



# ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ПРИБОРОМ МЗМ-18

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее доступным и самым дешевым методом измерения импульсной мощности радиосигналов является использование измерителя мощности.

Современные измерители способны определять различные виды мощности сигналов: среднюю, импульсную, пиковую и прочие.

Приведем основные используемые термины:

**Импульсная мощность** (мощность в импульсе) — среднее значение мощности сигнала за время длительности импульса.

**Среднеквадратичное значение мощности** (в рамках данного документа средняя мощность) — определяется как среднее значение квадрата сигнала.

**Пиковая мощность** — наибольшее мгновенное значение мощности сигнала.

При рассмотрении измерителей мощности в первую очередь следует обратить внимание на преобразователи мощности.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МОЩНОСТИ

Основная идея преобразователей мощности заключается в преобразовании мощности высокочастотного сигнала в постоянный ток или сигнал низкой частоты, которые измеряются и пересчитываются с учетом калибровочных данных детектора в значение мощности сигнала. Тремя основными типами преобразователей являются терморезисторы, термопары и диодные детекторы. Каждый тип преобразователя имеет свои преимущества, функциональные возможности и ограничения, связанные с его применением.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ТЕРМОРЕЗИСТОРАХ

Преобразователи на терморезисторах построены по принципу сбалансированного моста Уитстона. СВЧ мощность рассеивается на согласованном резисторе и полученное тепло изменяет сопротивление терморезистора, установленного в одно из плеч согласованного моста. Это изменение сопротивления приводит к рассогласованию моста и создает дифференциальный входной сигнал для усилителя. Недостатком этих типов преобразователей является их чувствительность к изменениям температуры. Для решения этой проблемы может быть добавлен второй терморезистор, чтобы корректировать результаты измерения в зависимости от температуры окружающей среды.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ТЕРМОПАРАХ

Действие преобразователей на термопарах основано на свойстве металла создавать напряжение, обусловленное разницей температур между горячим и холодным контактами. При этом различные металлы, в зависимости от их свойств, могут создавать различные напряжения. Нагрев горячих контактов осуществляется за счет тепла, возникающего при рассеивании СВЧ сигнала на чувствительной согласованной нагрузке. Напряжение, получаемое с одного соединения «металл-металл», очень мало, поэтому для увеличения напряжения используется последовательное включение идентичных звеньев. Такая сборка называется термопарой.

Преобразователи мощности на основе терморезисторов и термопар могут использоваться для измерения средней мощности, но не могут непосредственно измерять импульсную и пиковую мощность, а также обладают малым динамическим диапазоном и большим временем измерений (по сравнению с диодными преобразователями).

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ДИОДНЫХ ДЕТЕКТОРАХ

В отличие от терморезисторов и термопар, диодный преобразователь не измеряет содержание тепла, рассеянного на нагрузке, а выпрямляет СВЧ сигнал. Основным достоинством диодного преобразователя является чувствительность, позволяющая измерять такую низкую мощность, как минус 70 дБм (100 пВт). Преобразователь на диодных детекторах выпрямляет СВЧ сигнал и производит интегрирование результата на видео фильтре (ФНЧ). По полосе видео фильтра преобразователи на диодных детекторах разделяют на две группы – узкополосные (интегрирующие) и широкополосные. Узкополосные преобразователи на диодных детекторах позволяют производить оценку среднего значения мощности на временных интервалах, во много раз превышающих период повторения сигнала. Широкополосные преобразователи на диодных детекторах позволяют измерять мощность СВЧ сигнала с высоким разрешением по времени.

К недостаткам преобразователя на диодных детекторах можно отнести нелинейность закона преобразования, связанного с нелинейными свойствами диода. Если мы разложим уравнение, описывающее поведение диода в степенной ряд, то увидим, что выпрямленное выходное напряжение является функцией квадрата напряжения входного сигнала до уровня сигнала соответствующего мощности не более минус 20 дБм на нагрузке 50 Ом. В данном динамическом диапазоне выходное напряжение пропорционально среднеквадратичному значению уровня входной

мощности. При превышении уровня мощности минус 20 дБм процесс выпрямления становится все более линейным, а выходное напряжение переходит к функции входного напряжения (а не квадрату входного напряжения). Для непрерывного гармонического сигнала данная нелинейность может быть скорректирована для получения истинного среднеквадратичного значения мощности.

Если при измерении среднего значения мощности импульсно-модулированного сигнала мощность импульса превышает минус 20 дБм, то среднее значение напряжения на выходе детектора не пропорционально средней мощности сигнала на входе. Это приводит к появлению ограничений при использовании преобразователя на диодном детекторе при измерении параметров мощности импульсно-модулированных сигналов.

## ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ СИГНАЛА

Измеритель средней мощности может использоваться для получения данных о средней и импульсной мощности при известном коэффициенте заполнения сигнала. У данного метода есть свои преимущества, однако необходимо учитывать некоторые особенности.

Главное преимущество измерителей средней мощности заключается в том, что они являются самым недорогим решением. Измерители средней мощности способны выполнять измерения в широком динамическом и частотном диапазоне, они могут измерить сигнал независимо от того, насколько мало время нарастания или длительность импульса. Результат измерения импульсной мощности точен для идеального или близкого к идеальному импульсного сигнала.

На рис. 1 показана взаимосвязь импульсной и средней мощности. В примере использован простой импульс длительностью 10 мкс с периодом повторения 40 мкс, следовательно, разница импульсной и средней мощности равна 6,02 дБ. Данная величина может быть внесена в измеритель как величина компенсации ослабления, чтобы на дисплее отображалась импульсная мощность.



Рис. 1. Использование измерителя средней мощности для определения импульсной мощности (действующего значения мощности импульса)

В реальности форма импульса может отличаться от прямоугольной. Огибающая импульсно-модулированного сигнала имеет конечные длительности нарастания и спада радиоимпульса, гармонические колебания на вершине импульса, связанные с переходными процессами в импульсном модуляторе и тракте радиосигнала. Комбинация этих и прочих эффектов создает погрешность в вычисленном результате.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данного эксперимента являлось подтверждение возможности применения измерителя мощности (ИМ) МЗМ-18 для измерения импульсной и средней мощности импульсно-модулированных сигналов.

В ходе работы было проведено сравнение показаний ИМ МЗМ-18 с результатами эталонного измерителя мощности при измерении мощности радиочастотных сигналов с импульсной модуляцией. В качестве эталонного измерителя был использован измеритель мощности N1911A компании Agilent Technologies с сенсором N1922A. Идентичность входных сигналов достигалась путем использования общего генератора и делителя мощности. Полная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Измеритель мощности МЗМ-18 включает в себя детекторную секцию и не требует подключения дополнительного сенсора мощности.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Изменение уровня мощности производилось перестройкой аттенуатора, т. к. это позволяет добиться большей стабильности по сравнению с перестройкой уровня выходной мощности генератора.

Основные параметры сигналов, используемых в эксперименте:

- частота входного сигнала, ГГц 3;
- длительность импульса, нс 500;
- период следования импульсов, мкс 5 / 50 / 740.

Изменение скважности радиоимпульсов обеспечивалось только изменением периода следования. Частота входного гармонического сигнала для эксперимента была фиксированной - 3 ГГц. Изменения частоты в рамках допустимого диапазона не приводит к существенным изменениям показаний мощности ввиду малой неравномерности частотной характеристики измерителя МЗМ-18.

Сигнал с длительностью импульсов 0,5 мкс и скважностью 1480 из всех описанных вариантов представляет наибольшую сложность для измерения мощности при использовании МЗМ-18. Наиболее простым случаем можно считать сигнал с минимальной скважностью и максимальной длительностью импульсов — из приведенного перечня максимальная скважность равна 10. Исходя из этих условий, эксперимент проводился для трех сигналов: со скважностью 10, 100 и 1480. Сигналы отличались друг от друга только периодом следования импульсов. Остальные виды сигналов можно отнести к промежуточным вариантам, поэтому они подробно не рассматриваются.

В ходе эксперимента мощность сигнала, поступающего на измеритель, изменялась с шагом 1 дБ. На рис. 3 изображены графики измеренной мощности для сигнала со скважностью 10.

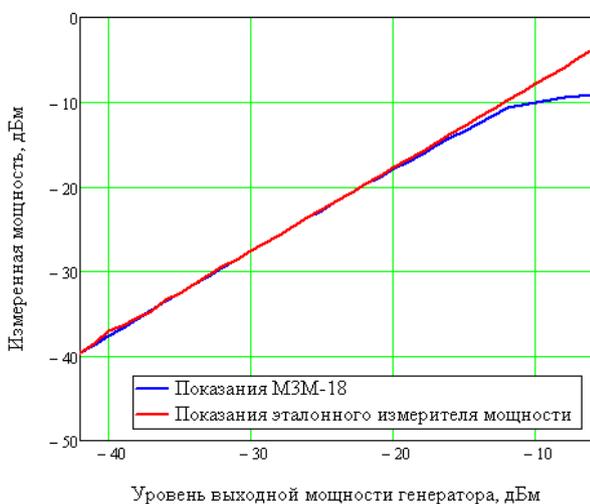


Рис. 3. График измеренной мощности

Данный график показывает общий вид характеристик, но не позволяет точно определить численные значения отклонений. На рис. 4 приведены графики разницы показаний МЗМ-18 и эталонного измерителя при измерении импульсной мощности. Стоит заметить, что МЗМ-18 измеряет среднюю мощность, а отображение импульсной мощности достигается путем установления компенсации ослабления (см. рис. 1).

Измеритель МЗМ-18 способен производить измерения мощности непрерывных гармонических сигналов в диапазоне от минус 60 дБм до плюс 20 дБм. При использовании его для измерений импульсно-модулированных сигналов, необходимо учитывать, что среднее значение мощности сигнала не должно быть меньше нижней границы динамического диапазона, т. е. минус 60 дБ.

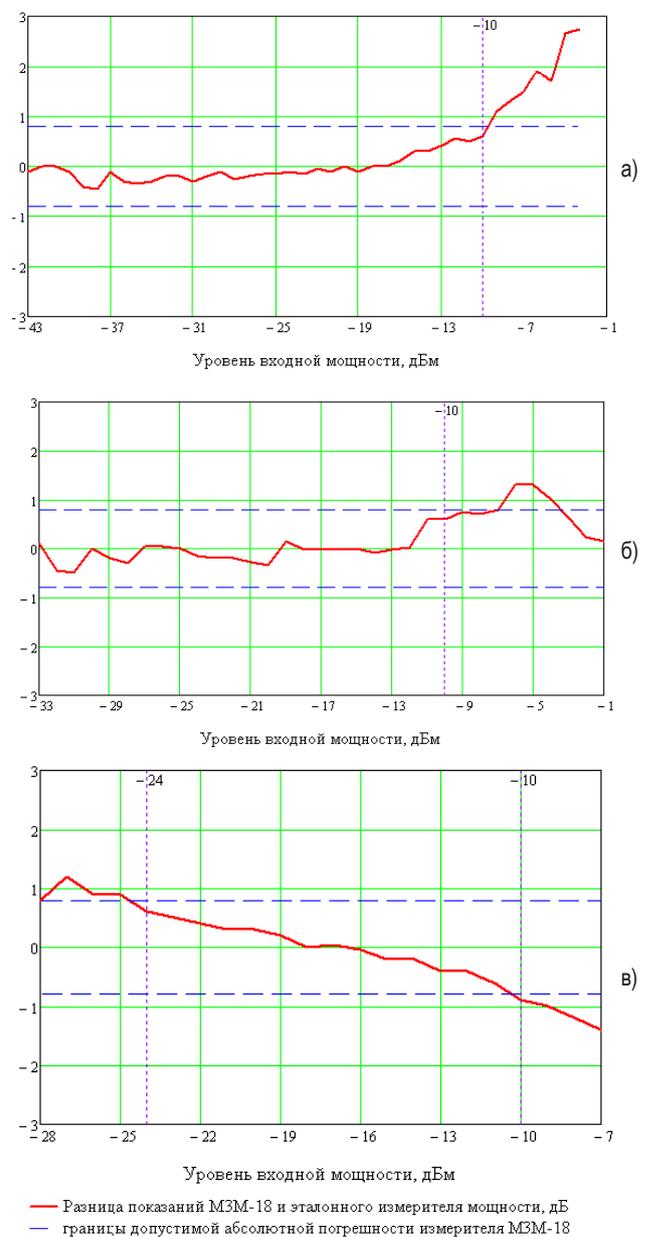


Рис. 4. Разница показаний МЗМ-18 и эталонного измерителя мощности Agilent N1911A

а) при скважности Q = 10, б) при Q = 100, в) при Q = 1480.

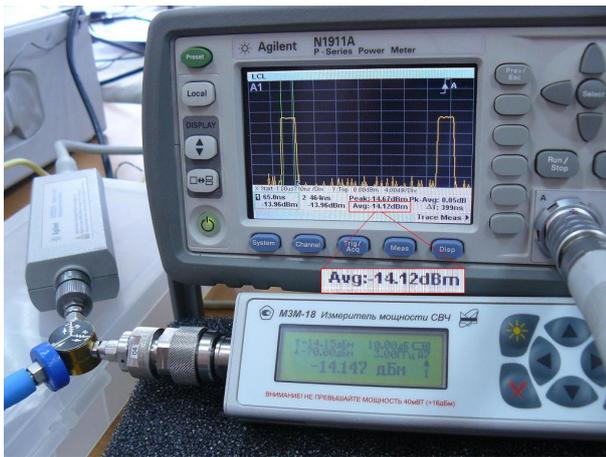


Рис. 5. Показания эталонного измерителя мощности и МЗМ-18

Из рис. 4 видно, что при увеличении скважности сигнала увеличивается граница минимальной измеряемой мощности. Это вызвано уменьшением значения средней мощности сигнала. Верхняя граница измеряемой мощности не зависит от скважности и обусловлена поведением детекторной характеристики. На рис. 5 изображена фотография части экспериментальной установки с показаниями измеренных значений Agilent N1911A и измерителя МЗМ-18, на котором видно, что разница показаний не превышает 0,03 дБ.

Значения динамических диапазонов для сигналов с различной скважностью (см. рис. 4):

Q = 10: -43...-10 дБм (33 дБ);

Q = 100: -33...-10 дБм (23 дБ);

Q = 1480: -24...-10 дБм (14 дБ).

В общем виде справедливо следующее соотношение для расчета динамического диапазона ДД и минимальной измеряемой мощности  $P_{min}$

$$(1) \quad ДД = (43 - 10 \log(Q)) \text{ дБ}$$

$$(2) \quad P_{min} = (-53 + 10 \log(Q)) \text{ дБм}$$

Данные выражения были экспериментально подтверждены для сигналов на различных частотах со скважностью от 10 до 1480. На рис. 6 изображены значения минимальной и максимальной измеряемой мощности в зависимости от скважности радиоимпульсов.

Стоит отметить, что описанные выражения (1), (2) справедливы для радиоимпульсов с идеализированной формой. Различные факторы, такие как длительные фронты импульса, выбросы огибающей, связанные с переходными процессами, могут оказывать значительное влияние на форму импульсов и приводить к увеличению погрешности измерения импульсной мощности.

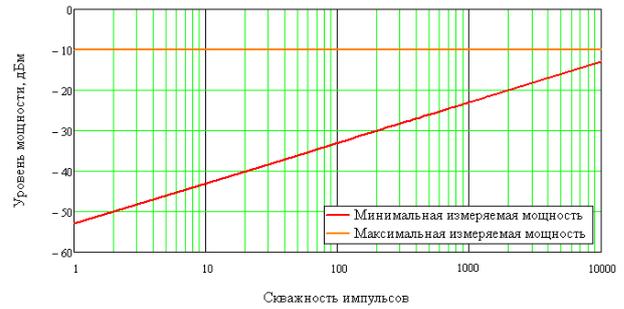


Рис. 6. Границы измеряемой мощности

Еще одним немаловажным фактором при измерении импульсной мощности является частота следования радиоимпульсов. Поскольку измерители средней мощности выполняют усреднение по времени, то для получения результата необходимо проинтегрировать результат на большом количестве периодов повторения импульсов.

Если частота следования импульсов более 1 кГц, функцию интегрирования выполняет аналоговый видео фильтр (ФНЧ детектора). При частотах менее 1 кГц используется цифровое усреднение результатов измерений. Для обеспечения корректных измерений рекомендуется выполнение соотношения

(3)

$$\text{где: } t_{изм} - t_{изм} / T_{имп} \geq 50 \text{ МЗМ-18;}$$

$T_{имп}$  — период повторения импульсов.

При частоте повторения импульсов более 1 кГц рекомендуется использовать режим автоусреднения. Если частота повторения импульсов менее 1 кГц, стоит использовать ручной режим регулировки усреднения и устанавливать количество усреднений в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. Определение количества усреднений

$T_{имп}$ , мс, не более	1,0	1,2	2,5	5	10	20	40	80	125
$t_{изм}$ , мс	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Усреднение	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Отдельно стоит отметить, что в измерителе МЗМ-18 производится фильтрация частот промышленной сети (Гц), поэтому, с учетом запаса, минимальная частота следования импульсов должна быть не менее 80 Гц.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента подтверждают, что измеритель мощности МЗМ-18 может быть использован для измерения импульсной и средней мощности импульсно-модулированных высокочастотных сигналов. Сформулируем основные ограничения измерений импульсной мощности:

1. Импульсная мощность входного сигнала не должна превышать минус 10 дБм.
2. Минимальное значение измеряемой мощности и динамический диапазон зависят от скажности измеряемого сигнала и могут быть рассчитаны по формулам (1), (2).
3. Частота повторения импульсов не менее 80 Гц.

Измеритель мощности МЗМ-18 способен отображать уровень входной мощности, начиная с минус 60 дБм, однако указанная точность измерений (0,8 дБ) обеспечивается при уровне входной мощности не менее минус 53 дБм.

Если уровень входной мощности превышает минус 10 дБ, то необходимо использовать внешний аттенуатор. За счет ослабления уровня мощности, он позволяет увеличивать границу максимальной измеряемой мощности (граница минимальной измеряемой мощности при этом также увеличивается). Ослабление аттенуатора может быть учтено с помощью компенсации ослабления для удобного отображения (третий раздел в главном меню прибора).

Помимо описанных ограничений, при проведении измерений обязательно стоит учитывать предельно допустимые характеристики измерителя:

- Диапазон рабочих частот, Гц: от 0,01 до 18
- Максимальный уровень входной мощности, дБм: + 20.

Превышение максимально допустимого уровня мощности может привести к выходу из строя прибора.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАИЛУЧШЕЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

### Частотная коррекция

Частотная стабильность ИМ МЗМ-18 достигается путем частотной коррекции, которая не может выполняться автоматически. Для получения корректных результатов необходимо задавать значение частоты входного сигнала в разделе «Частотная коррекция» (второй раздел в главном меню прибора).

### Обнуление

При измерении низких уровне мощности рекомендуется производить процедуру обнуления (первый раздел в главном меню прибора). Это позволяет автоматически выполнять компенсацию изменения параметров тракта постдетекторной обработки.

### Усреднение

При выполнении измерений прибор выполняет многократное считывание, затем отображает усредненное значение. При измерении низких уровней мощности увеличение количества усреднений способствует повышению точности измерений, но приводит к уменьшению скорости отображения результатов измерений. По умолчанию значение усреднения установлено в режим «Авто» (автоматический режим).



ЗАО «НПФ «Микран», ул. Вершинина д. 47, г. Томск,  
Россия, 634045.

Телефон: (3822) 41-18-77, 90-00-29

Факс: (3822) 42-36-15

E-mail: [pribor@micran.ru](mailto:pribor@micran.ru)