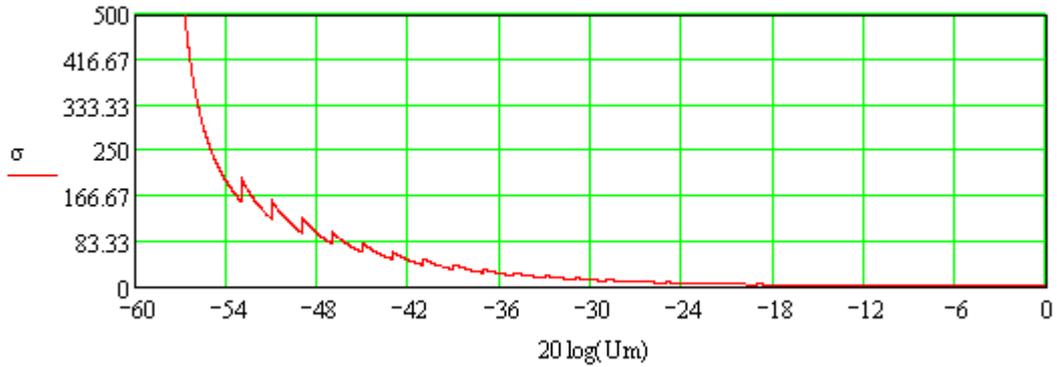


Рисунок 4.30 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

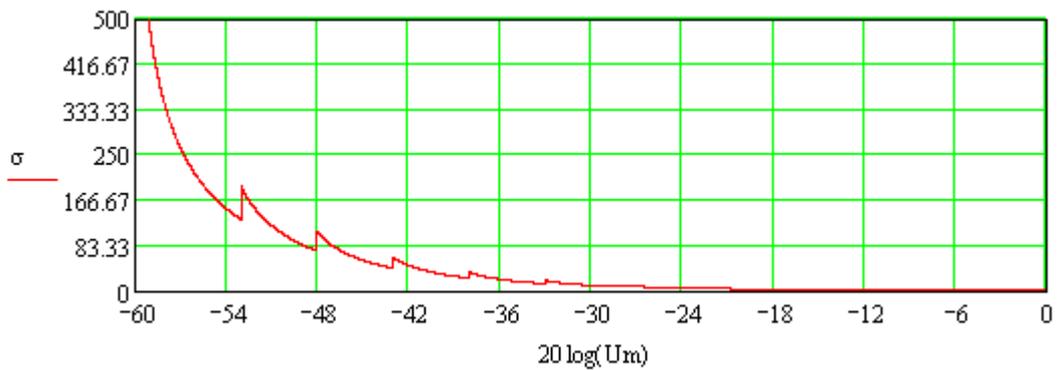


Рисунок 4.31 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

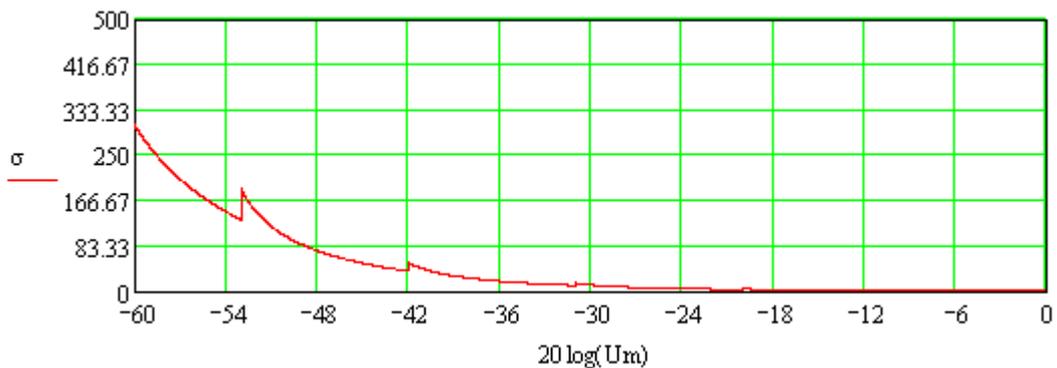


Рисунок 4.32 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.5 Случайная погрешность измерения синусного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса находим производную функции (1.11), описывающей его форму (2.30).

Подставляя выражения (4.22)-(4.25) в (2.30), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{3\tau_{\text{исл}}\sigma_{\text{ш}}}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{U_m^2 - U_{s-1}^2} + \frac{2}{U_m^2 - U_{s+1}^2}}. \quad (4.36)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (4.36) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 4.33-4.35.

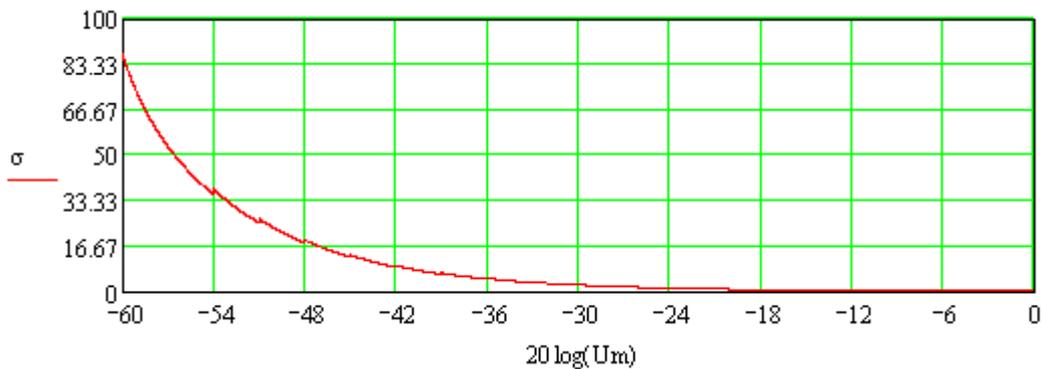


Рисунок 4.33 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

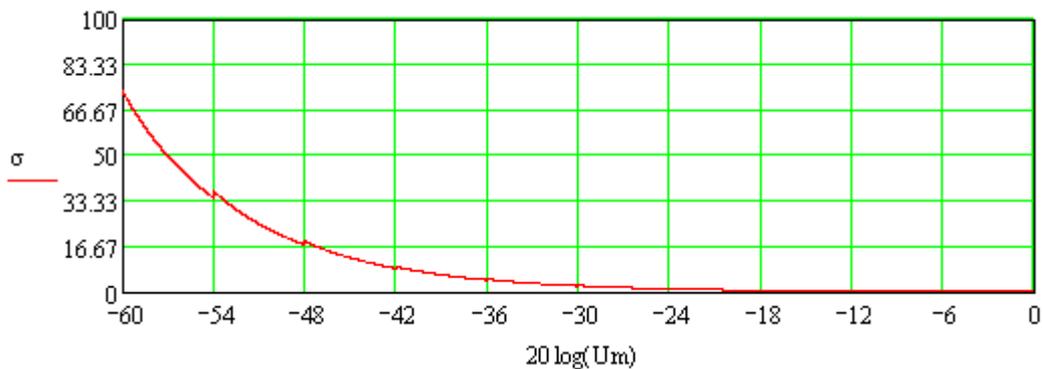


Рисунок 4.34 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

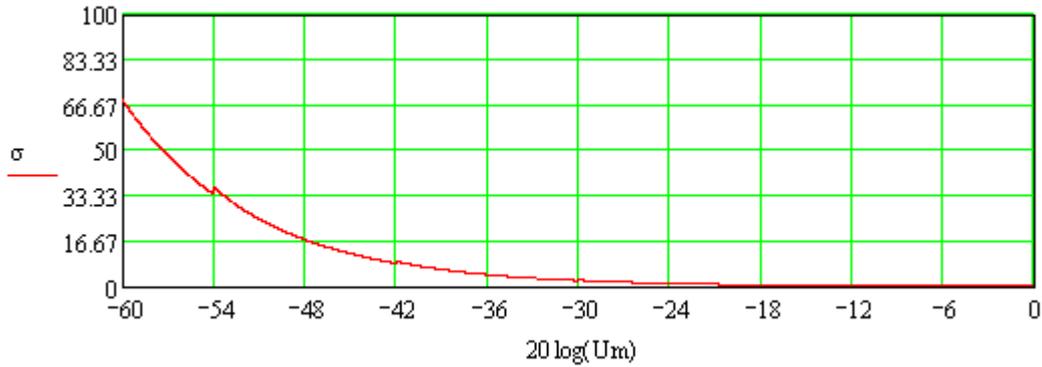


Рисунок 4.35 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования N=12 дБ

4.3.6 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса находим производную функции (1.12), описывающей его форму (2.34).

Подставляя выражения (4.27)-(4.30) в (2.31), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_u \tau_{\text{исм}}}{\pi \sqrt{2}} \sqrt{\frac{2}{U_{s-1}(U_m - U_{s-1})} + \frac{2}{U_{s+1}(U_m - U_{s-1})}} \quad (4.37)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (4.37) при шаге квантования N=3 дБ, N=6 дБ и N=12 дБ, приведены на рисунках 4.36-4.38.

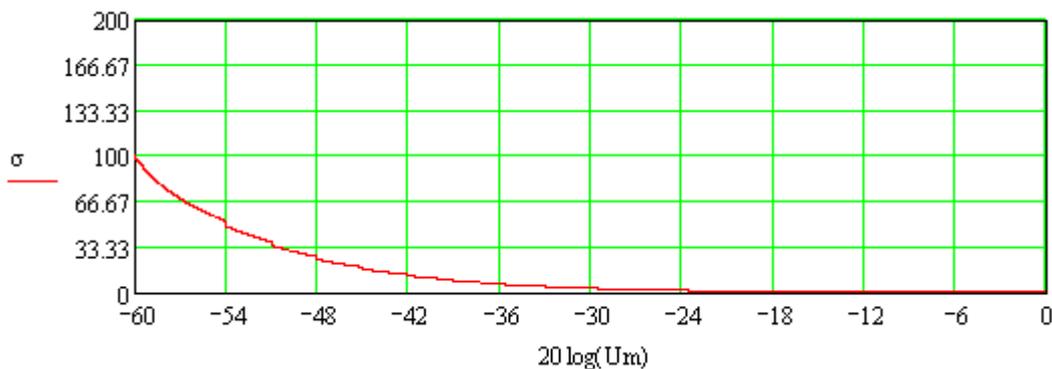


Рисунок 4.36 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования N=3 дБ

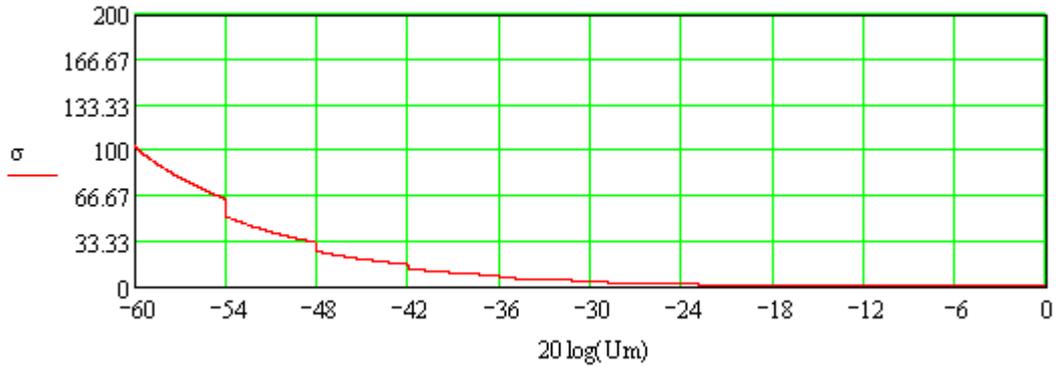


Рисунок 4.37 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

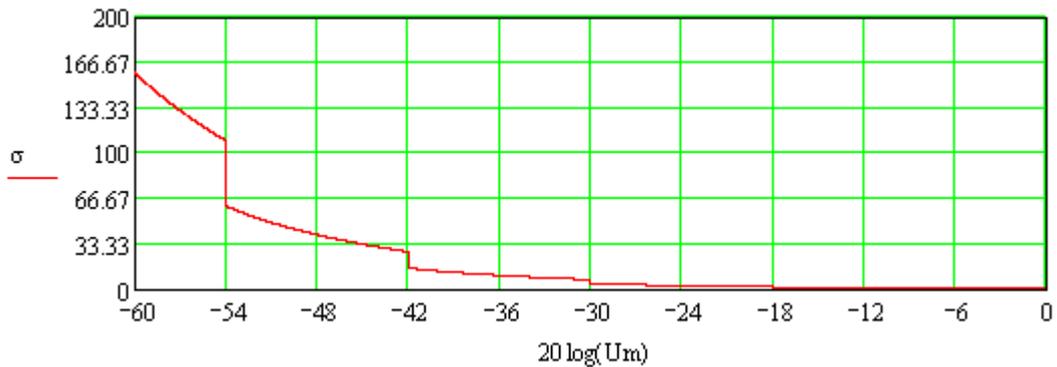


Рисунок 4.38 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.7 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине находим производную функции (1.13), описывающей его форму (2.38).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульсов с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 4.39-4.41.

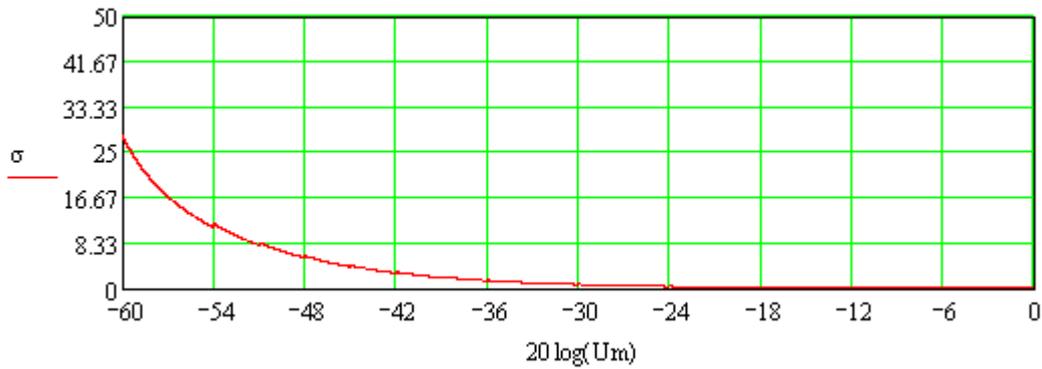


Рисунок 4.39 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

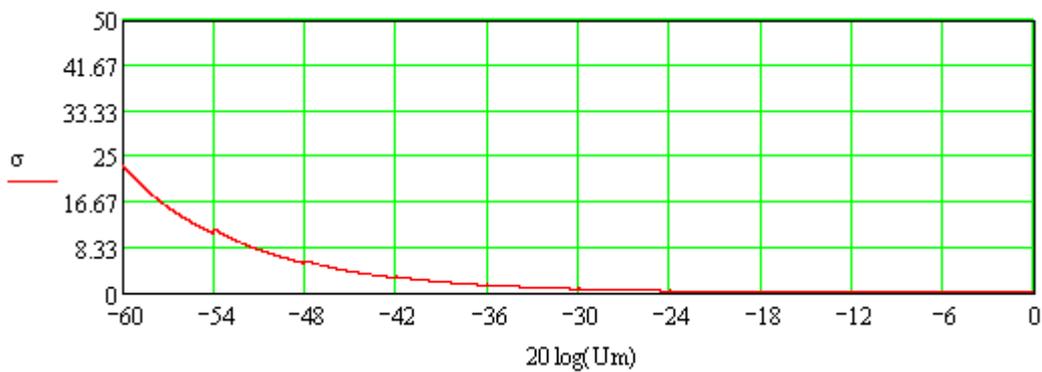


Рисунок 4.40 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

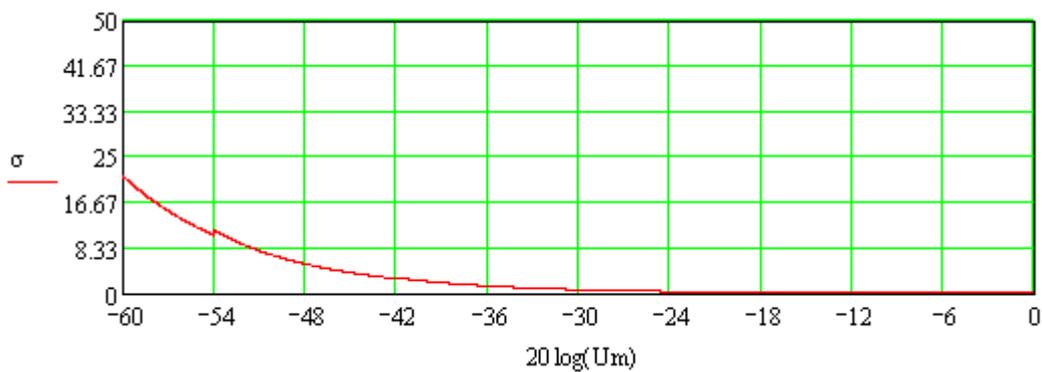


Рисунок 4.41 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.8 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса находим производную функции (1.14), описывающей его форму (2.39).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 4.42-4.44.

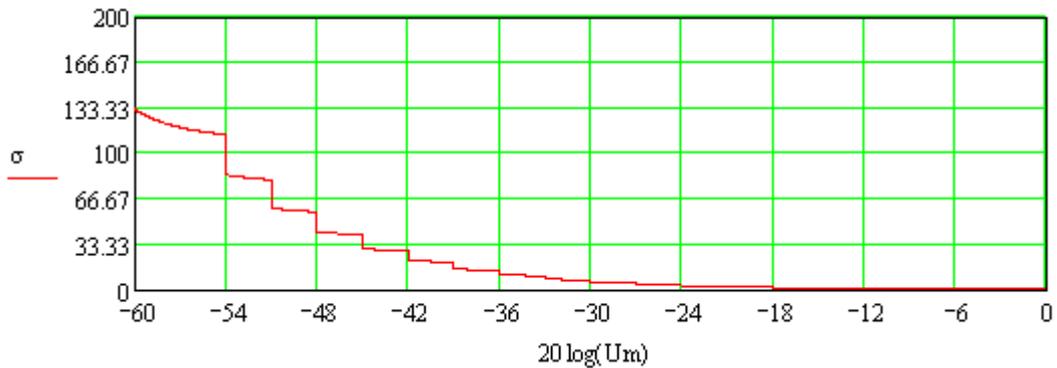


Рисунок 4.42 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

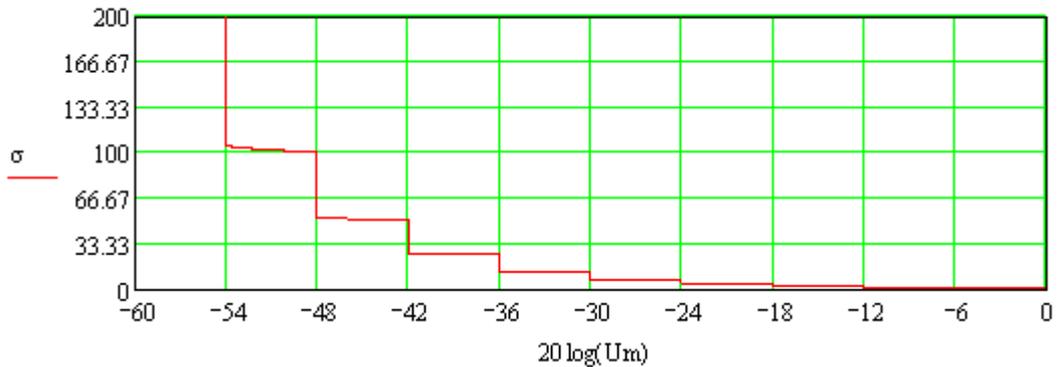


Рисунок 4.43 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

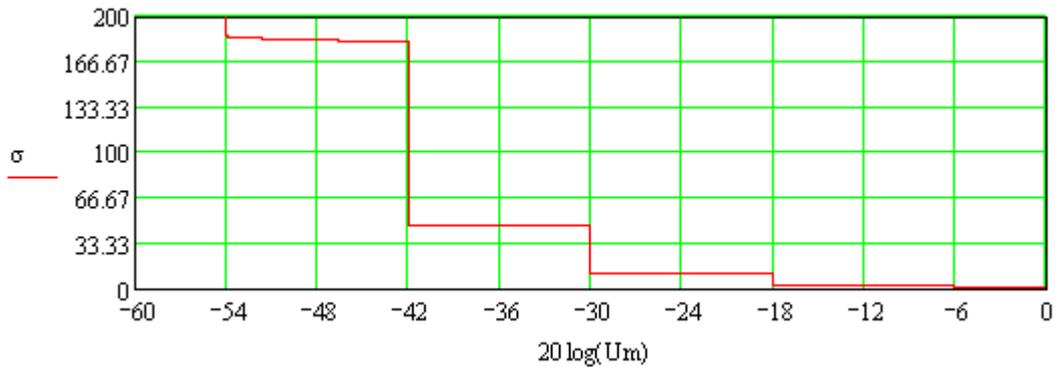


Рисунок 4.44 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

4.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95]

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза находим производную функции (1.15), описывающей его форму (2.40).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ не зависят от шага квантования и приведены на рисунке 4.45.

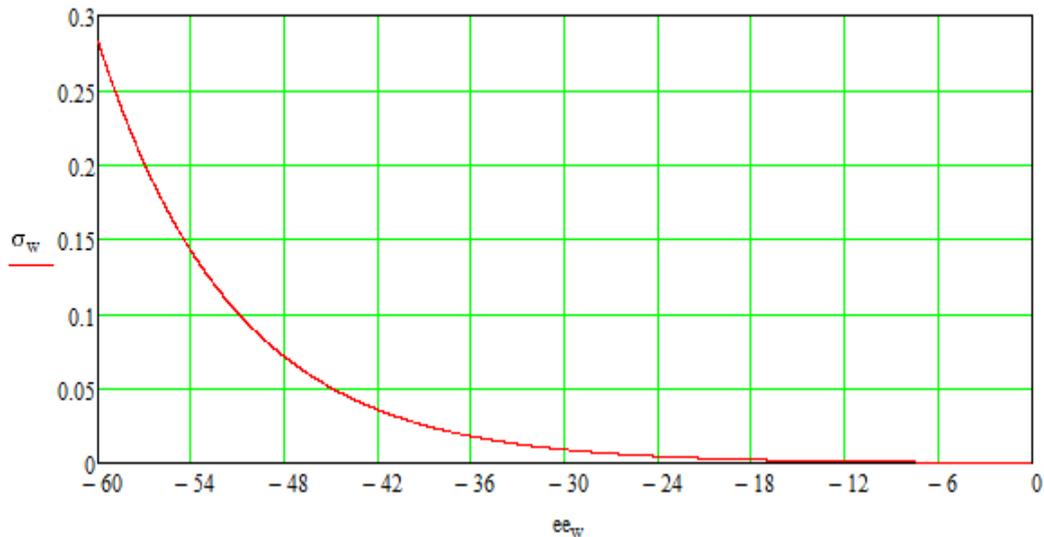


Рисунок 4.45 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3,6,12$ дБ

4.4 Выводы

В главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности по двум средним порогам. Данный измеритель отличается от двух предыдущих тем, что в нем производится усреднение длительности, измеренной по двум уровням, он более сложный в реализации, т.к. необходимо отслеживать уровень половинной амплитуды входного сигнала и после этого выбирать два порога ниже и выше этого уровня.

Получение аналитических выражений для погрешностей многопорогового измерителя позволило разработать методику расчета систематической и случайной составляющих погрешности многопорогового измерителя с измерением длительности по двум средним порогам для девяти типов импульсов (трапецеидальной, экспоненциальной, гауссовской, экспоненциально-степенной, синусной, синус-квадратной, двухэкспоненциальной, с провалом на вершине и с осцилляциями на вершине и после среза), характерных приемников импульсных сигналов.

Результаты исследований алгоритма работы многопорогового измерителя по восьми типам импульсов являются оригинальными.

Для систематизации и сравнительного анализа приведены, известные ранее, результаты расчета систематической и случайной погрешностей экспоненциально-степенного импульса.

Для трапецидального импульса. Максимальная СО измерения составила 10% при шаге квантования 3 дБ, ошибка увеличивается до 21% с увеличением шага до 12 дБ. Однако, значения ошибки сосредоточены относительно уровня 7% и 21% для двух шагов квантования и разброс от этих значений составляет 3% и 5% соответственно. Т.о. реальная ошибка гораздо меньше максимальной. Максимальная ШО по сравнению с двумя предыдущими методами увеличилась до 37%, это обусловлено увеличением количества точек, по которым работает измеритель в 2 раза. Монотонный характер возрастания при уменьшении амплитуды входного сигнала сохранился.

Для экспоненциального импульса. Максимальная СО составляет 38%, аналогично трапецидальному импульсу сосредоточена в области 31% с разбросом в 7% при шаге квантования 3 дБ. При увеличении шага квантования до 12 дБ, максимальная СО увеличивается до 110%, но сосредоточена в области $80\% \pm 30\%$. ШО возрастает с уменьшением амплитуды входного импульса. Имеет выраженный ступенчатый характер.

Для гауссовского импульса. Максимальная СО составляет 32%, однако ошибка сосредоточена относительно $20\% \pm 12\%$ при шаге 3 дБ. Среднее значение СО возрастает до $70\% \pm 30\%$ с увеличением шага квантования до 12 дБ. ШО измерения гауссовского импульса имеет ступенчатый характер и максимальное значение составляет 25% при уровне входного сигнала до 48 дБ и до 70% при приближении к уровню чувствительности.

Для экспоненциально-степенного импульса. Максимальная СО измерения составляет 37%, разброс относительно среднего значения составляет 25% и не зависит от параметра n . Ошибка увеличивается с переходом на шаг 12 дБ до $80\% \pm 40\%$. ШО имеет пилообразный характер и составляет 83% при шаге 3 дБ и уровне входных сигналов до 48 дБ и увеличивается до 500% при шаге 12 дБ и малых уровнях сигналов.

Для синусного импульса. Максимальная СО измерения составляет 22% при шаге квантования 3 дБ, при шаге 12 дБ – 42%. Ошибка в обоих случаях сосредоточена относительно средних значений с определенным разбросом и составляет $12\% \pm 10\%$ и

30%±12%. ШО монотонно возрастает с уменьшением амплитуды измеряемого импульса до 83%. ШО мало зависит от шага квантования.

Для синус-квадратного импульса. За счет изменения формы импульса по сравнению с синусным импульсом СО возросла и составляет 25%±12% и 65%±30% при 3 и 12 дБ. Уменьшение крутизны фронта и среза привело к увеличению максимальной ШО до 95%. С увеличением шага квантования ШО увеличивается до 150%.

Для импульса с провалом на вершине. СО составляет 6±2% при шаге 3 дБ и 12±4% при шаге 12 дБ. ШО не более 20%, характер монотонный и мало зависит от шага квантования.

Для двухэкспоненциального импульса. СО составляет 40% и 140% при шаге квантования 3 дБ и 12 дБ. ШО имеет ступенчатый характер и увеличивается с увеличением шага квантования от 130% до 170% при шаге квантования 12 дБ. ШО имеет ступенчатый характер.

Для импульса с осцилляциями на вершине и после среза. СО измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза лежит в пределах 10% при шаге квантования 3 дБ и 25% при шаге квантования 12 дБ с разбросом 5% и 10 % соответственно. Т.о. реальная ошибка гораздо меньше максимальной. ШО измерения длительности аналогична измерителю 2 и составляет около 27% при минимальных уровнях сигнала и монотонно уменьшается при увеличении амплитуд сигнала.

Основные численные результаты расчетов систематической погрешности приведены в таблице 4.1

Основные численные результаты расчетов шумовой ошибки приведены в таблице 4.2

Таблица 4.1. Систематическая погрешность

Тип импульса	Измеритель 3 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум средним порогам			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	7±3,п	7±3,п	17±4,п	17±4,п
Экспоненциальный	31±7,п	31±7,п	80±30,п	80±30,п
Гауссовский	20±12,п	20±12,п	70±30,п	70±30,п
Экспоненциально-степенной	25±12,п	25±12,п	80±40,п	80±40,п
Синусный	12±10,п	12±10,п	30±12,п	30±12,п
Синус-квадратный	25±12,п	25±12,п	65±30,п	65±30,п
Импульс с провалом на вершине	6±2,п	6±2,п	12±4,п	12±4,п
Двухэкспоненциальный	25±15,п	25±15,п	100±40,п	100±40,п
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	10±5,п	10±5,п	25±10,п	25±10,п

Таблица 4.2. Шумовая ошибка

Тип импульса	Измеритель 3 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум средним порогам			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	[8..0],м	[37..8],м	[8..0],м	[37..8],м
Экспоненциальный	[30..0],с	[30..110],с	[115..0],с	[115..200]
Гауссовский	[25..0],м	[25..100],с	[75..0],с	[75..200],с
Экспоненциально-степенной	[83..0],п	[83..>500],п	[83..0],п	[83..>500],п
Синусный	[16..0],м	[16..83],м	[16..0],м	[16..83],м
Синус-квадратный	[25..0],м	[25..95],м	[37..0],с	[37..150],с
Импульс с провалом на вершине	[7..0],м	[7..27],м	[7..0],м	[7..20],м
Двухэкспоненциальный	[35..0],с	[35..130],с	[180..0],с	[180..200],с
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	[7..0],м	[7..27],м	[7..0],м	[7..27],м

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

$XX \pm X$ - среднее значение величины и разброс;

[XX...XX] - диапазон изменения величины;

* - наличие выбросов;

п - пилообразный характер;

м - монотонно;

с - ступенчатый характер.

Проведенные расчеты, показывают, что многопороговый измеритель с измерением длительности по двум средним порогам имеет меньшую систематическую погрешность измерения трапецеидального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного импульсов, импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза, меньшую шумовую ошибку измерения синусного импульса и импульса с провалом на вершине, в остальных случаях шумовая ошибка соизмерима или больше, чем у других двух, рассмотренных ранее, измерителей.

Основные результаты данной главы опубликованы [94,95].

Методика оценки погрешности измерения длительности импульсов алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум средним порогам и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения различных типов импульсов позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителя длительности изделия 5П-28, что отмечено в акте внедрения (приведены в приложении).

5 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПО ДВУМ РАЗНЕСЕННЫМ ПОРОГАМ

5.1 Анализ алгоритма формирования нормированного импульса по двум разнесенным порогам многопорогового измерителя длительности

Отличительной особенностью данного измерителя является возможность работы в большом динамическом диапазоне, в сложной электромагнитной обстановке и при отсутствии априорной информации о форме импульса. Как будет показано ниже измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов и исключает ошибку измерения в случае затянутого среза измеряемого импульса.

Структурная схема измерителя аналогична схеме, приведенной на рисунке 4.1. На рисунке 5.1 показаны эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя. Измеритель работает следующим образом, измеряемый импульс поступает на вход измерителя длительности и далее на все пороговые устройства (рисунок 5.1.а). Уровни срабатывания пороговых устройств расположены в логарифмическом масштабе по динамическому диапазону измерителя. В зависимости от формы и амплитуды импульса срабатывает определенное количество ПУ, триггеры формируют временные ворота (рисунки 5.1.б-е), соответствующие длительности входного импульса по уровню ПУ. Отклики от триггеров поступают на вход логического устройства, которое выбирает два отклика от самого чувствительного ПУ и верхнего из сработавших (рисунок 4.2.б,е). Далее эти отклики попадают на счетные устройства и сумматор со сдвигом на один разряд влево. Таким образом, на выходе устройства получается длительность, усредненная по измеренным откликам от двух ПУ.

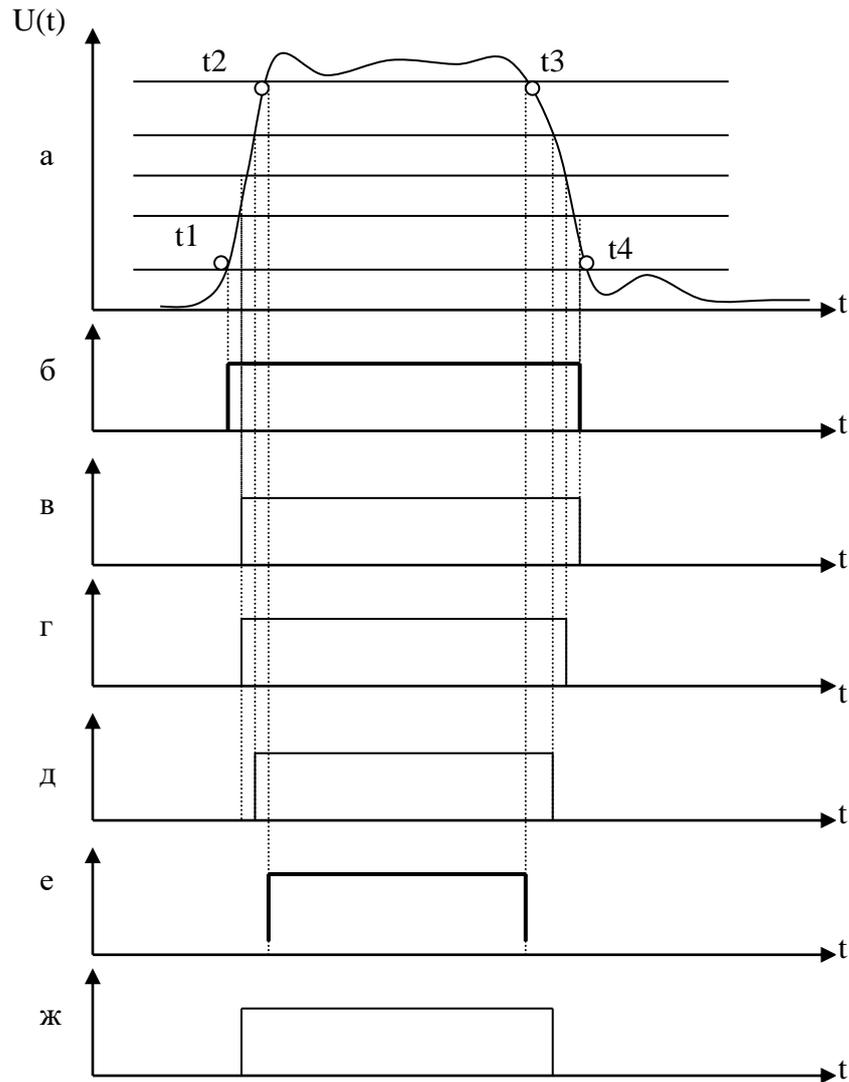


Рисунок 5.1 Эпюры напряжений

Уровни квантования в измерителе будем выбирать равномерно в логарифмическом масштабе. Расчет уровней аналогичен расчету в п. 2.1, а расчет измеренной длительности будет равен:

$$\tau_{изм} = \frac{\tau_0 + \tau_1}{2}, \quad (5.1)$$

где τ_0 - длительность импульса по уровню самого чувствительного порога;

τ_1 - длительность импульса по верхнему из сработавших порогов.

$$\tau_0 = t_{квизм1} - t_{низм1},$$

$$\tau_1 = t_{квизм2} - t_{низм2}$$

Поскольку измеренная длительность будет отличаться от истинной, то будет присутствовать систематическая ошибка измерения длительности:

$$\tau_{изм} = \frac{t_{кизм1} - t_{низм1} + t_{кизм2} - t_{низм2}}{2\tau_{ист}} - 1 \quad (5.2)$$

Проведем расчет систематической и случайной погрешностей для девяти типов импульсов: трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, импульса с провалом на вершине, двухэкспоненциального импульса и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

5.2 Оценка систематической погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум разнесенным порогам

5.2.1 Систематическая погрешность измерения трапецеидального импульса

Систематическая погрешность измерения длительности импульса определяется по формуле (5.2).

Пусть на вход измерителя поступает трапецеидальный импульс, описываемый функцией (1.7), рисунок 2.3.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.7), решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания самого чувствительного и верхнего из сработавших порогов:

$$t_{низм1} = \frac{U_0}{U_m(t)} \tau f, \quad (5.3)$$

$$t_{кизм1} = 0.5 \left(\frac{-2 U_0(t) \tau s + 2 U_m(t) \tau ist + U_m(t) \tau f + U_m(t) \tau s}{U_m(t)} \right), \quad (5.4)$$

$$t_{низм2} = \frac{U_k}{U_m(t)} \tau f \quad (5.5)$$

$$t_{кизм2} = 0.5 \left(\frac{-2 U_k(t) \tau s + 2 U_m(t) \tau ist + U_m(t) \tau f + U_m(t) \tau s}{U_m(t)} \right) \quad (5.6)$$

где $U_0(t)$ - уровень самого чувствительного порога;

$U_k(t)$ – уровень верхнего из сработавших порогов.

Подставим (5.3)-(5.6) в (5.2), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(Um) = \frac{U_k \cdot \tau s - Um \cdot \tau f - Um \cdot \tau s + U_k \cdot \tau f + U_0 \cdot \tau s + U_0 \cdot \tau f}{Um \cdot \tau_{ист}} \quad (5.7)$$

На рисунке 5.2 и рисунке 5.3 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

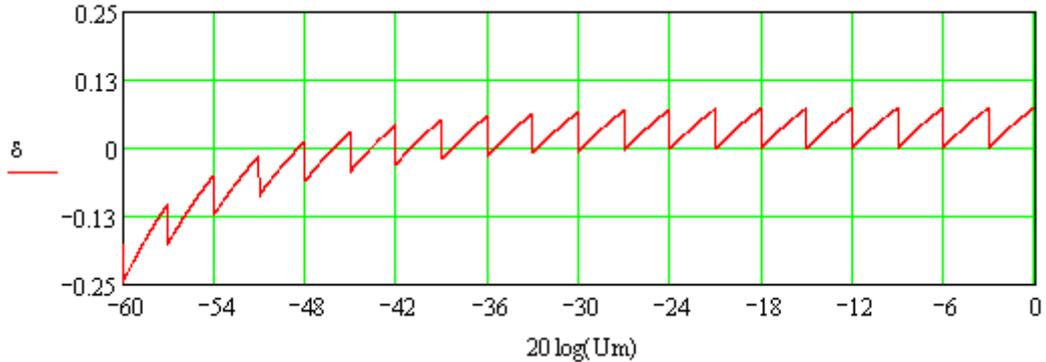


Рисунок 5.2 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

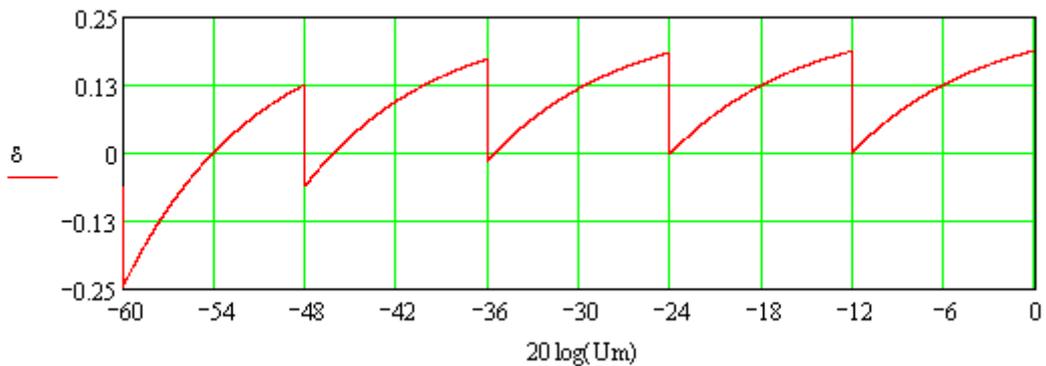


Рисунок 5.3 Зависимость систематической погрешности измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.2 Систематическая погрешность измерения экспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциальный импульс, описываемый функцией (1.8), рисунок 2.6.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.8), решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания самого чувствительного и верхнего из сработавших порогов:

$$t_{\text{низм1}} = -\ln\left(-\frac{10U_{s-1}-11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1 \quad (5.8)$$

$$t_{\text{кизм1}} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_{s-1}}{U_m\left(-11+10e^{-\frac{\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 \quad (5.9)$$

$$t_{\text{низм2}} = -\ln\left(-\frac{10U_{s+1}-11U_m}{U_m}\right) \cdot \tau_1 \quad (5.10)$$

$$t_{\text{кизм2}} = \tau_{ist} - \ln\left(\frac{-10U_{s+1}}{U_m\left(-11+10e^{-\frac{\tau_{ist}}{\tau_1}}\right)}\right) \cdot \tau_2 \quad (5.11)$$

Подставим (5.8)-(5.11) в (5.2), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности экспоненциального импульса. На рисунке 5.4 и рисунке 5.5 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

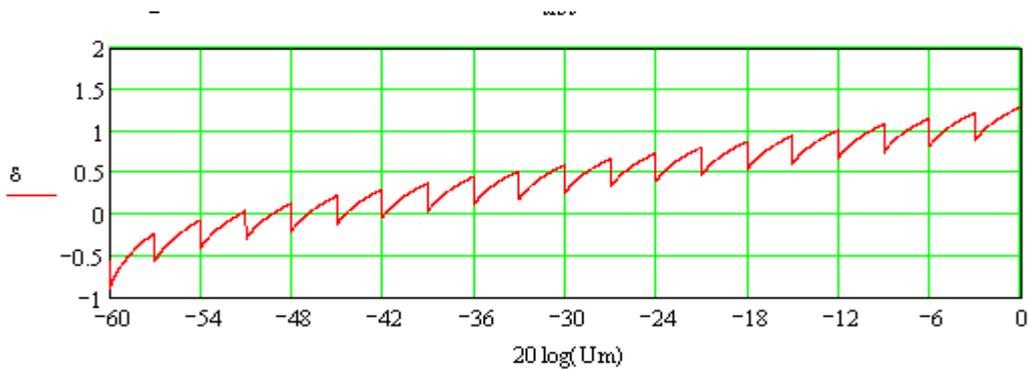


Рисунок 5.4 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

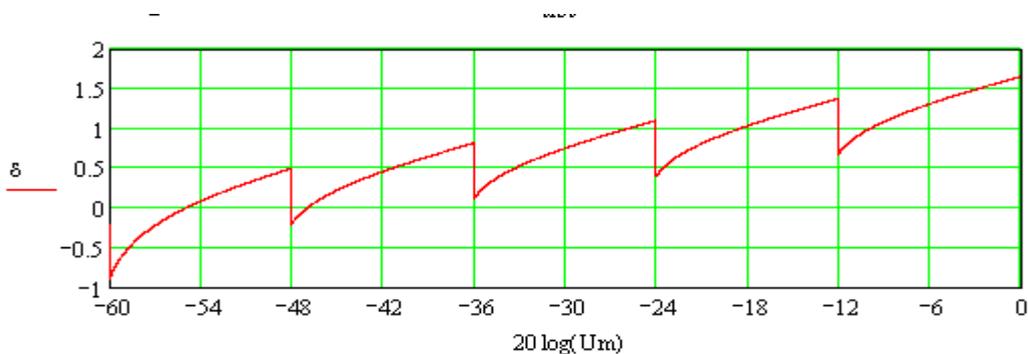


Рисунок 5.5 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.3 Систематическая погрешность измерения гауссовского импульса

Пусть на вход измерителя поступает гауссовский импульс, описываемый функцией (1.9), рисунок 2.9.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.9), решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания самого чувствительного и верхнего из сработавших порогов:

$$t_{\text{низм1}} = -\frac{\tau_{\text{уст}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_o}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}, \quad (5.12)$$

$$t_{\text{квизм1}} = \frac{\tau_{\text{уст}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_o}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}} \quad (5.13)$$

$$t_{\text{низм2}} = -\frac{\tau_{\text{уст}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}}, \quad (5.14)$$

$$t_{\text{квизм2}} = \frac{\tau_{\text{уст}}}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{U_k}\right) \cdot \frac{1}{\ln(2)}} \quad (5.15)$$

Подставим(5.12)-(5.15) в (5.2), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности трапецеидального импульса:

$$\delta(Um) = \frac{\sqrt{-\ln(2) \cdot \ln\left(\frac{U_o}{U_m}\right)} + \sqrt{-\ln(2) \cdot \ln\left(\frac{U_k}{U_m}\right)}}{2\ln(2)} \quad (5.16)$$

На рисунке 5.6 и рисунке 5.7 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

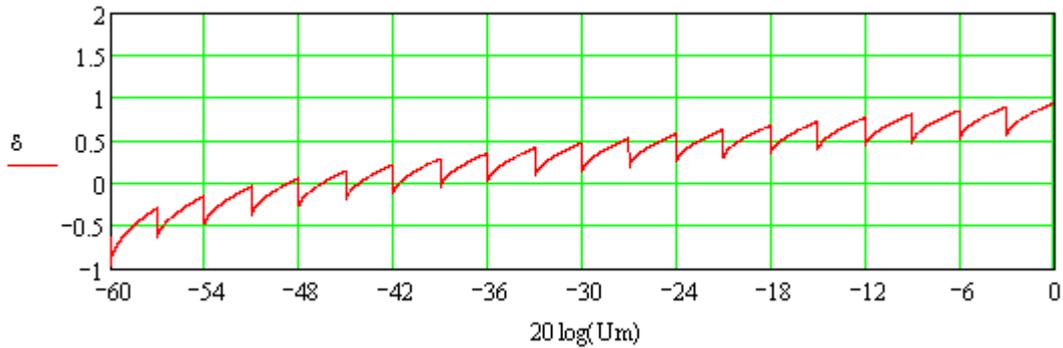


Рисунок 5.6 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

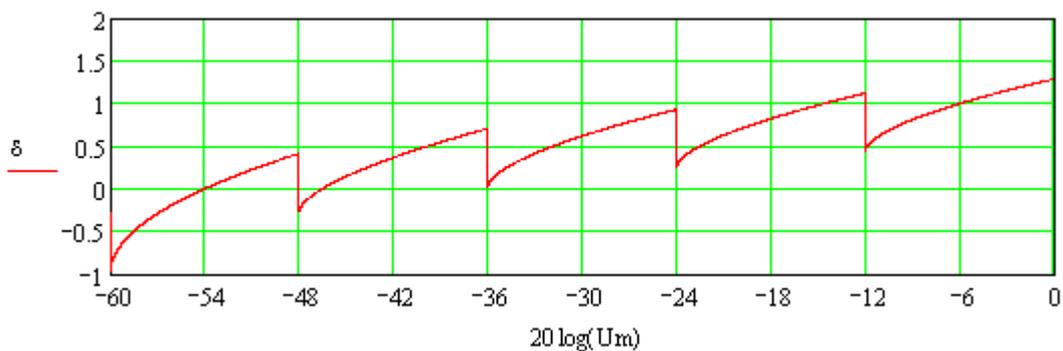


Рисунок 5.7 Зависимость систематической погрешности измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.4 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Пусть на вход измерителя поступает экспоненциально-степенной импульс, описываемый функцией (1.10), рисунок 2.12.

Подставим в (2.5), (2.6) выражение (1.10), поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов изображены на рисунках 5.8 – 5.11 для различных значений параметра m и шага квантования.

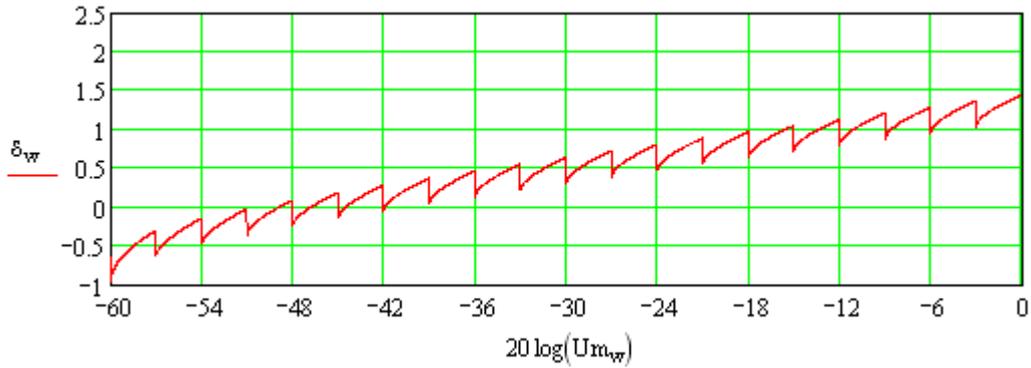


Рисунок 5.8 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

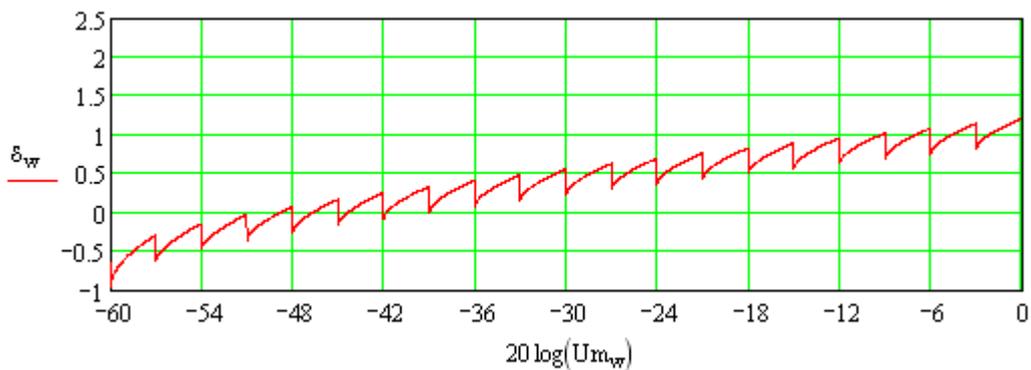


Рисунок 5.9 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=3$ дБ.

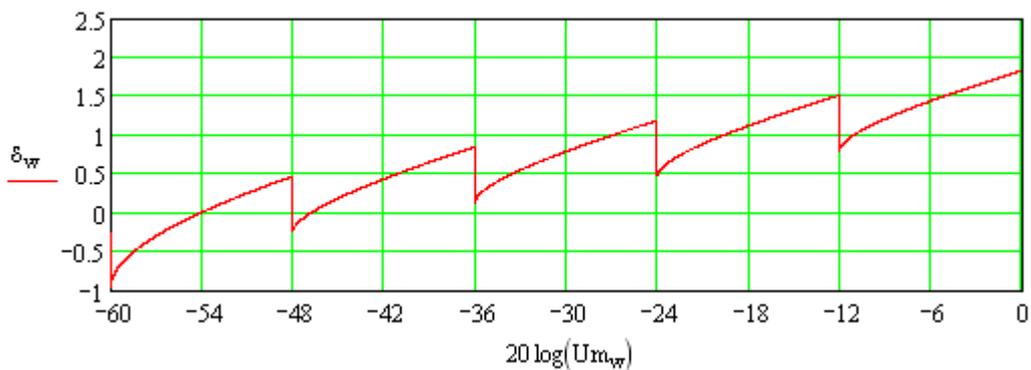


Рисунок 5.10 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 1$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

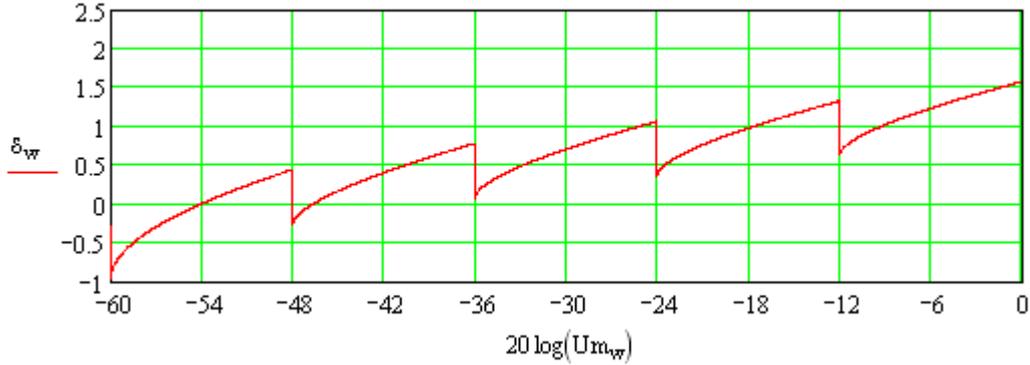


Рисунок 5.11 Зависимость систематической погрешности измерения длительности экспоненциального-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при $m = 2$ и шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.5 Систематическая погрешность измерения синусного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синусный импульс, описываемый функцией (1.11), рисунок 2.16.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.11), решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания самого чувствительного и верхнего из сработавших порогов:

$$t_{\text{низм1}} = \frac{3\tau_{\text{уст}}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_o}{U_m}\right), \quad (5.17)$$

$$t_{\text{квзм1}} = \frac{3\tau_{\text{уст}}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_o}{U_m}\right) \right), \quad (5.18)$$

$$t_{\text{низм2}} = \frac{3\tau_{\text{уст}}}{2\pi} \arcsin\left(\frac{U_{\kappa}}{U_m}\right), \quad (5.19)$$

$$t_{\text{квзм2}} = \frac{3\tau_{\text{уст}}}{2\pi} \left(\pi - \arcsin\left(\frac{U_{\kappa}}{U_m}\right) \right). \quad (5.20)$$

Подставим (5.17)-(5.20) в (5.2), получим выражение для относительной систематической погрешности формирования нормированного импульса при измерении длительности синусного импульса:

$$\delta(Um) = -\frac{3}{2} \cdot \frac{-\pi + \arcsin\left(\frac{U_o}{U_m}\right) + \arcsin\left(\frac{U_{\kappa}}{U_m}\right)}{\pi} \quad (5.21)$$

На рисунке 5.12 и рисунке 5.13 приведены графики зависимости систематической погрешности формирования длительности от амплитуды входного сигнала для шагов квантования 3 дБ и 12 дБ соответственно.

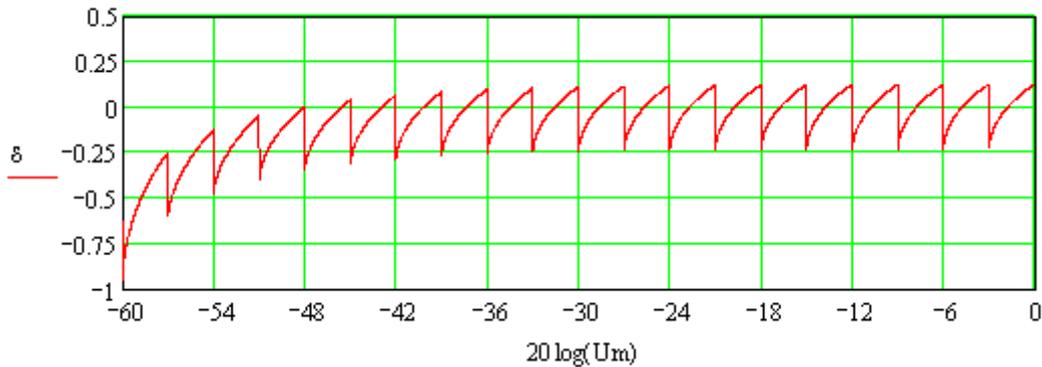


Рисунок 5.12 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

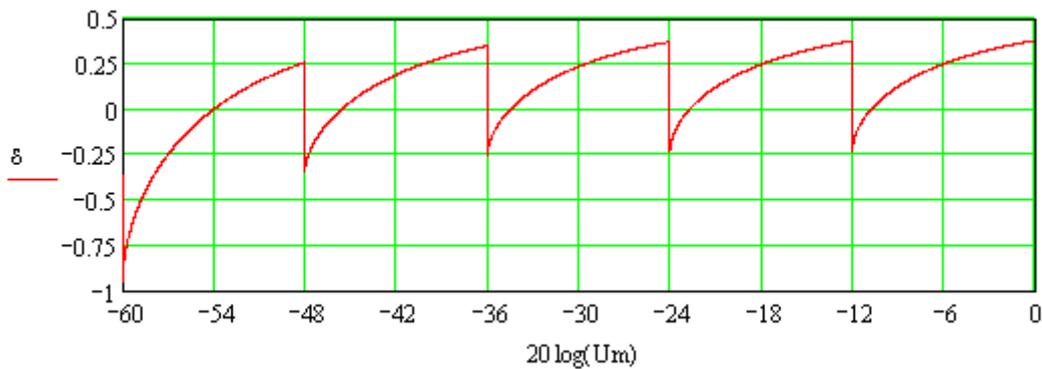


Рисунок 5.13 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.6 Систематическая погрешность измерения синус-квдратного импульса

Пусть на вход измерителя поступает синус-квдратный импульс, описываемый функцией (1.12), рисунок 2.19.

Подставим в уравнения (2.5), (2.6) выражение (1.12), решим получившиеся уравнения относительно моментов срабатывания самого чувствительного и верхнего из сработавших порогов:

$$t_{\text{низмл}} = \frac{2\tau_{\text{уст}}}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_o}{U_m}}\right), \quad (5.22)$$

$$t_{\text{квизм1}} = \frac{2\tau_{\text{ucm}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin \left(\sqrt{\frac{U_o}{U_m}} \right) \right], \quad (5.23)$$

$$t_{\text{нвизм2}} = \frac{2\tau_{\text{ucm}}}{\pi} \arcsin \left(\sqrt{\frac{U_{\kappa}}{U_m}} \right), \quad (5.24)$$

$$t_{\text{квизм2}} = \frac{2\tau_{\text{ucm}}}{\pi} \left[\pi - \arcsin \left(\sqrt{\frac{U_{\kappa}}{U_m}} \right) \right]. \quad (5.25)$$

Тогда систематическая погрешность измерения длительности синус-квадратного импульса равна:

$$\delta(U_m) = \frac{3\sqrt{\tau_{\text{ист}}}}{2} \cdot \frac{\arcsin\left(\sqrt{\frac{U_o}{U_m}}\right) + \arcsin\left(\sqrt{\frac{U_{\kappa}}{U_m}}\right)}{\pi \cdot \tau_{\text{ист}}} - 1 \quad (5.26)$$

Зависимости систематической погрешности измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{дБ}$ и $N=12\text{дБ}$ приведены на рисунках 5.14 и 5.15.

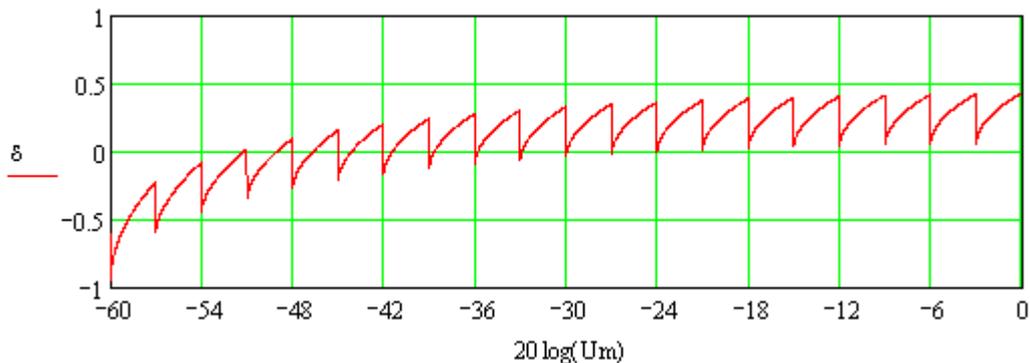


Рисунок 5.14 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3\text{ дБ}$.

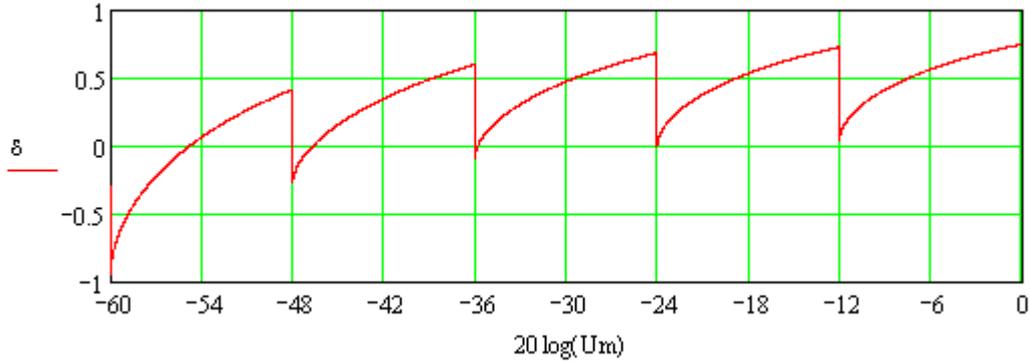


Рисунок 5.15 Зависимость систематической погрешности измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.7 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Пусть на вход измерителя поступает импульс с провалом на вершине, описываемый функцией (1.13), рисунок 2.22.

Подставим в (2.5), (2.6) выражение (1.13), поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности импульсов с провалом на вершине изображены на рисунках 5.16, 5.17.

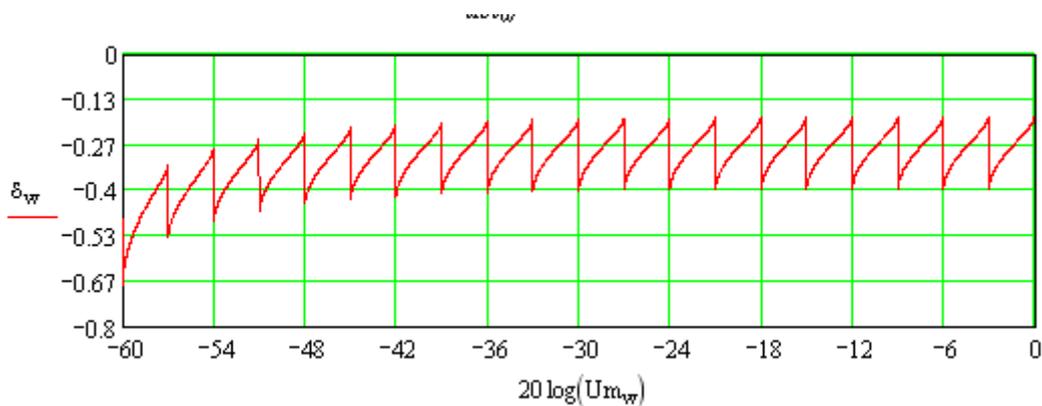


Рисунок 5.16 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

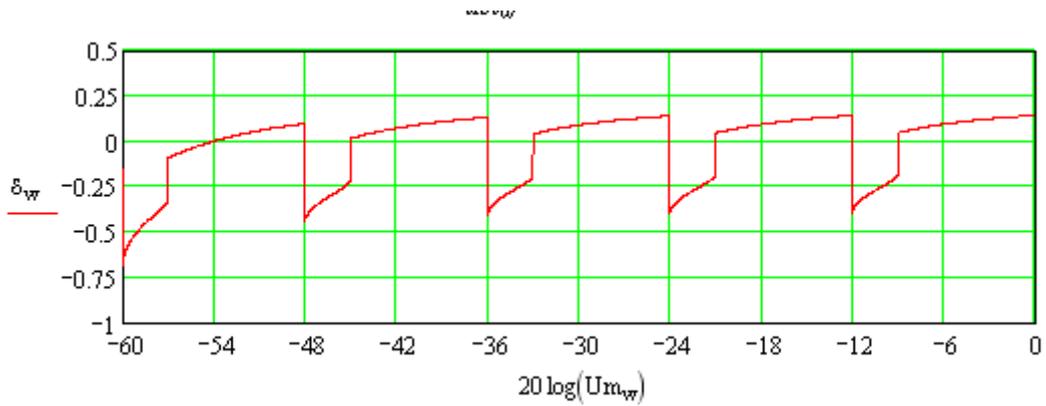


Рисунок 5.17 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Пусть на вход измерителя поступает двухэкспоненциальный импульс, описываемый функцией (1.14), рисунок 2.25.

Подставим в (2.5), (2.6) выражение (1.14), поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов изображены на рисунках 5.18, 5.19.

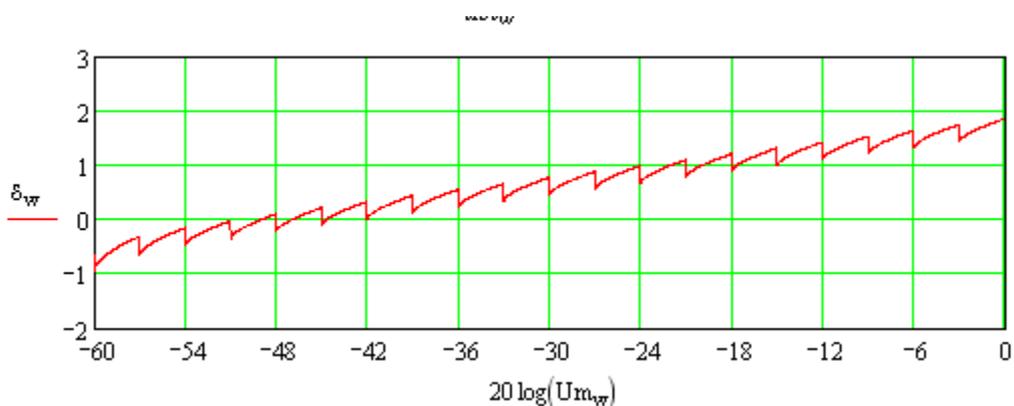


Рисунок 5.18 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

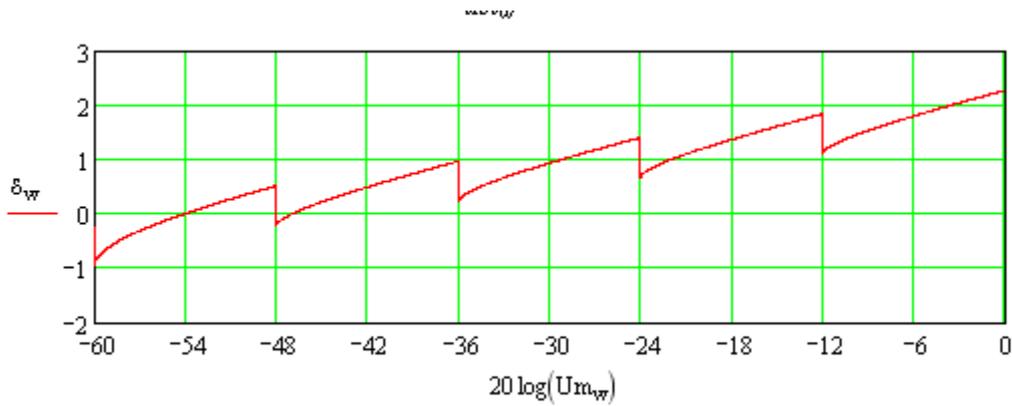


Рисунок 5.19 Зависимость систематической погрешности измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.2.8 Численный эксперимент по расчету систематической погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [94]

Пусть на вход измерителя поступает импульса с осцилляциями на вершине и после среза, описываемый функцией (1.15), рисунок 2.27.

Подставим в (2.5), (2.6) выражение (1.15), поскольку полученные уравнения являются трансцендентными, то их решения находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза изображены на рисунках 5.20, 5.21.

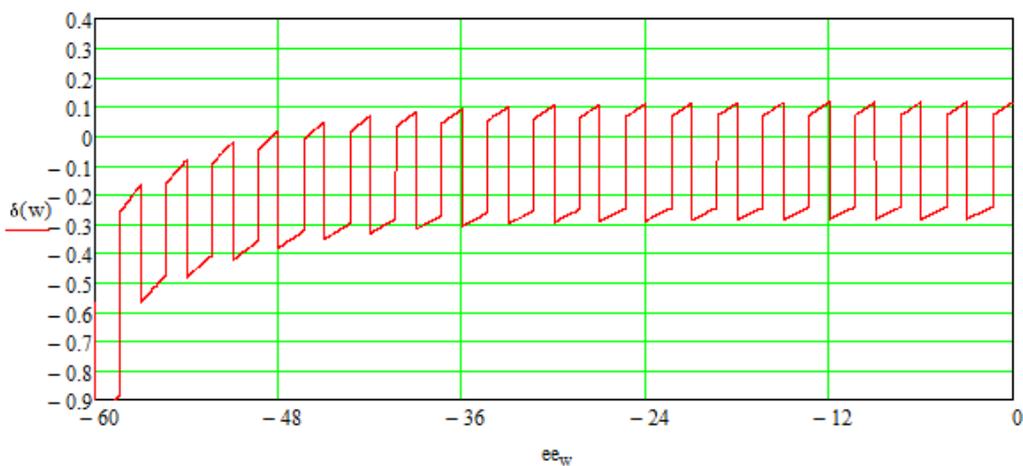


Рисунок 5.20 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ.

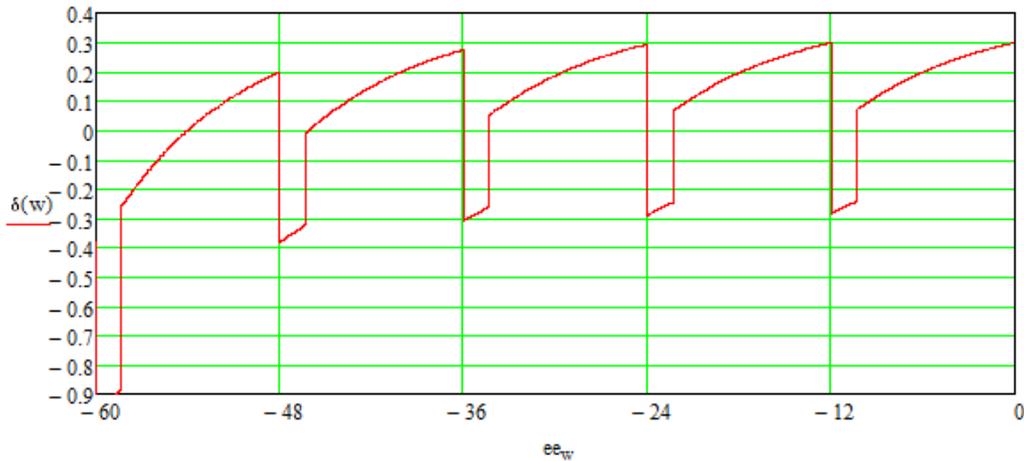


Рисунок 5.21 Зависимость систематической погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ.

5.3 Оценка случайной погрешности измерения длительности многопорогового измерителя с измерением нормированной длительности по двум разнесенным порогам

5.3.1 Случайная погрешность измерения трапецеидального импульса

Как было показано ранее, существенное влияние на моменты срабатывания и отпускания пороговых устройств многопорогового измерителя длительности оказывают шумы приемника. При срабатывании 2-х порогов, в 4-х точках, случайная (шумовая) погрешность будет иметь вид (4.32):

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ш}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_{нуз\text{м}1})} + \frac{1}{S^2(t_{куз\text{м}1})} + \frac{1}{S^2(t_{нуз\text{м}2})} + \frac{1}{S^2(t_{куз\text{м}2})}}$$

Методика расчета случайной ошибки аналогична п. 2.3.2., с учетом большего количества моментов срабатывания.

Суммарная ошибка равна (4.33):

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2} + \frac{\tau_f^2}{U_m^2} + \frac{\tau_s^2}{U_m^2}} = \frac{\sigma_{ш}}{U_m} \sqrt{\tau_f^2 + \tau_s^2 + \tau_f^2 + \tau_s^2}$$

Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала, приведена на рисунке 5.22

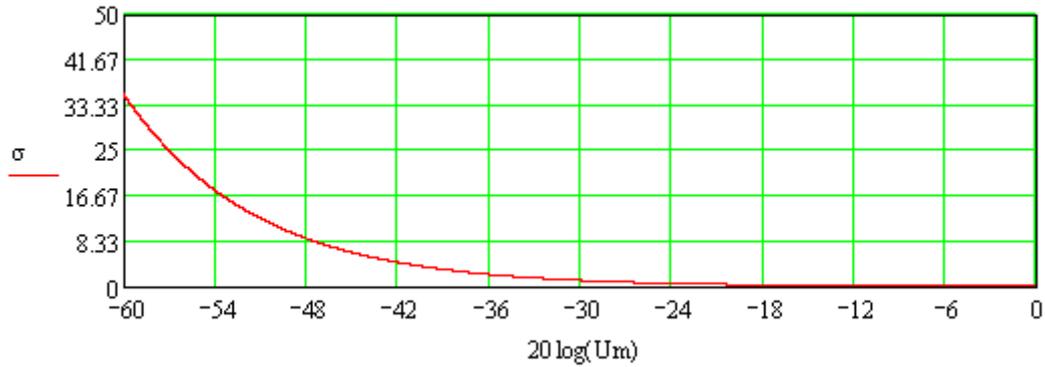


Рисунок 5.22 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности трапецеидального импульса от амплитуды входного сигнала

5.3.2 Случайная погрешность измерения экспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса находим производную функции (1.8), описывающей его форму (2.19).

Моменты срабатывания порогов определяются выражениями (5.8)-(5.11).

Подставляя выражения (5.8)-(5.11) в (2.19), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{квизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_u}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\tau_1^2}{(U_m - U_o)^2} - \frac{2\tau_2^2}{U_k^2}} \quad (5.28)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности экспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (5.28) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 5.23-5.25.

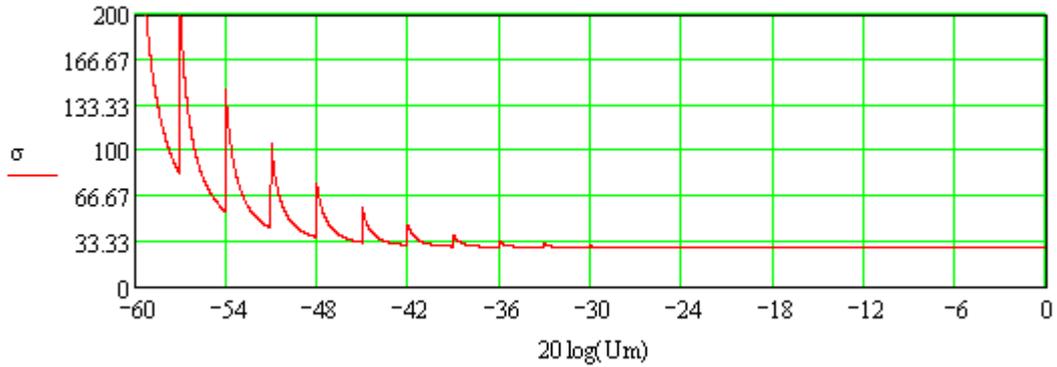


Рисунок 5.23 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

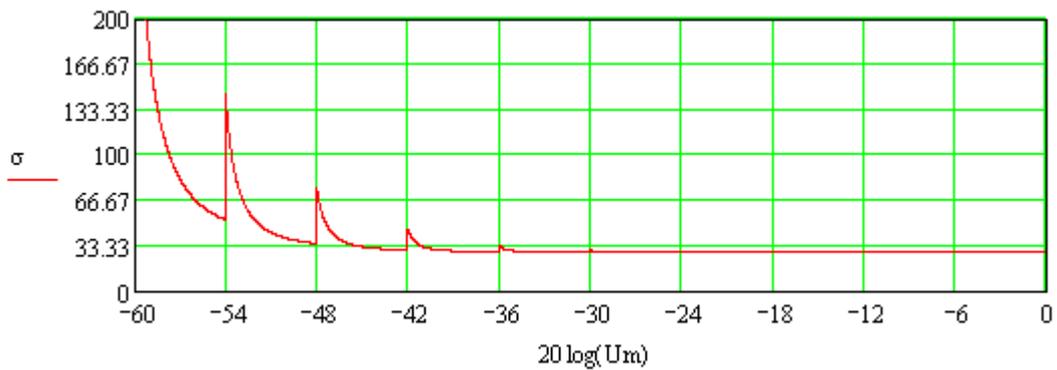


Рисунок 5.24 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

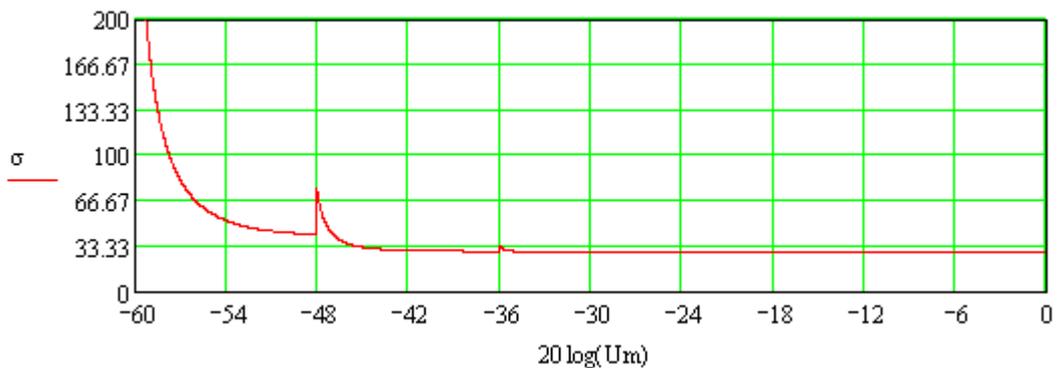


Рисунок 5.25 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.3 Случайная погрешность измерения гауссовского импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса находим производную функции (1.9), описывающей его форму (2.25).

Подставляя выражения (5.12)-(5.15) в (2.25), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{\text{ш}} \tau_{\text{исм}}}{4\sqrt{2}\sqrt{\ln(2)}} \sqrt{\frac{2}{U_0^2 \ln(U_m/U_0)} + \frac{2}{U_k^2 \ln(U_m/U_k)}}. \quad (5.29)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности гауссовских импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (5.29) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 5.26-5.28.

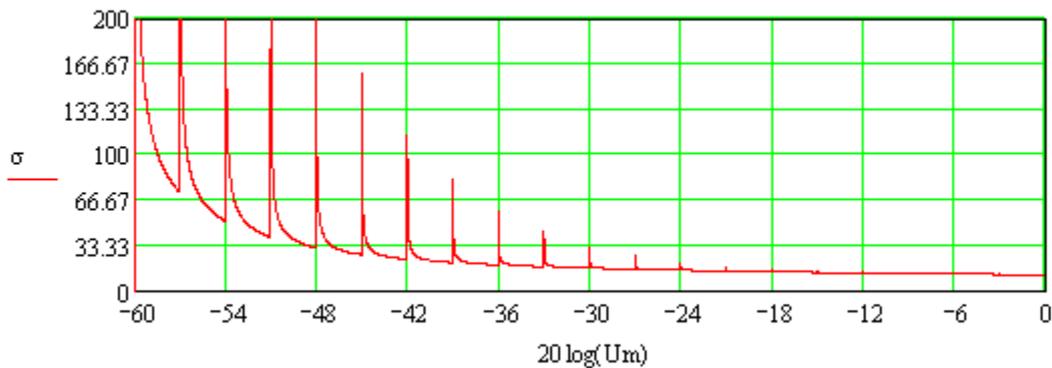


Рисунок 5.26 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

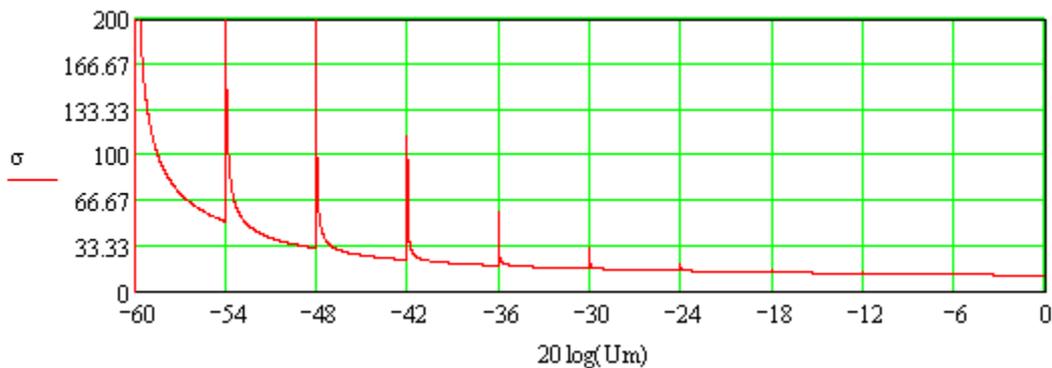


Рисунок 5.27 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

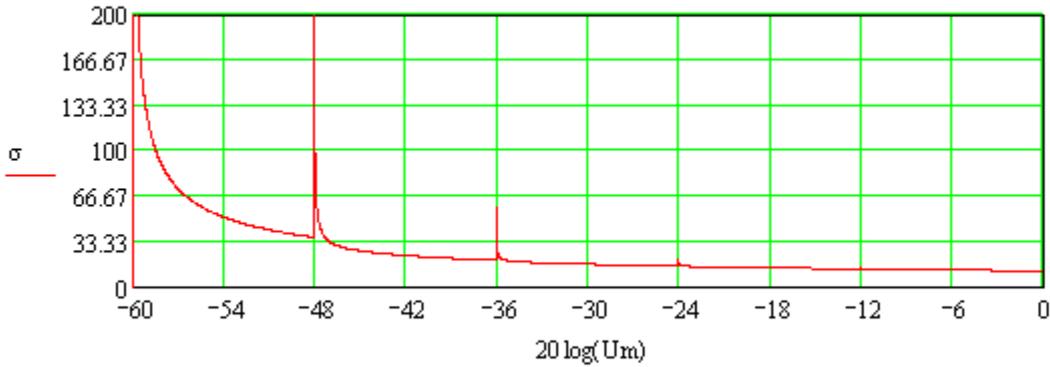


Рисунок 5.28 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности гауссовского импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.4 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения экспоненциально-степенного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса находим производную функции (1.10), описывающей его форму (2.29)

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низ}1,2}$ и $t_{\text{киз}1,2}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов от амплитуды входного сигнала при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 5.29-5.31.

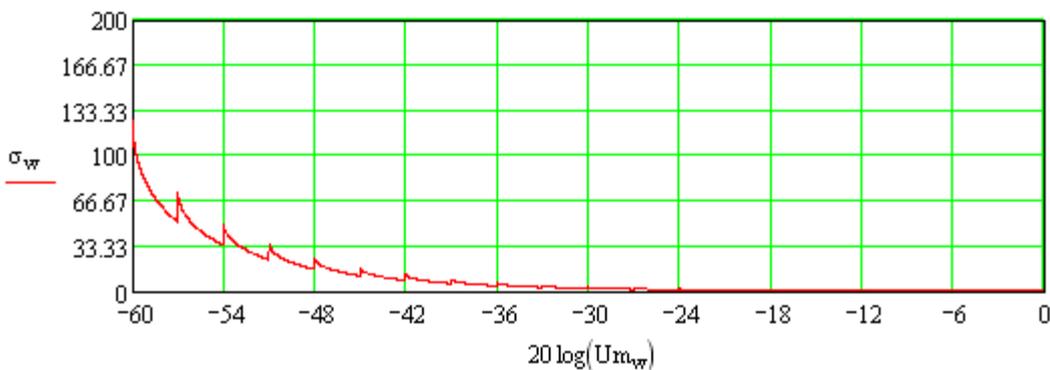


Рисунок 5.29 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

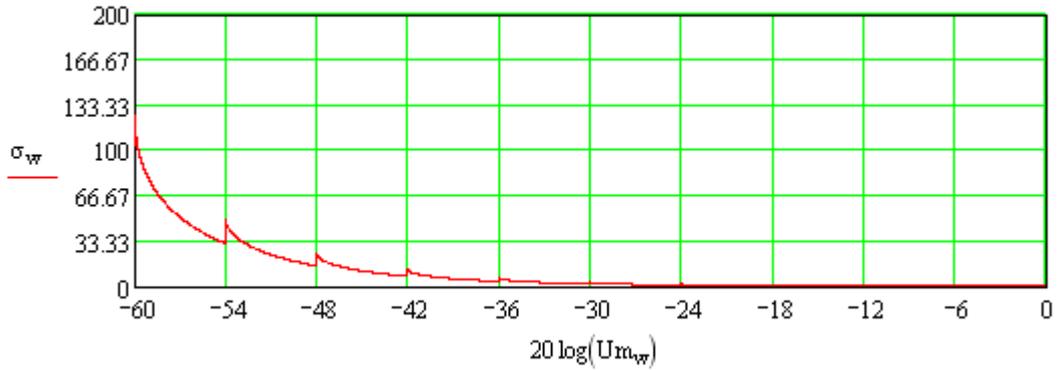


Рисунок 5.30 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

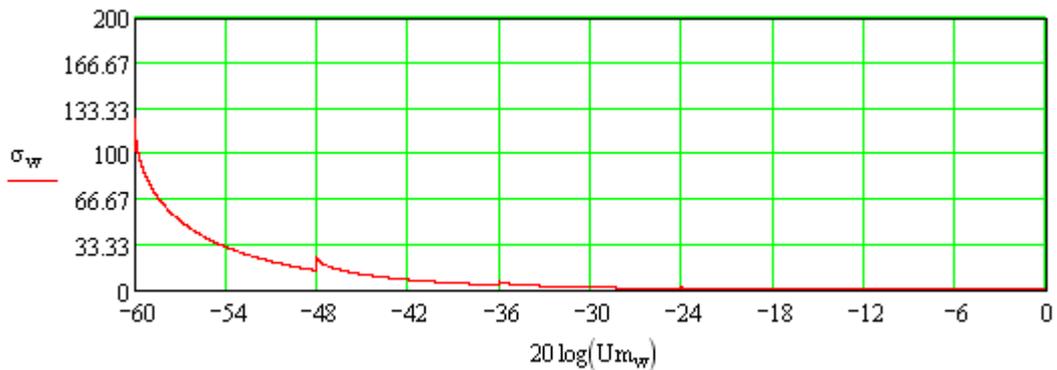


Рисунок 5.31 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности экспоненциально-степенного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.5 Случайная погрешность измерения синусного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса находим производную функции (1.11), описывающей его форму (2.30).

Подставляя выражения (5.17)-(5.20) в (2.30), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_{\tau} = \frac{3\tau_{\text{исл}}\sigma_{\text{ш}}}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2}{U_m^2 - U_o^2} + \frac{2}{U_m^2 - U_k^2}}. \quad (5.30)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синусных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (5.30) при $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 5.32-5.34.

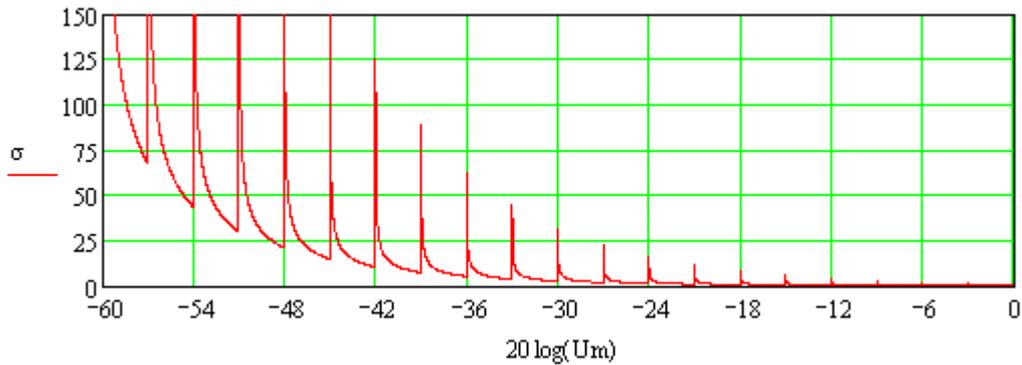


Рисунок 5.32 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

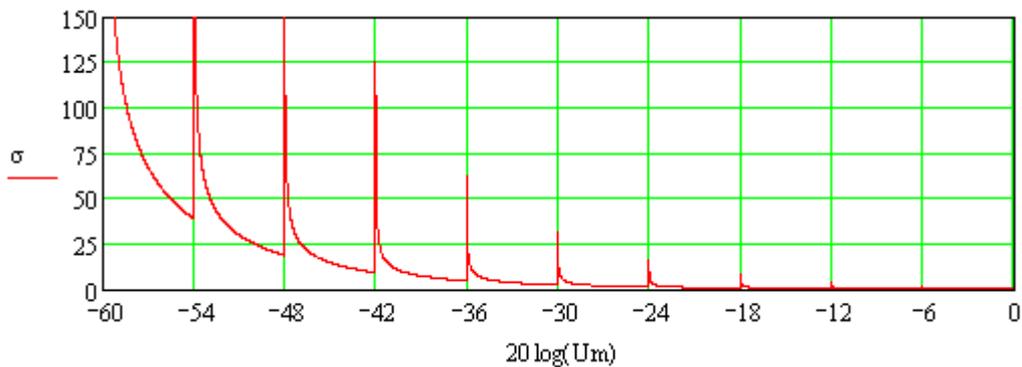


Рисунок 5.33 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

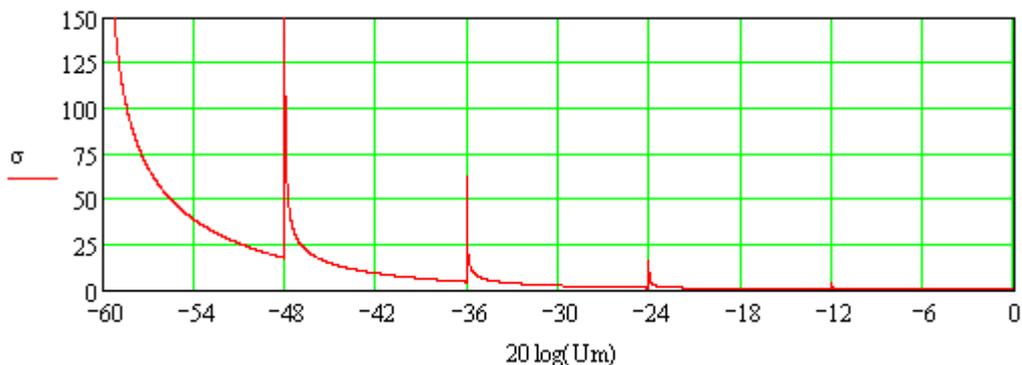


Рисунок 5.34 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синусного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.6 Случайная погрешность измерения синус-квадратного импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса находим производную функции (1.12), описывающей его форму (2.34).

Подставляя выражения (5.22)-(5.25) в (2.31), находим крутизну импульса в моменты $t_{\text{низ}1,2}$ и $t_{\text{киз}1,2}$.

По формуле (4.32) находим суммарную ошибку:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_u \tau_{\text{уст}}}{\pi \sqrt{2}} \sqrt{\frac{2}{U_o(U_m - U_o)} + \frac{2}{U_k(U_m - U_o)}} \quad (5.31)$$

Зависимости шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратных импульсов от амплитуды входного сигнала, рассчитанные по формуле (5.31) при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 5.35-5.37.

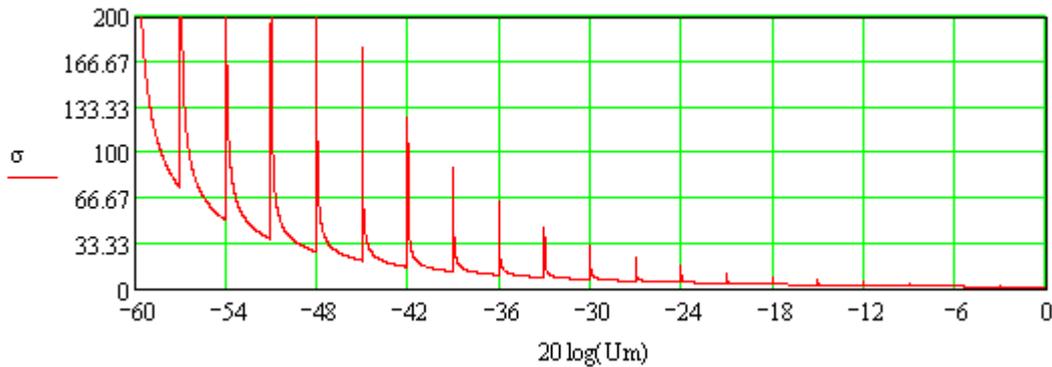


Рисунок 5.35 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

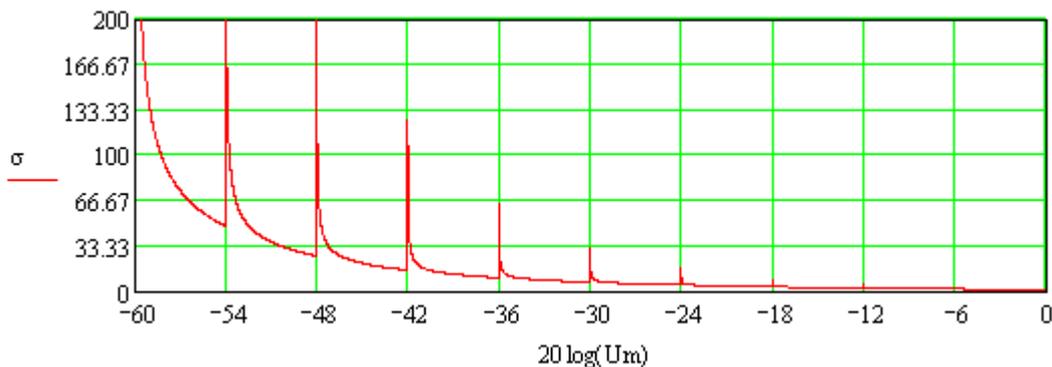


Рисунок 5.36 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

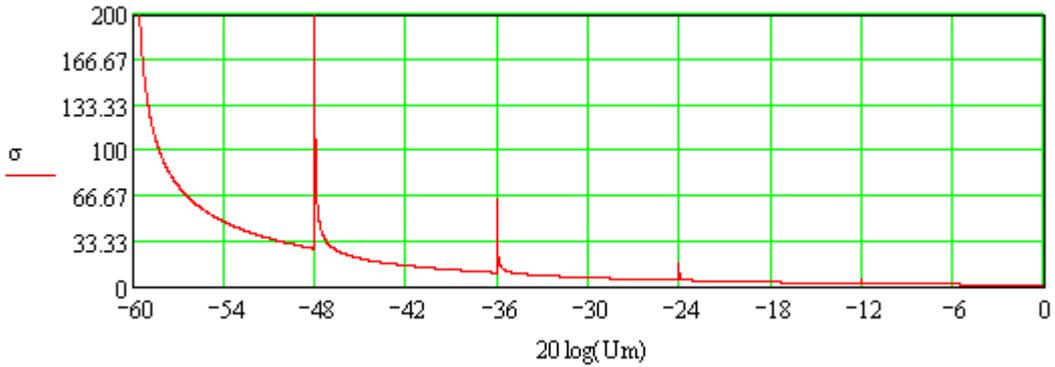


Рисунок 5.37 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности синус-квадратного импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.7 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с провалом на вершине

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине находим производную функции (1.13), описывающей его форму (2.38).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}1,2}$ и $t_{\text{кизм}1,2}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульсов с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 5.38-5.40.

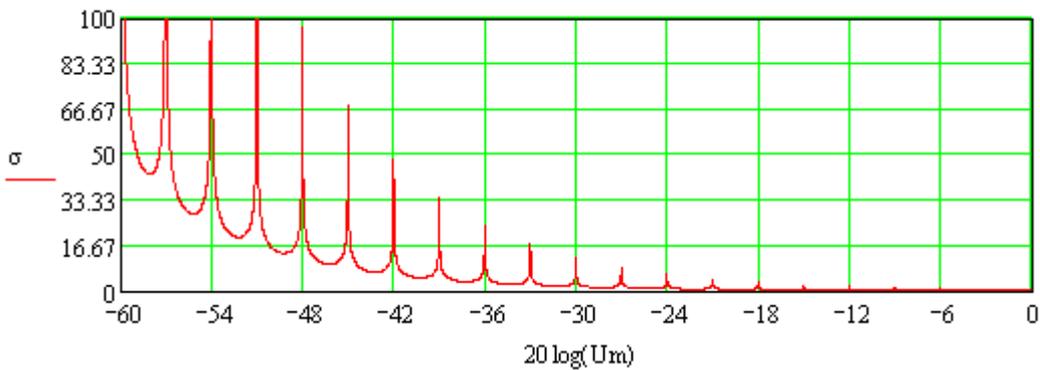


Рисунок 5.38 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

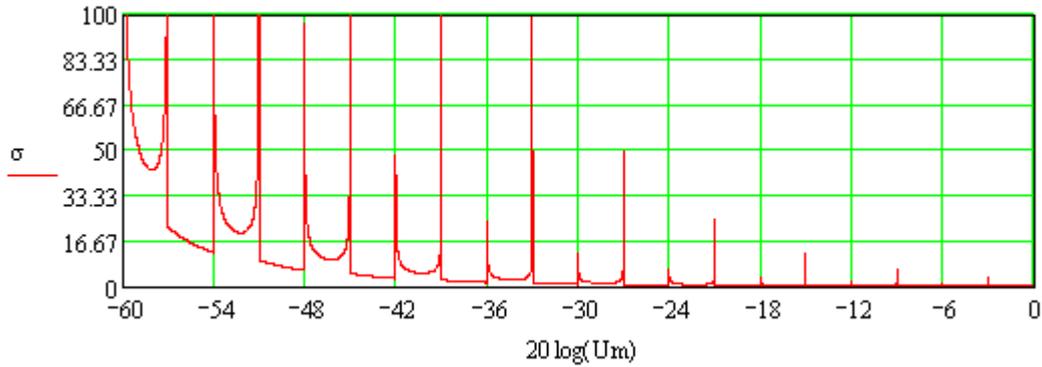


Рисунок 5.39 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

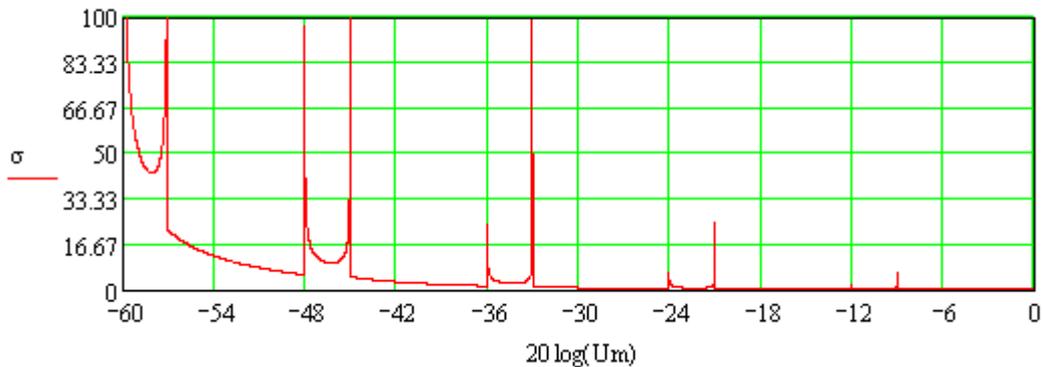


Рисунок 5.40 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с провалом на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.8 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения двухэкспоненциального импульса

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса находим производную функции (1.14), описывающей его форму (2.39).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{клизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциальных импульсов от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ приведены на рисунках 5.41-5.43.

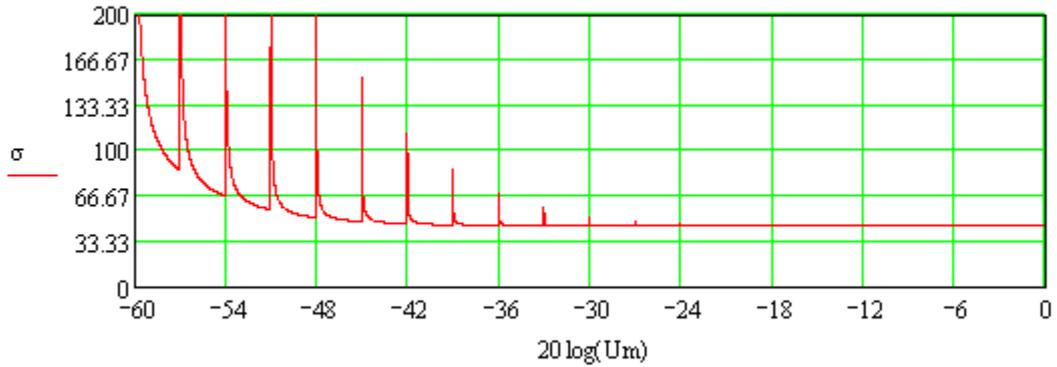


Рисунок 5.41 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

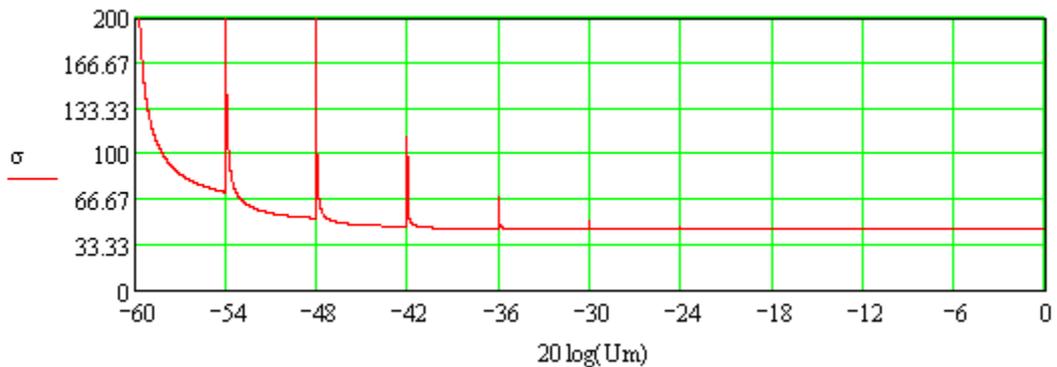


Рисунок 5.42 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

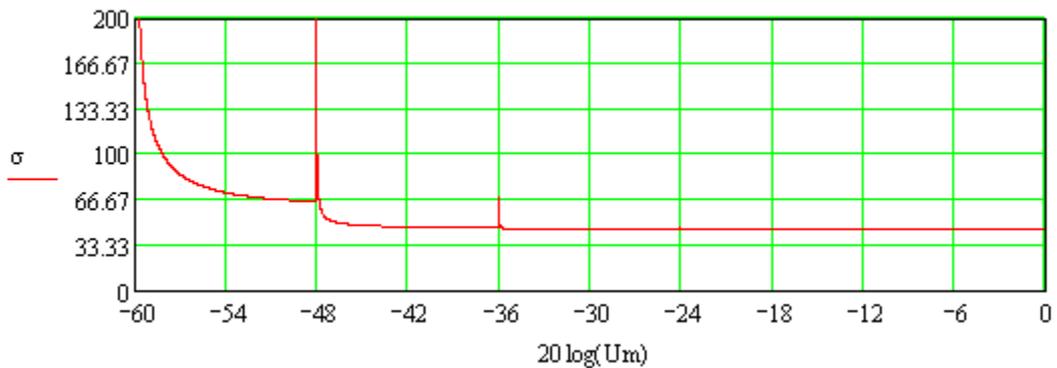


Рисунок 5.43 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности двухэкспоненциального импульса от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.3.9 Численный эксперимент по расчету случайной погрешности измерения импульса с осцилляциями на вершине и после среза [95]

Для расчета шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза находим производную функции (1.15), описывающей его форму (2.40).

Так как для импульса данной формы для моментов времени $t_{\text{низм}}$ и $t_{\text{кизм}}$ невозможно получить аналитические выражения, то они находились численными методами на ПЭВМ.

Результаты расчета зависимостей шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ, $N=6$ дБ и $N=12$ дБ, приведены на рисунках 5.44-5.46.

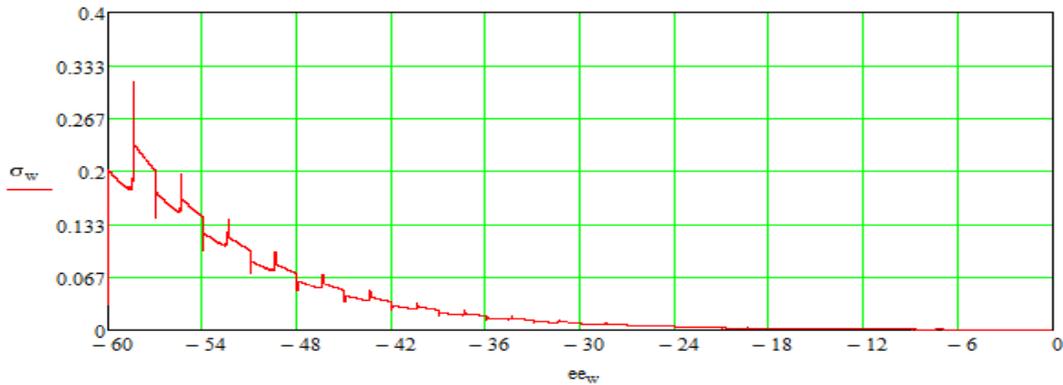


Рисунок 5.44 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=3$ дБ

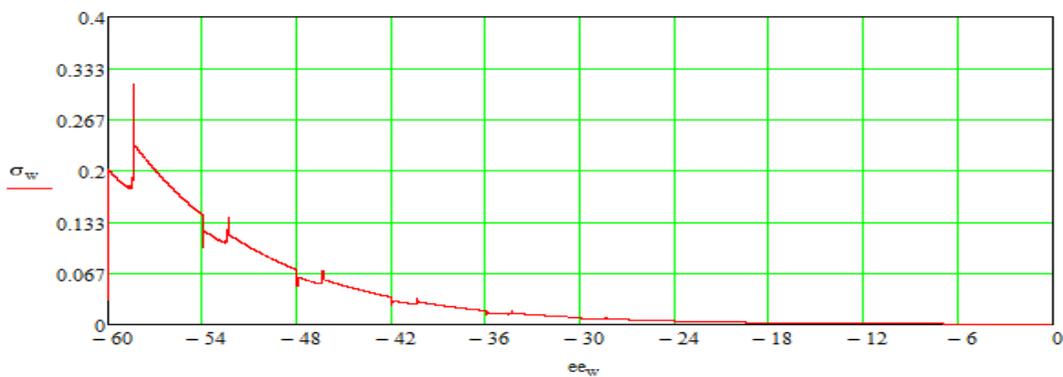


Рисунок 5.45 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=6$ дБ

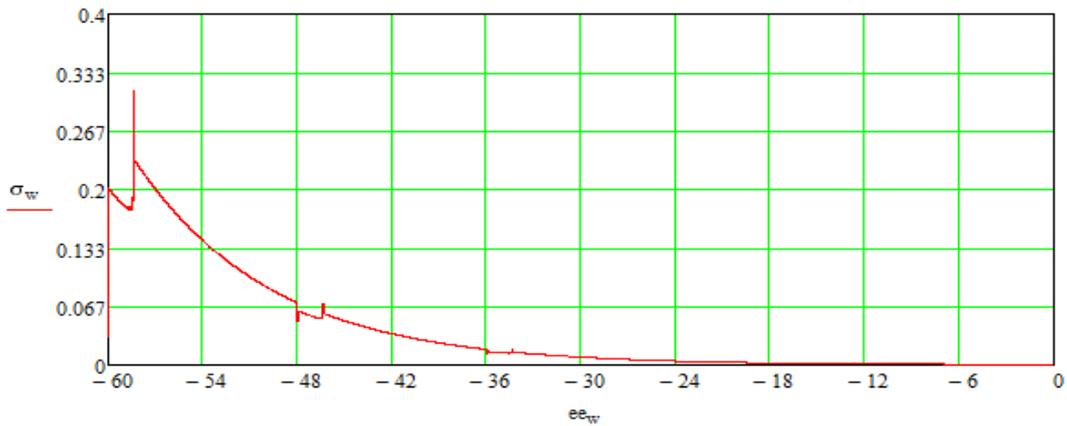


Рисунок 5.46 Зависимость шумовой ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и после среза от амплитуды входного сигнала при шаге квантования $N=12$ дБ

5.4 Выводы

В главе проведен математический анализ алгоритма работы многопорогового измерителя с формированием длительности по двум разнесенным порогам в широком динамическом диапазоне для различных типов импульсов. Обоснована структура измерителя длительности, реализующая предложенный многопороговый алгоритм измерения.

Получение аналитических выражений для погрешностей многопорогового измерителя позволило разработать методику расчета систематической и случайной составляющих погрешности многопорогового измерителя с измерением длительности по двум разнесенным порогам для девяти типов импульсов (трапецеидальной, экспоненциальной, гауссовской, экспоненциально-степенной, синусной, синус-квадратной, двухэкспоненциальной, с провалом на вершине и с осцилляциями на вершине и после среза), характерных для приемников импульсных сигналов

Результаты исследований алгоритма работы многопорогового измерителя по восьми типам импульсов являются оригинальными.

Для систематизации и сравнительного анализа приведены, известные ранее, результаты расчета систематической и случайной погрешностей трапецеидального импульса.

Для трапецеидального импульса. СО измерения длительности трапецеидального импульса монотонно возрастает от 0% до 8%. При приближении к уровню чувствительности СО увеличивается до 25% при шаге квантования 3 дБ. Ошибка, в основном, сосредоточена выше нуля и уходит в отрицательную область при приближении к уровню чувствительности. ШО измерения длительности трапецеидального импульса увеличивается по мере приближения к чувствительности измерителя и составляет не более 35%. ШО не зависит от шага квантования.

Для экспоненциального импульса. СО монотонно возрастает от -25% до 125% с увеличением уровня сигнала, при шаге квантования 3 дБ и монотонно возрастает от -90% до 150% с увеличением уровня сигнала, при шаге квантования 12 дБ. ШО имеет пилообразный характер и возрастает от 28% до 50% с приближением к уровню чувствительности. Шаг квантования не оказывает существенного влияния.

Для гауссовского импульса. Максимальная СО измерения длительности гауссовского импульса составляет 90% при шаге 3 дБ, при шаге квантования 12 дБ возрастает до 125%. Ошибка не сосредоточена в одной области, а монотонно возрастает от -90% до 90% при шаге 3 дБ и до 120% при шаге 12 дБ. ШО измерения длительности гауссовского импульса увеличивается по мере приближения к уровню чувствительности до 200%. Присутствуют выбросы.

Для экспоненциально-степенного импульса. СО монотонно возрастает с ростом амплитуды сигнала от -90% до +140% при шаге 3 дБ и от -90 до +170% при шаге 12 дБ. Максимальная ошибка составляет 100% и 150% для разных значений шага квантования. ШО имеет ступенчатый характер и возрастает с уменьшением сигнала до 100%, не зависит от шага квантования.

Для синусного импульса. Среднее значение СО составляет -10%, ошибка имеет разброс относительно этого значения $\pm 15\%$. Максимальное значение составляет 25%. При увеличении шага квантования до 12 дБ ошибка становится симметричной относительно нуля и составляет $\pm 25\%$. ШО имеет ступенчатый характер и возрастает с уменьшением сигнала до 150%. Присутствуют выбросы, обусловленные попаданием порога на участок с минимальной крутизной.

Для синус-квадратного импульса. Максимальная СО равна 30% при шаге 3 дБ, ошибка сосредоточена относительно среднего значения 20% и имеет разброс 10%, разброс увеличивается до 60% при шаге квантования 12 дБ (среднее $30\% \pm 30\%$). ШО

аналогична ошибке измерения синусного импульса и имеет максимальное значение около 200% при минимальном уровне сигнала.

Для импульса с провалом на вершине. СО составляет $-30\% \pm 14\%$, максимальное значение 40%. При увеличении шага квантования ошибка увеличивается до 60% и становятся видны области ложного срабатывания измерителя по первому горбу импульса. ШО имеет зоны, где происходит неверное срабатывания верхнего порога. Среднее значение ШО монотонно увеличивается до 200% при уменьшении сигнала.

Для двухэкспоненциального импульса. СО монотонно возрастает с ростом амплитуды сигнала от -80 до +180% при шаге 3 дБ и от -80 до +230% при шаге 12 дБ. Максимальная ошибка составляет 180% и 230% для разных значений шага квантования. ШО имеет ступенчатый характер и возрастает с уменьшением сигнала от 40% до 67, 68, 70% при шаге 3,6,12 дБ соответственно.

Для импульса с осцилляциями на вершине и после среза. СО лежит в пределах 10% и увеличивается до -90% при приближении к уровню чувствительности при шаге квантования 3 дБ, СО имеет форму меандра. При шаге квантования 12 дБ СО в основном сосредоточена выше нуля и уходит в отрицательную область при приближении к уровню чувствительности. ШО составляет от 25% и ступенчато уменьшается до 0%. Принцип формирования выбросов в зоне малых амплитуд аналогичен первому измерителю.

Основные численные результаты расчетов систематической погрешности приведены в таблице 5.1

Основные численные результаты расчетов шумовой ошибки приведены в таблице 5.2

Таблица 5.1. Систематическая погрешность

Тип импульса	Измеритель 4 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум разнесенным порогам			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	4±4,п	[-25..0],п	6±7,п	[-25..13],п
Экспоненциальный	[-25..125],п	[-100..10],п	[-20..150],п	[-90..50],п
Гауссовский	[-25..90],п	[-90..10],п	[-25..125],п	[-90..40],п
Экспоненциально-степенной	[-25..140],п	[-90..10],п	[-25..170],п	[-90..50],п
Синусный	-10±15,п	[-75..0],п	5±20,п	[-75..0],п
Синус-квадратный	20±10,п	[-80..10],п	30±30,п	[-80..40],п
Импульс с провалом на вершине	-30±14,п	[-60..30],п	15±20,п	15±20,п
Двухэкспоненциальный	[-30..180],п	[-80..-30],п	[-30..-230],п	[-80..-30],п
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	-10±20,п	[-90..0],п	0±30,п	[-90..20],п

Таблица 5.2. Шумовая ошибка

Тип импульса	Измеритель 4 с алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум разнесенным порогам			
	Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 3 дБ		Диапазон входных амплитуд, шаг квантования 12 дБ	
	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ	От -48 до 0 дБ	От -60 до -48 дБ
Трапецеидальный	[8..0],м	[35..8],м	[8..0],м	[35..8],м
Экспоненциальный	[70..30],п	[33..>200],п	[70..30],п	[35..200],п
Гауссовский	[33..10],п,*	[33..200],п,*	[33..10],п,*	[33..200],п,*
Экспоненциально-степенной	[25..0],п	[25..100],п	[15..0],п	[15..100],п
Синусный	[25..0],п,*	[25..150],п,*	[20..0],п,*	[25..150],п,*
Синус-квадратный	[30..0],п,*	[30..200],п,*	[30..0],п,*	[30..>200],п,*
Импульс с провалом на вершине	[12..0],п,*	[12..100],п,*	[5..0],п,*	[5..100],п,*
Двухэкспоненциальный	[50..40],п,*	[50..200],п,*	[50..40],п,*	[50..200],п,*
Импульс с осцилляциями на вершине и после среза	[6..0],п	[6..25],п	[6..0],п	[6..25],п

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

$XX \pm X$ - среднее значение величины и разброс;

[XX...XX] - диапазон изменения величины;

* - наличие выбросов;

п - пилообразный характер;

- м - монотонно;
- с - ступенчатый характер.

Проведенные расчеты, показывают, что предложенный многопороговый измеритель с измерением длительности по двум разнесенным порогам имеет меньшую систематическую погрешность измерения трапецеидального, синусного и синус-квадратного импульсов. Измеритель имеет меньшую случайную погрешность при измерении экспоненциального, двухэкспоненциального импульсов и импульса с осцилляциями на вершине и после среза. Т.о. данный измеритель наиболее подходит для измерения симметричных импульсов без провалов на вершине.

Основные результаты данной главы опубликованы в работах [93-95].

Методика оценки погрешности измерения длительности импульсов алгоритмом формирования длительности нормированного импульса по двум разнесенным порогам и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения различных типов импульсов позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителя длительности изделия 5П-28, что отмечено в акте внедрения (приведены в приложении).

На основе результатов исследования получен патент "Устройство измерения длительности импульсов по двум уровням" А.С. RU №2399922С1, П01К 29/02, в котором реализован описанный в главе алгоритм измерения длительности, в соавторстве [93].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная задача повышения точности измерения длительности одиночных импульсных сигналов в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса посредством разработки нового многопорогового устройства измерения длительности.

В результате проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие новые результаты и положения:

1 Алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, отличающийся измерением длительности по двум разнесённым пороговым уровням, обеспечивает работу в широком динамическом диапазоне изменений амплитуд в условиях априорной неопределённости в отношении формы импульса.

2 Полученные аналитические выражения и проведенные на их основе расчеты в пакете MathCad позволяют проводить анализ точностных характеристик четырёх многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

3 Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов при формировании нормированного импульса по нижнему и первому из сверху отпустивших порогов для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

4 Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум средним порогам для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного, синус-квадратного импульсов.

5 Полученные аналитические выражения позволяют оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум разнесённым порогам для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

6 Разработанная методика на основе полученных аналитических выражений погрешности многопорогового измерения длительности одиночных импульсных сигналов позволяет проводить сравнительный анализ погрешности измерения длительности различными типами многопороговых измерителей.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработан алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, отличающийся измерением длительности по двум разнесённым пороговым уровням и обеспечивающий работу в широком динамическом диапазоне изменений амплитуд в условиях априорной неопределённости в отношении формы импульса.

- получены аналитические выражения, позволяющие проводить анализ точностных характеристик четырёх многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза.

- получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов при формировании нормированного импульса по нижнему и первому из сверху отпустивших порогов для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

- получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум средним порогам для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, синусного, синус-квадратного импульсов.

- получены аналитические выражения, позволяющие оценить систематическую и случайную составляющие погрешности многопорогового измерителя длительности одиночных импульсных сигналов по двум разнесённым порогам для экспоненциального, гауссовского, синусного и синус-квадратного импульсов.

- разработана методика на основе полученных аналитических выражений погрешности многопорогового измерения длительности одиночных импульсных сигналов позволяет проводить сравнительный анализ погрешности измерения длительности различными типами измерителей.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- техническое решение, защищённое патентом на изобретение А.С. RU №2399922С1, П01К 29/02. Оpubл. 20.09.2010, Бюл. №29 «Устройство измерения длительности импульсов по двум уровням» [94] и реализующее предложенный алгоритм измерения длительности одиночных импульсных сигналов, обеспечивает измерение с повышенной точностью длительности одиночных импульсных сигналов в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса. Предложенный измеритель длительности одиночных импульсных сигналов обеспечивает снижение систематической погрешности на 3% для трапецеидального импульса, на 5% для синус-квадратного импульса по сравнению с лучшими из трёх известных измерителей. В предложенном измерителе длительности одиночных импульсных сигналов трапецеидальной формы случайная погрешность не хуже, чем в лучшем из трёх известных измерителей. Для экспоненциального импульса при одновременном отсутствии выбросов, а также для импульса с осцилляциями на вершине и после среза, случайная погрешность меньше на 2 %.

- разработанное программное обеспечение для ПЭВМ в пакете MathCad позволяют проводить анализ точностных характеристик четырёх предложенных многопороговых измерителей для трапецеидального, экспоненциального, гауссовского, экспоненциально-степенного, синусного, синус-квадратного, двухэкспоненциального импульсов, а также для импульса с провалом на вершине и импульса с осцилляциями на вершине и после среза. Набор программ позволяет оптимизировать характеристики многопорогового измерителя по заданному уровню погрешности измерения длительности при изменении формы сигнала и отношения сигнал/шум;

- даны рекомендации по использованию алгоритмов работы измерителей длительности для разных типов одиночных импульсных сигналов для повышения точности измерения в широком динамическом диапазоне.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами реализации по выполненным НИР, в которых использованы результаты исследований.

Научные результаты и практические рекомендации использованы при проектировании многопороговых измерителей серийных изделий 5П-28 и МП-405, о чем имеются акты о внедрении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов — М.: Сов. радио, 1966. — 624 с.
- 2 Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов — М.: Сов. радио, 1983. — 320 с.
- 3 Тихонов, В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В. И. Тихонов — М.: Радио и связь, 1986. — 296 с.
- 4 Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. / И. С. Гоноровский — 4-е изд. — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.
- 5 Клич, С. М. Проектирование радиоприемных устройств. Под ред. Сиверса А. П. Учебное пособие для вузов. / С. М. Клич, А. С. Кривенко, Г. Н. Носикова — 4-е изд. — М.: Сов. радио, 1976. — 487 с.
- 6 Помазанов, А. В., Оценка параметров сигналов. Учебное пособие. Часть 1. / А. В. Помазанов, А. Н. Зикий, Р. Л. Зорин, Б. Д. Дикарев — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. — 46 с.
- 7 Бобров, Н. В., Максимов, Г. В., Мичурин, В. И., Николаев, Д. П. Радиоприемные устройства. Под ред. Боброва Н.В. Учебное пособие для вузов. / Н. В. Бобров, Г. В. Максимов, В. И. Мичурин, Д. П. Николаев — М.: Сов. радио, 1971. — 496 с.
- 8 Дымова, А. И. Радиотехнические системы. Под ред. Дымовой А.И. Учебник для вузов. / А. И. Дымова, М. Е. Альбац, А. М. Бруевич — М.: Сов. радио, 1975. — 440 с.
- 9 Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. / Б. Р. Левин — М.: Сов. радио, 1968. — 504 с.
- 10 Никитенко, Ю. И. Прохождение экспоненциально-степенных импульсов через резонансный усилитель с одиночными контурами. / Ю. И. Никитенко, С. Э. Орловская // Вопросы радиоэлектроники. Сер. XII. — 1963. — № 29. — С.125-128 .
- 11 Мирский, Г. Я. Измерение временных интервалов. / Г. Я. Мирский — М.: Энергия, 1975. — 158 с.
- 12 Винников, Е. М. Методы и средства точного измерения коротких интервалов времени. / Е. М. Винников, Д. П. Марковский. — М.: Изд-во стандартов, 1963. — 111 с.

- 13 Бахтиаров, Г. Д. Цифровая обработка сигналов. Проблемы и основные направления повышения эффективности. / Г. Д. Бахтиаров // Зарубежная электроника. — 1984.. — № 12. — С. 48-66.
- 14 Беркутов, А. М. Цифровая осциллография. / А. М. Беркутов — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 231 с.
- 15 Трифонов, А. П. Оптимальная оценка энергетического параметра сигнала при приеме на фоне нормальных шумов / А. П. Трифонов // Радиотехника. т. 27. — 1972. — № 1. — С. 10-13.
- 16 Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. под ред. Вейсбейна М.М. [Текст] / Бартон Д., Вард Г. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 231 с.
- 17 Гендин, Г. С. Автоматические и ручные регулировки в радиовещательной аппаратуре. / Г. С. Гендин — М.: Радио и связь, 1984. — 177 с.
- 18 Шушков, Е. И. Многоканальные АЦП. / Е. И. Шушков, М. Б. Цодиков — Л.: Энергия, 1975. — 72 с.
- 19 Рыбак, С. С. Измерение амплитуды одиночного импульса. / С. С. Рыбак // Известия ВУЗов, Приборостроение. — 1986. — № 5. — С. 22-24.
- 20 Неустроев, С. И. Классификация цифровых способов измерения длительности одиночных импульсов. / С. И. Неустроев, М. Д. Штерн // Измерительная техника. — 1971. — № 4. — С. 26-28.
- 21 Куликов, Е. И. Оценка параметров сигналов на фоне помех. / Е. И. Куликов, А. П. Трифонов — М.: Сов. радио, 1978. — 296 с.
- 22 Tsui, J. B. Y. Tangential sensitivity of EW receivers. / J. B. Y. Tsui // Microwave Journal. — 1982. — № 10. — С. 99-102.
- 23 Lukas W.J. Tangential sensitivity of a detector video system with R.F. preamplification. / Lukas W.J. // Proc. IEE (Electronics Record). — 1966. — № 4. — С. 1321-1330. Перевод № 377. В. Дж. Лукас. Тангенциальная чувствительность видеодетектора с предварительным усилением на радиочастоте. М., НИИЭИР.
- 24 Куликов, А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. / А. П. Куликов — М.: Сов. радио, 1987. — 296 с..
- 25 Диксон, Р. К. Широкополосные системы. Пер. с англ. Под ред. В.И. Журавлева. / Р. К. Диксон — М.: Связь, 1979. — 304 с.

- 26 Василенко, В. Э. Отчет о НИР. Исследование измерителей длительности импульсов сложной формы в широком динамическом диапазоне амплитуд сигналов / Василенко В. Э., Зикий А. Н., Зорин Р. Л. И др. — Таганрог: ТНИИС, 1998. — 55 с.
- 27 Василенко, В. Э. Отчет о НИР Исследование принципов построения измерителей длительности импульсов. / Василенко В. Э., Зикий А. Н., Зорин Р. Л. И др. — Таганрог: ТНИИС, 1999. — 126 с.
- 28 Зикий А. Н. Методическое руководство к лабораторной работе «Исследование измерителя длительности импульсов». / А. Н. Зикий, А. А. Бурлаченко, Д. В. Беляев // ТТИ ЮФУ. – 2007. – 45 с.
- 29 Искажение формы импульсов в логарифмическом приемнике / Д. В. Беляев, А. А. Бурлаченко, А. Н. Зикий, И. М. Утолин // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 1 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией А. А. Федотова. – Москва; Таганрог, 2008. – С. 92-97.
- 30 Беляев, Д. В. Систематическая погрешность измерения длительности гауссовских импульсов. / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий // Электронный журнал. Информационное противодействие угрозам терроризма. — 2009. — № 12.
- 31 Беляев, Д. В. Систематическая погрешность измерения длительности синусных импульсов. / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий // Электронный журнал. Информационное противодействие угрозам терроризма. — 2009. — № 12.
- 32 Зикий А. Н. Измеритель длительности импульсов. Отчет о патентных исследованиях. / А. Н. Зикий, Д. В. Беляев // ТТИ ЮФУ. – 2008. – 100 с.
- 33 Помазанов, А. В. Оценка погрешности измерения длительности импульсов многопороговым измерителем / А. В. Помазанов, Р. Л. Зорин // Авиакосмическое приборостроение. — 2004. — № 8. — С. 21-23.
- 34 Помазанов, А. В. Оценка длительности видеоимпульса сложной формы. / А. В. Помазанов, Р. Л. Зорин // Известия ТРТУ. — 2002. — № 1. — С. 151-156.
- 35 Зорин, Р.Л. Систематическая погрешность измерения длительности экспоненциально-степенных импульсов. / Р. Л. Зорин // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 1 / Международная академия информатизации,

- Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. – Москва; Таганрог, 1998. – С. 161-164.
- 36 Зорин, Р. Л. Анализ шумовых ошибок многопорогового усилителя-формирователя длительности импульсов. / Р. Л. Зорин // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники*. — Ростов-на-Дону: СКНЦВШ, 2000. — С. 94-105.
- 37 Помазанов, А. В. Оценка временных параметров радиосигнала акустооптическим измерителем. / А. В. Помазанов Р. Л. Зорин // *Известия ВУЗов. Серия “Радиоэлектроника”*. — 2002. — № 3. — С. 63-67.
- 38 Зикий, А.Н. Погрешность измерения длительности импульсов с провалом на вершине. / А. Н. Зикий, Р. Л. Зорин // *Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 2 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. – Москва; Таганрог, 2001. – С. 62-65.*
- 39 Дикарев, Б. Д. Исследование шумовых ошибок усилителя-формирователя импульсов. / Б. Д. Дикарев, А. Н. Зикий, Р. Л. Зорин, А. В. Помазанов // *Радиоэлектронные технологии информационной безопасности под ред. К.Е. Румянцева — Таганрог: ТРТУ, 2002. — С. 78-82.*
- 40 Помазанов, А.В., Зорин Р.Л. Измерение длительности видеоимпульсов сложной формы. / А. В. Помазанов, Р. Л. Зорин // *Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 1 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. – Москва; Таганрог, 2003. – С. 209-214.*
- 41 Зикий, А. Н. Анализ шумовых ошибок измерения длительности гауссовских импульсов в большом динамическом диапазоне амплитуд многопороговым измерителем. / Зикий А. Н., Зорин Р. Л. // *Тезисы докладов Второй Всероссийской НТК молодых ученых и аспирантов. “Новые информационные технологии. Разработка и аспекты применения”*. — Таганрог: ТРТУ, 1999. — С. 10-11.
- 42 Зорин, Р. Л. Анализ шумовых ошибок измерения длительности экспоненциальных импульсов в большом динамическом диапазоне амплитуд многопороговым измерителем. / Зорин Р. Л. // *Тезисы докладов ВНТК “Компьютерные технологии*

- в инженерной и управленческой деятельности”. — Таганрог: ТРТУ, 1999. — С. 142-143.
- 43 Зорин, Р. Л. Анализ систематических ошибок измерения длительности импульсов сложной формы. / Зорин Р. Л. // Известия ТРТУ. — 2000. — № 1. — С. 176-177.
- 44 Дятлов, А. П. Радиоэлектронная борьба со спутниковым радионавигационными системами. / А. П. Дятлов, П. А. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян — М.: Радио и связь, 2004. — 226 с.
- 45 Радзиевский, В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота — М.: Радиотехника, 2004. — 432 с.
- 46 Мельников, Ю. П. Воздушная радиотехническая разведка, методы оценки эффективности. / Ю. П. Мельников — М.: Радиотехника, 2005. — 304 с.
- 47 Дятлов, А. П. Радиомониторинг излучений спутниковых радионавигационных систем. / А. П. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян — М.: Радио и связь, 2006. — 270 с.
- 48 Вакин, С. А. Основы радиопротиводействия и радиоэлектронной разведки. / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов — М.: Сов. Радио, 1968. — 448 с.
- 49 Василенко, О. Н. Устройство для цифрового отображения формы электрического импульса. / О. Н. Василенко, Г. Н. Орлов, В. В. Жертовский // Вопросы обработки сигналов в системах пассивной радиолокации. Вып. 4. — Таганрог: ТРТУ, 1987. — С. 86-90.
- 50 Василенко, О. Н. Цифровое отображение формы импульсных сигналов. / О. Н. Василенко, В. В. Жертовский, В. Г. Сердюков // Вопросы обработки сигналов в системах пассивной радиолокации. Вып. 3. — Таганрог: ТРТУ, 1985. — С. 88-92.
- 51 Валитов, Р. А. Радиотехнические измерения. / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский — М.: Сов. Радио, 1970. — 712 с.
- 52 Винников, Е. М. Методы и средства точного измерения коротких интервалов времени. / Е. М. Винников, Д. П. Марковский — М.: Изд-во стандартов, 1963. — 111 с.
- 53 Вишневский, В. Н. Цифровой измеритель временных интервалов для широкополосного электронно-лучевого осциллографа. / В. Н. Вишневский // Техника средств связи, серия РИТ, вып.5, 1985. — С. 47-50.

- 54 Горяинов, В. Т. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи. Под ред. В.И.Тихонова. / В. Т. Горяинов, Журавлёв А.Г., В. И. Тихонов — М.: Сов.радио, 1980. — 544 с.
- 55 Григоровский, Л. Ф. Об одном методе устранения многозначности измерения временного положения импульсных радиосигналов. / Л. Ф. Григоровский, М. С. Журавский // Вопросы радиоэлектроники, сер. ОТ. — 1967. — № 10. — С. 35-40.
- 56 Грязнов, М. И. Способ измерения амплитуды и длительности импульсов малой амплитуды. / М. И. Грязнов // Вопросы радиоэлектроники, сер. VI. — 1962. — № 3.
- 57 Грязнов, М. И. Интегральный метод измерения импульсов. / М. И. Грязнов — М.: Сов.радио, 1975. — 279 с.
- 58 Демьянчук, Т. М. Наносекундный преобразователь временных интервалов. / Т. М. Демьянчук // ПТЭ. — 1987. — № 4. — С. 78-80.
- 59 Грязнов, М. И. Исследование интегральных способов измерения некоторых параметров наносекундных импульсов малой амплитуды. Автореферат на соискание кандидата технических наук / Грязнов, М. И.; Горьк. политехн. ин-т им. А. А. Жданова. — Горький, 1964. — 11 с.
- 60 Ермолов, Р. С. Цифровые измерительные приборы. Справочник. / Р. С. Ермолов, Г. Г. Живилов, И. Я. Каверкин — Л.: Энергия, 1971. — 160 с.
- 61 Жертовский, В. В. Цифровой измеритель длительности импульсов. / В. В. Жертовский, О. Н. Василенко, В. Г. Сердюков // Вопросы специальной радиоэлектроники, сер. ОТ. — 1979. — № 6. — С. 62-66.
- 62 Коломиец, О. М. Автоматический выбор диапазона измерений в цифровых приборах. / О. М. Коломиец, Е. М. Прошин — М.: Энергия, 1980. — 128 с.
- 63 Коломенский, Ю. А. К вопросу о влиянии флуктуационных помех на точность определения временного положения сигнальных импульсов. / Ю. А. Коломенский // Известия ВУЗов, Радиоэлектроника. Т.5. — 1962. — № 2.
- 64 Куликов, Е. И. Предельная точность измерения времени запаздывания. / Е. И. Куликов // Радиотехника. Т. 17. — 1962. — № 8.
- 65 Кухаренко, Н. А. Усредняющий измеритель длительности импульсов с автоматическим выбором диапазона. / Н. А. Кухаренко, А. М. Непомнящих // Техника средств связи, сер. РИТ. — 1982. — № 5. — С. 48-52.

- 66 Маграчев, З. В. Способ автоматического выбора уровня отсчета при измерении длительности одиночных импульсов. / З. В. Маграчев // Измерительная техника. — 1964. — № 7. — С. 53-55.
- 67 Митяшев, Б. Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех. / Б. Н. Митяшев — М.: Сов. радио, 1962. — 199 с.
- 68 Митяшев, Б. Н. Временная фиксация импульсов с большим динамическим диапазоном амплитуд. / Б. Н. Митяшев // Радиотехника. т. 30. — 1975. — № 1. — С. 61-66.
- 69 Михайлов, Б. К. Измеритель временного положения импульсных сигналов произвольной формы. / Б. К. Михайлов, В. В. Лебедев // Радиотехника. — 1978. — № 7. — С. 61-66.
- 70 Наман, Н. С. Измерение формы пикосекундных импульсов. / Н. С. Наман // ТИИЭР, т. 66. — 1978. — № 4. — С. 91-105.
- 71 Никитенко, Ю. И. Некоторые методы определения временного положения переднего фронта экспоненциально-степенных импульсов. / Ю. И. Никитенко, В. С. Бурданов // Вопросы радиоэлектроники, сер. XII — 1965. — № 31. — С. 37-48.
- 72 Никитенко, В. И. Оптимальные алгоритмы и схемы измерения параметров радиосигнала в шумах. Учебное пособие. Гос. мор. акад. им. С. О. Макарова / В. И. Никитенко, Ю. М. Устинов — М.: В/О "Мортехинформреклама", 1991. — 33 с.
- 73 Никитенко, В. И. Метод фиксации процессов во времени. / В. И. Никитенко // Радиотехника и электроника. т. 5. — 1957. — № 5. — С. 566.
- 74 Никитенко, В. И. О точности временного определения пологих сигналов. / В. И. Никитенко // Радиотехника и электроника. т. 3. — 1958. — № 10. — С. 1280.
- 75 Породин, Б. М. Цифровой измеритель временных сдвигов между периодическими импульсными последовательностями. / Б. М. Породин // ПТЭ. — 1986. — № 3. — С. 144-147.
- 76 Розенберг, В. Я. Радиотехнические методы измерения параметров процессов и систем. / В. Я. Розенберг — М.: Стандартиздат, 1970. — 308 с.
- 77 Рыбак, С. С. Измерение амплитуды одиночного импульса. / С. С. Рыбак // Известия ВУЗов, Приборостроение. — 1968. — № 5. — С. 22-24.
- 78 Флейшер, С. М. Максимально правдоподобная оценка времени прихода сигнала неизвестной формы / С. М. Флейшер // Радиотехника, т. 22 — 1967.

- 79 Хаджи, Б. А. Измерение времени прихода синусоидального сигнала, принимаемого при наличии шумовых и импульсных помех. / Б. А. Хаджи // Радиотехника, т. 26. — 1971. — № 9.
- 80 Худяков, Г. И. О точности определения временного положения флюктуирующих импульсных сигналов. / Г. И. Худяков // Радиотехника и электроника, т. 19. — 1974. — № 12. — С. 2638-2640.
- 81 Измерение характеристик случайных процессов. Учебное пособие. / Н. Н. Смирнов, В. П. Федосов, Ф. А. Цветков // — Таганрог: ТРТУ, 1978. — 71 с.
- 82 Грязнов М. И. Интегральный метод измерения импульсов. / Грязнов М. И. — М.: Сов. радио, 1975. — 334 с.
- 83 Экспериментальные исследования детекторного приемника миллиметрового диапазона / Д. В. Беляев, А. В. Воронков, А. Н. Зикий, А. А. Пономаренко // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 1 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. — Москва; Таганрог, 2004. — С. 133-135.
- 84 Беляев, Д. В. Динамический диапазон и пропускная способность приёмника прямого усиления с логарифмическим видеоусилителем / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий, А. А. Пономаренко // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-технический сборник. Вып. 2 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. — Москва; Таганрог, 2004. — С. 118-122.
- 85 Беляев, Д. В. Аппроксимация амплитудной характеристики детекторного приемника / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий // Информационное противодействие угрозам терроризма. — 2006. — № 6. — С. 201-205.
- 86 Беляев, Д. В. Экспериментальное исследование транзисторного детектора СВЧ / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий, К. Е. Румянцев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2006. — Т. 2, № 3. — С. 60-62.
- 87 Зикий, А. Н. Алгоритм пеленгования и погрешность неидентичности моноимпульсного пеленгатора / А. Н. Зикий, Д. В. Беляев // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР): научно-

- технический сборник. Вып. 2 / Международная академия информатизации, Таганрогский научно-исследовательский институт связи; под редакцией Э. В. Чекрыгина. – Москва; Таганрог, 2006. – С. 54-57.
- 88 Зикий, А.Н. Глава 4 в кафедральном отчете. “Исследование детекторов СВЧ”. Отчет о НИР (заключительный). г/б №16450. / А. Н. Зикий, Д. В. Беляев // Таганрог, ТРТУ, — 2005. — 142 с.
- 89 Температурные характеристики микрополоскового детектора для обнаружителя радиосигналов / А. Н. Зикий, А. В. Авдеенко, А. Г. Васильченко, Д. В. Беляев, А. А. Пантелеймонов // Известия ТРТУ. – 2003. – №4(33). – С. 333.
- 90 Беляев, Д. В. Тенденции развития детекторов и смесителей СВЧ / Д. В. Беляев // Известия ТРТУ. – 2006. – №9-1(64). – С. 165.
- 91 Зикий А. Н. Пеленгаторы и устройства определения местонахождения. Отчет о патентных исследованиях. / А. Н. Зикий, Д. В. Беляев // ТТИ ЮФУ. – 2008. – 90 с.
- 92 Зикий А. Н. Детекторы АМ сигналов. Отчет о патентных исследованиях. / А. Н. Зикий, Д. В. Беляев // АО «ТНИИС». – 2004. – 121 с.
- 93 Патент № 2399922 С1 Российская Федерация, МПК G01R 29/02. Устройство измерения длительности импульсов по двум уровням: № 2009107158/28: заявл. 27.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26 / Д. В. Беляев, А. Н. Зикий, Р. Л. Зорин [и др.].
- 94 Беляев, Д. В. Систематическая погрешность измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности / Д. В. Беляев // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 11. – С. 88-94. – DOI 10.18127/j00338486-202111-14.
- 95 Беляев, Д. В. Случайная погрешность измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности / Д. В. Беляев, Д. Е. Губарев, К. Е Румянцев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5(222). – С. 29-39. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-29-39.
- 96 Экспериментальное исследование гетеродинного модуля на основе автогенератора "Орсель" / В. Э. Василенко, Д. В. Беляев, А. Н. Зикий, И. А. Сальный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3(80). – С. 184-187.

- 97 Экспериментальное исследование генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты / А. В. Авдеенко, Д. В. Беляев, С. Э. Додаев, А. Н. Зикий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – №3(80). – С. 174-178.
- 98 Патент на полезную модель № 45831 U1 Российская Федерация, МПК G01R 23/17. Передатчик сложных сигналов: № 2005101229/22: заявл. 19.01.2005: опубл. 27.05.2005 / Д. В. Беляев, В. Э. Василенко, С. Э. Додаев [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Таганрогский научно-исследовательский институт связи" (ФГУП "ТНИИС").

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института компьютерных технологий
и информационной безопасности

Г.Е. Веселов

« 8 » февраля 2022 г.

Акт

**о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы
Беляева Дениса Владимировича,
посвященной разработке многопороговых устройств измерения
длительности радиосигналов с повышенной точностью в широком
динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о
форме импульса**

Настоящий акт составлен комиссией в составе председателя – зам. зав. кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем (ИБТКС) доцента, к.т.н., Балабаева С.Л. и членов комиссии – доцентов кафедры ИБТКС к.т.н., доцента Помазанова А.В. и к.т.н., с.н.с. Зикого А.Н.

Комиссия установила, что Беляевым Д.В. спроектирован, изготовлен и отрегулирован действующий макет многопорогового измерителя длительности радиоимпульсов.

Многопороговый измеритель длительности представляет двухстороннюю печатную плату размером 170×200 мм. Монтаж радиоэлементов выполнен на одной стороне. Для подачи питания, сигналов управления и связи с ЭВМ на плату установлен 135 контактный НЧ-разъём, а для подачи видеосигналов – два разъёма типа «этикет» (тип IX). Функционально измеритель состоит из двух каналов приёма видеосигналов с двумя разными системами привязки постоянной составляющей, двух блоков АЦП, основного решающего блока, построенного на базе ПЛИС FLEX10K20 фирмы Altera и буферных микросхем для связи с периферийными модулями.

Многопороговый измеритель длительности видеоимпульсов работает в широком динамическом диапазоне, с длительностями импульсов от 500 нс до 150 мкс.

Комиссией установлено, что:

- систематическая погрешность не превышает 7% при анализе трапецеидальных импульсов с длительностью 1 мкс при отношении сигнал/шум 15 дБ;

- зависимость систематической погрешности измерителя от длительности имеет пилообразный характер, причём скачкообразные уменьшения погрешности происходят в моменты переходов с одного порога на другой;

- погрешность измерения длительности импульсов существенно зависит от шага квантования амплитуды и формы импульса.

Лабораторная работа предназначена для студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем». В процессе выполнения лабораторной работы обучающийся знакомится с основными принципами измерения длительности видеопульсов, типовыми искажениями форм видеосигналов и погрешностями измерений, возникающими вследствие этих искажений.

На основе разработанного макет многопорогового измерителя длительности радиопульсов поставлена лабораторной работы «Исследование измерителя длительности радиосигналов» с руководством по её выполнению, которая внедрена в учебный процесс.

В соавторстве с Зиким А.Н. и Бурлаченко А.А. написано руководство «Беляев Д.В., Бурлаченко А.А., Зикий А.Н. Исследование измерителя длительности импульсов: руководство к лабораторной работе. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2007. – 45 с».

Председатель комиссии:
доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н.

С.Л. Балабаев

Члены комиссии:
доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н., доцент

А.В. Помазанов

доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н., с.н.с.

А.Н. Зикий

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института компьютерных технологий
и информационной безопасности

Г.Е. Веселов

« 8 » февраля 2022 г.

**Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
Беляева Дениса Владимировича,
посвящённой разработке многопороговых устройств измерения
длительности радиосигналов с повышенной точностью в широком
динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме
импульса**

Настоящий акт составлен комиссией в составе председателя – зам. зав. кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем (ИБТКС) доцента, к.т.н., Балабаева С.Л. и членов комиссии – доцентов кафедры ИБТКС к.т.н., доцента Помазанова А.В. и к.т.н., с.н.с. Зикого А.Н.

Комиссия установила, что результаты проведённых в процессе обучения в аспирантуре патентных исследований по измерению длительностей импульсов использованы кафедрой радиоэлектронных систем защиты и сервиса (ныне кафедра «Информационная безопасность телекоммуникационных систем») и отражены в научно-техническом отчёте по теме «Измерители длительности импульсов» (ГТИ ЮФУ: Таганрог, 2008. – 100 с. Шифр «Длительность -4»).

Патентные исследования позволили выявить новые типы измерителей, провести анализ устройств и методов измерения временных параметров радиосигналов. Выявлены основные направления развития измерителей – разработка многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса. Сформулированы требования к подобным устройствам.

Председатель комиссии:
доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н.

С.Л. Балабаев

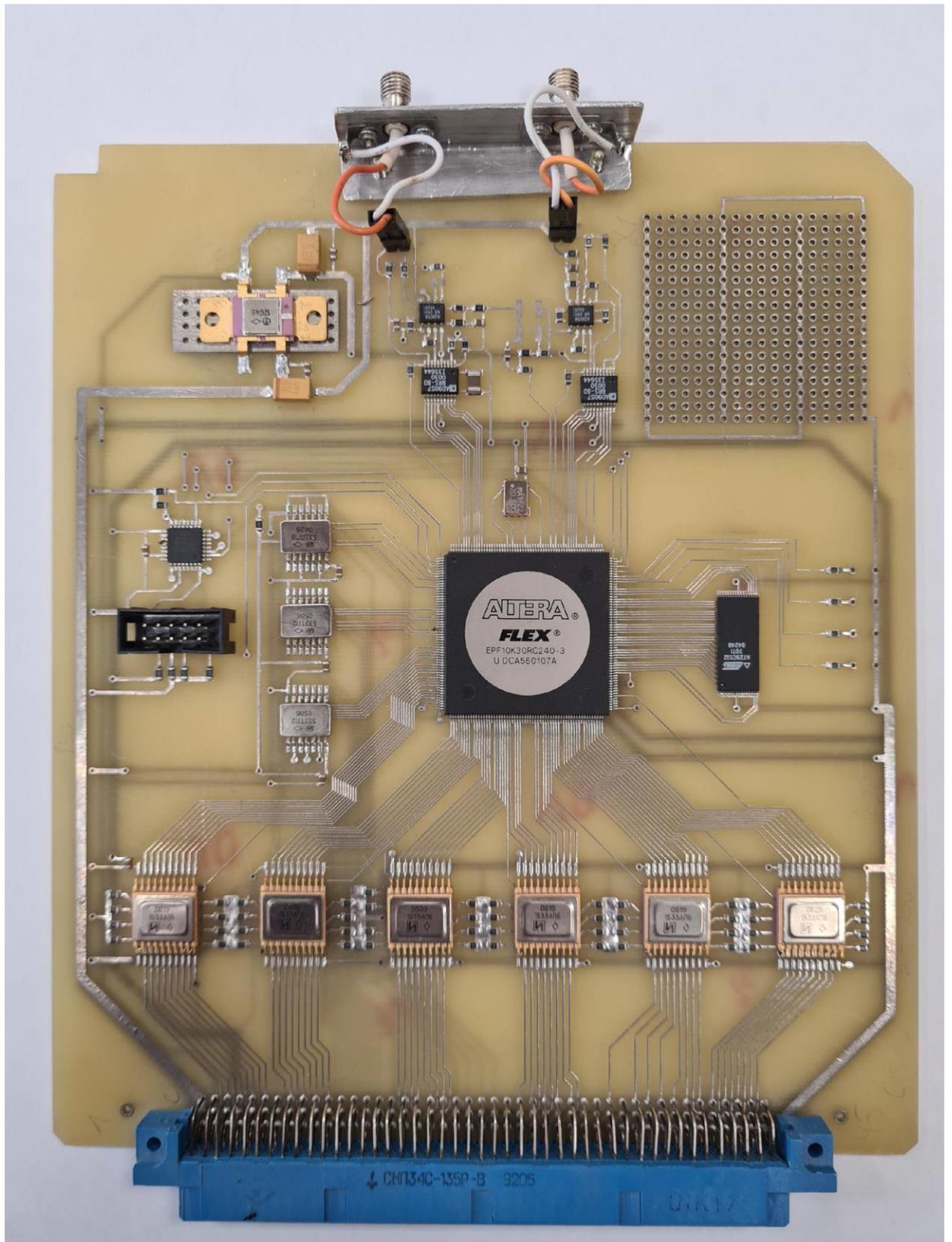
Члены комиссии:
доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н., доцент

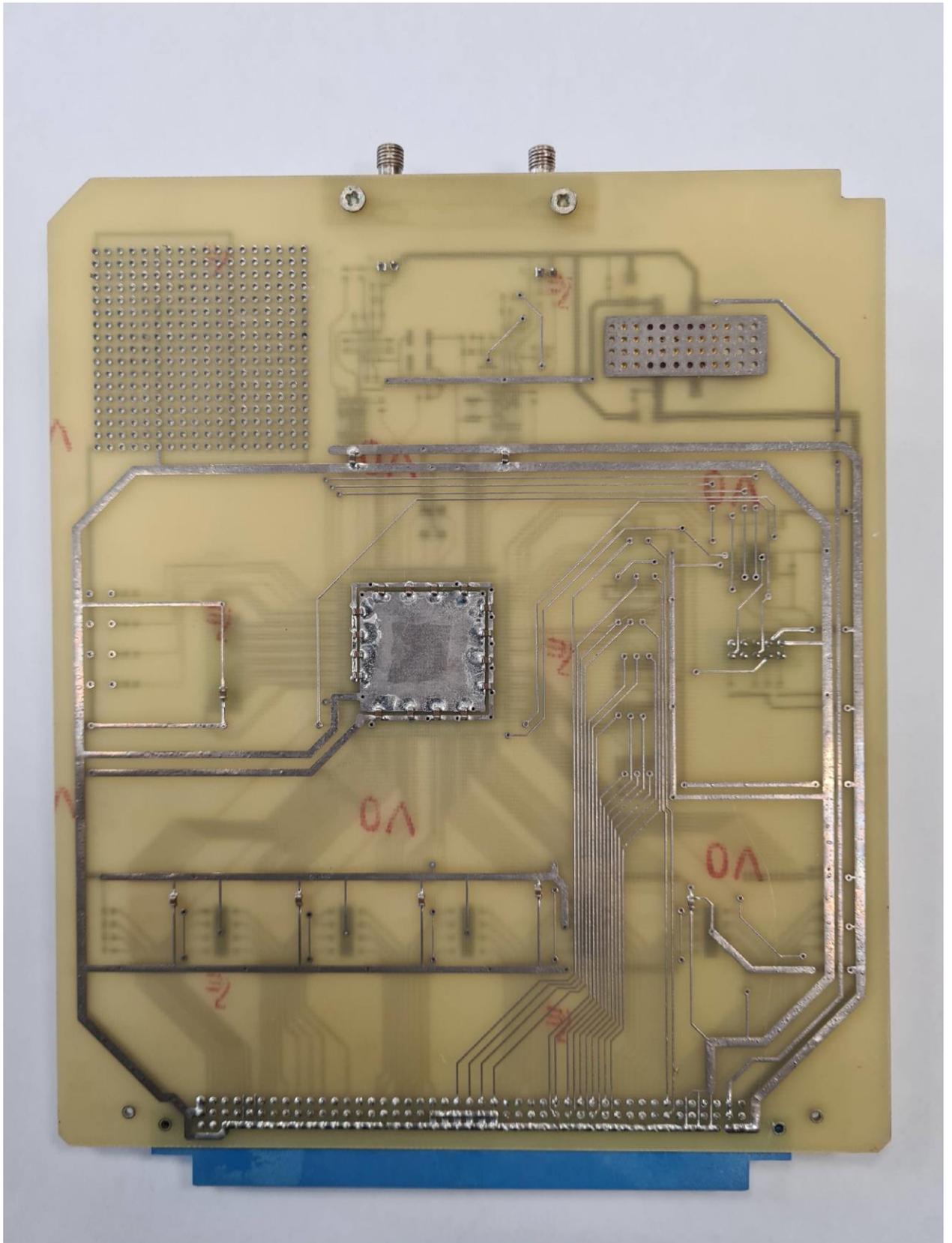
А.В. Помазанов

доцент кафедры ИБТКС,
к.т.н., с.н.с.

А.Н. Зикий

Макет измерителя длительности видеоимпульсов





Приложение Б



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Беляева Дениса Владимировича,
посвященной разработке многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса

Комиссия в составе председателя - заместителя генерального директора по научной работе и инновациям Ивлева В.С. и членов комиссии – ученого секретаря АО «ТНИИС», к.т.н., доцента Гришкова А.Ф., начальника отдела, к.т.н. Дулина М.И. и начальника лаборатории, заместителя главного конструктора изделия 5П-28 Нежного В.С. констатирует, что результаты диссертационной работы Беляева Д.В.:

- модель и алгоритм работы многопорогового измерителя длительности с формированием нормированного импульса по двум средним порогам;

- модель и алгоритм работы многопорогового измерителя длительности с формированием нормированного импульса по двум разнесенным порогам;

- методика оценки систематической и случайной погрешностей измерения длительности импульсов указанными алгоритмами и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения длительности по девяти типам импульсов;

позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителей длительности и повысить точность измерения длительности характерных импульсов в аппаратуре первичной обработки изделия 5П-28.

Председатель комиссии -
заместитель генерального директора
по научной работе и инновациям

В.С. Ивлев

Члены комиссии:

Ученый секретарь, к.т.н., доцент

А.Ф. Гришков

Начальник отдела, к.т.н.

М.И. Дулин

Начальник лаборатории,
заместитель главного конструктора
изделия 5П-28

В.С. Нежнов

Приложение В

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

АО «ТНИИС»

И.А. Марченко

12 2021 г.

о внедрении результатов диссертационной работы

Беляева Дениса Владимировича,

посвященной разработке многопороговых устройств измерения длительности радиосигналов с повышенной точностью в широком динамическом диапазоне при отсутствии априорной информации о форме импульса

Комиссия в составе председателя - заместителя генерального директора по научной работе и инновациям Ивлева В.С. и членов комиссии – ученого секретаря АО «ТНИИС», к.т.н., доцента Гришкова А.Ф., начальника отдела, к.т.н. Дулина М.И. и начальника НТЦ, главного конструктора изделия МП-405 Некрасова А.М. констатирует, что результаты диссертационной работы Беляева Д.В.:

- модель и алгоритм работы многопорогового измерителя длительности с формированием нормированного импульса по нижнему и первому сверху из отсутствующих порогов;

- модель и алгоритм работы многопорогового измерителя длительности с формированием нормированного импульса по нижнему и второму из сверху отсутствующих порогов;

- методика оценки систематической и случайной погрешностей измерения длительности импульсов указанными алгоритмами и результаты расчетов систематической и случайной погрешностей измерения длительности по девяти типам импульсов;

позволили оптимизировать схемотехнические решения при проектировании измерителей длительности и повысить точность измерения длительности характерных импульсов в аппаратуре первичной обработки изделия МП-405.

Председатель комиссии -
заместитель генерального директора
по научной работе и инновациям

В.С. Ивлев

Члены комиссии:

Ученый секретарь, к.т.н., доцент

А.Ф. Гришков

Начальник отдела, к.т.н.

М.И. Дулин

Начальник НТЦ,
главный конструктор изделия МП-405

А.М. Некрасов