

# ИЗМЕРЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ

## MEASURING ABSOLUTE ELECTRIC AREA OF ALTERNATING PULSES WITH MATH WAVEFORMS

Лемешко Н.В. (N. Lemeshko), к.т.н., с.н.с. НТЦ Анализа ЭМС ФГУП НИИР

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие электронных устройств и средств технико-физических измерений тесно связано с совершенствованием методов измерений характеристик импульсов. Многие установки генерируют знакопеременные импульсы, характеризующие протекание каких-либо процессов. К ним следует отнести взрывамагнитные генераторы мощных импульсов электрического тока, регистраторы грозовых разрядов, счетчики частиц, датчики лавинных процессов [1]. Импульсы, генерируемые в таких устройствах, содержат информацию о протекающем процессе, например, о скорости нарастания, амплитудных уровнях, длительности затухания. Эти характеристики могут быть измерены осциллографическими методами при использовании вспомогательных масштабирующих устройств.

Измерение параметров импульсных сигналов в радиоэлектронике выделено в отдельное научное направление [2]. Среди характеристик импульсов принято выделять прямо и косвенно измеряемые. К первой группе обычно относят те параметры, которые могут быть измерены методами осциллографии и которые характеризуют непосредственно форму импульсов либо их энергетику. Вторая группа объединяет характеристики, измерение которых требует преобразований импульсов либо математической обработки [3]. К ней и относится абсолютную электрическую площадь (АЭП) импульсов, об измерении которой и пойдет речь в настоящей работе.

Абсолютная электрическая площадь является интегральной мерой эффективности тех или иных процессов. Например, АЭП коротких импульсов характеризует их инициирующую силу для переходных процессов в электрических цепях с постоянными времени, большими длительности импульсов [4]. Кроме того, АЭП характеризует мощностные характеристики многих импульсных устройств.

Точные измерения АЭП имеют свои особенности, и для достижения минимальной погрешности следует правильно выбрать метод измерений и метрологическое обеспечение.

### ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСОВ

Среди методов измерения импульсов принято выделять регистрационные, интегральные, нелинейные и осциллографические. Регистрационные методы обычно используются для очень малых длительностей импульсов, характерных, например, для ядерной физики и сверхбыстродействующих электронных ключей. Регистрирующие устройства обычно работают по компараторной схеме, осуществляющей интегрирование функции импульса и сравнение полученного значения с установленным порогом [5]. Его превышение фиксирует факт прихода импульса, однако никакие другие характеристики не измеряются. Этот метод иногда используется для измерений интервалов между импульсами.

Интегральные методы предназначены как для регистрации, так и для определения электрической площади однополярных импульсов. Они основаны на сходном принципе, однако пороговая обработка исключается. В данном случае осуществляется усиление и сравнительно точное интегрирование импульсов в специальных схемах.

Использование интегрирования в аналоговых схемах обладает тем недостатком, что с течением времени потенциал на регистрирующем элементе снижается, и, следовательно, измеренная величина требует немедленного использования с отображением предусмотренными методами, если только в средстве измерений не реализована более сложная обработка с использованием элементов памяти. Однако точное интегрирование в аналоговых схемах не всегда может быть выполнено с требуемой точностью.

Рассмотренные методы имеют еще один существенный недостаток — они дают слишком мало информации, в результате чего возможны ошибки системного характера при анализе пакетов импульсов. Например, импульсы кардиотонического типа состоят из трех выбросов сильно различающейся амплитуды, которые могут анализироваться по раздельности только в более сложных триггерных схемах [6]. Интеграторы, используемые на практике, характеризуются определенным динамическим диапазо-

ном, полосой частот обеспечения линейности и инерционностью, которые надо обязательно учитывать и соотносить с предполагаемыми характеристиками сигналов. Поэтому результаты измерений, полученные регистрационными и интегральными методами, можно считать пригодными к использованию только при наличии дополнительной информации об исследуемом сигнале.

Нелинейные методы измерений параметров импульсов [3] предполагают разветвленную их обработку. Каждая ветвь обработки включает элемент, передаточная характеристика которого описывается точно известной нелинейной функцией входного напряжения. Выходные напряжения с каждого нелинейного элемента поступают на интеграторы, выполняющие операцию их интегрирования на некотором временном промежутке. Интеграторы могут работать в двух режимах — расширения или выпрямления преобразованных импульсов. Режим расширения обычно используют для коротких одиночных импульсов либо импульсов с большой скважностью (более 100). В этом случае длительность импульсов на выходе интегратора многократно увеличивается, но остается меньше периода повторения. Время интегрирования должно быть больше длительности импульса. Для импульсов с невысокой скважностью (менее 100) или при измерении периодических сигналов, в т.ч. гармонических, обычно используется режим выпрямления. В этом случае сигнал на выходе интегратора остается почти неизменным, а время интегрирования должно быть много больше периода сигнала.

Описываемый метод измерений предусматривает использование в ветвях обработки нелинейных элементов и интеграторов с характеристиками, удовлетворяющими специальным требованиям перекрестной нормировки. Последняя обеспечивает независимость измерений временных параметров импульсов от амплитудных, и амплитудных параметров от временных.

Полученные таким образом сигналы поступают в систему обработки, назначением которой является расчет измеряемых параметров. Вывод последних на индикаторные устройства

обеспечивает считывание результатов измерений.

Как видно из представленного описания, нелинейные методы также связаны с интегрированием. В теории интегральных измерений показано, что количество параметров, которые могут быть измерены в нелинейных схемах, соответствует количеству ветвей обработки. Таким образом, эти измерения значительно более информативны, чем реализованные согласно выше рассмотренным принципам.

Основным недостатком нелинейного метода является влияние инерции измерительной системы, которое проявляется в увеличении погрешности измерений при снижении длительности импульсов. В результате для достижения универсальности необходимо применять множество комплектов ветвей и устройств обработки со своими характеристиками. Кроме того, такие измерительные устройства подвержены неустранимым системным ошибкам, вызванным неучтенным изменением характеристик нелинейных элементов. Измерение электрической площади возможно только для однополярных импульсов [3].

Среди методов измерения параметров импульсов осциллографические являются наиболее информативными. Их суть состоит в регистрации временной функции импульсов с минимальными амплитудными и частотными искажениями. Современные осциллографы обладают функциями автоматических измерений, которые позволяют точно определить среднее, среднеквадратичное, пиковое значение входного напряжения, длительность нарастания и спада и т.д. В радиотехнике показано, что многие характеристики импульсов могут быть вычислены по опорным значениям, полученным по осциллограммам с использованием курсорных и маркерных измерений.

Для однополярных импульсов электрическая площадь импульсов рассчитывается по формуле  $S_0 = t_p u_c$ , где:  $t_p$  — временной интервал усреднения,  $u_c$  — среднее напряжение по заданному интервалу усреднения для функции сигнала  $s(t)$ . При использовании функции автоматических измерений значение  $u_c$  вычисляется непосредственно осциллографом, и его остается лишь умножить на длительность развертки, которая и будет равна интервалу усреднения. При этом важно, чтобы развертка охватывала импульс полностью. Такой алгоритм расчета применим в случае, когда анализируемые импульсы разделены интервалами нулевого напряжения. В противном случае границы развертки следует устанавливать строго по времени начала и конца импульса.

В случае необходимости измерений АЭП знакопеременных импульсов изложенный принцип применять нельзя.

В этом случае требуется вычислить значение

$$S_0 = \int_0^{t_p} |s(t)| dt,$$

и его использование даст неверный результат. Для некоторых импульсов, например, кардиотонической формы, может быть применено разбиение на небольшое число участков постоянной полярности, однако это сильно затрудняет и замедляет измерения. Кроме того, в практике тестирования радиоэлектронных средств в большом количестве встречаются импульсы — имитаторы, моделирующие преобразуемые и выходные сигналы. К ним относят импульс типа «вспышка», по форме являющийся кратковременной ограниченной во времени негармонической несущей с хаотичной амплитудной модуляцией. Естественно, что для него описанный метод не применим.

Таким образом, использование чисто осциллографических методов даже с применением стандартных автоматических измерений не позволяет измерить АЭП знакопеременных импульсов. Поэтому здесь необходимо использовать новые подходы.

#### ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ АЭП

Как следует из изложенного, основным требованием к осциллографам, применяемым при измерениях АЭП, является наличие дополнительной математической обработки. Современные осциллографы весьма часто обеспечивают ту или иную обработку первичных осциллограмм. В наиболее простых устройствах она включает элементарные математические операции, позволяющие в той или иной степени сопоставить осциллограммы с получением некоторой расчетной кривой. Но этого, очевидно, недостаточно для измерения АЭП.

По сути, расчет АЭП может быть выполнен двумя последовательными операциями над осциллограммой импульса — взятием модуля и интегрированием. Возможность их осуществления предусмотрена в современных приборах профессионального уровня — например, в осциллографах сериях RTM и RTO фирмы Rohde&Schwarz. Таким образом, вторичная обработка результатов измерений, полученных осциллографическими методами, позволяет непосредственно рассчитать АЭП для знакопеременных импульсов.

При измерении электрической площади путем умножения расчетного среднего значения на длительность развертки в пределах последней должны присутствовать только измеряемые импульсы. Вместе с тем, они часто сопровождаются близко расположенными второстепенными выбросами, которые должны быть исключены из рассмотрения. В этом случае использование упомянутого метода становится затрудни-

тельным, т.к. требует очень аккуратного выбора длительности развертки и условия запуска. Это сильно осложняет измерения и снижает их точность.

При работе с расчетными осциллограммами имеется возможность использовать для них курсорные измерения. Следовательно, устраняется необходимость в точной установке длительности развертки. Интеграл от модуля осциллограммы рассчитывается как разность значений, соответствующих уровню в начале и в конце выбранного участка расчетной осциллограммы.

Следует заметить, что в зависимости от программной реализации результат интегрирования может быть выражен в обезличенных единицах. В этом случае его необходимо умножить на коэффициенты развертки по времени и/или по амплитуде.

Естественно, что описанные функции осциллографа могут быть реализованы и программно на компьютере на основе полученного с него массива данных. Однако это снижает универсальность метода измерений. Использование расчетных осциллограмм позволяет подобрать характеристики сигнала по требуемой АЭП, что необходимо, например, для точного тестирования измерительных радиоприемников.

Теперь рассмотрим примеры измерения АЭП для знакопеременных сигналов.

#### ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЯ АЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛОГРАФА СЕРИИ R&S RTM

Вначале рассмотрим пример, иллюстрирующий действенность метода измерений электрической площади импульсов положительной полярности, основанного на вычислении среднего значения по осциллограмме. Для этого воспользуемся схемой измерений (рис. 1, а), включающей четырехканальный осциллограф R&S RTM2054 с полосой

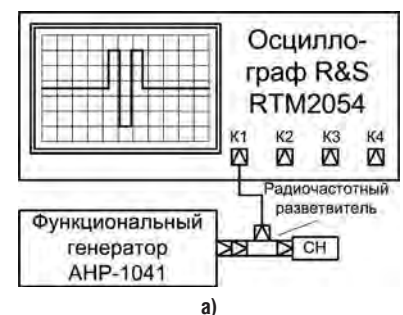


Рис. 1. Измерительная установка: а) схема; б) фотография



пропускания 500 МГц и функциональный генератор АНР-1041, согласованный по выходу (на рисунке СН — согласованная нагрузка) и соединенный с осциллографом. Фотография измерительной установки приведена на рис. 1, б.

На вход осциллографа подавались одинаковые парные прямоугольные импульсы, имевшие длительность около 6 мкс и амплитуду 250 мВ. Расчетная электрическая площадь каждого импульса составляла 1,5 мкВс, а обоих импульсов — 3 мкВс. Результат измерений среднего значения напряжения в пределах отображаемой развертки составляет 55,4 мВ при ее общей длительности 50 мкс (рис. 2), следовательно, измеренное значение электрической площади составляет 2,8 мкВс. Сопоставление полученных результатов говорит о действенности метода измерений по среднему значению.

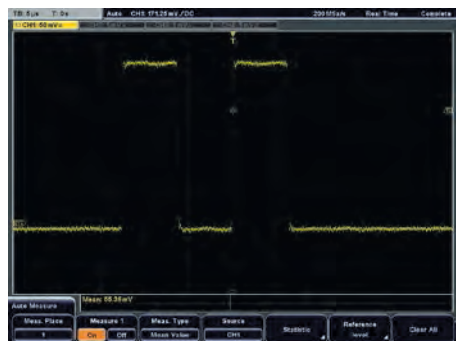


Рис. 2. Результат измерений электрической площади парных импульсов

Теперь рассмотрим случай, когда на вход осциллографа подается два положительных импульса, разделенные отрицательным импульсом (рис. 3). В данном случае следует измерять АЭП. Длительность каждого из трех импульсов составляет 7,7 мкс, их амплитуда равна 250 мВ. Следовательно, вычисленное значение АЭП составляет около 5,78 мкВс.

Согласно результатам измерений, среднее по развертке напряжение равно 29,7 мВ при длительности развертки 50 мкс. Измеренное значение электрической площади равно 1,5 мкВс и составляет менее чем треть от АЭП, т.е. фактически соответствует только одному импульсу в пакете. Следовательно, использованный в предыдущем приме-

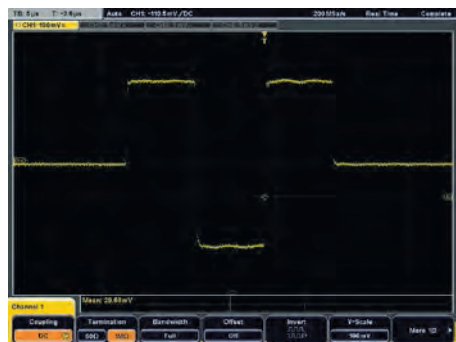


Рис. 3. Результат измерений электрической площади встроенных импульсов



Рис. 4. Результат измерений АЭП встроенного импульса с использованием расчетных осциллограмм

ре принцип измерений в данном случае не применим.

Для правильного измерения АЭП рассмотренного сигнала использовались расчетные осциллограммы (рис. 4) — функция модуля (МА1) и функция интеграла модуля (МА2) входного сигнала. Как следует из полученных результатов, ход расчетных осциллограмм соответствует отмеченным математическим функциям. Абсолютная электрическая площадь составила 5,85 мкВс, что имеет незначительное расхождение с ее расчетным значением. Начало и конец импульса отмечены на интегральной кривой установленными курсорами, что позволяет выполнить измерение АЭП по разности показаний и исключить влияние на результат постоянной составляющей сигнала.



Рис. 5. Измерение АЭП импульса типа «вспышка»

Расчетные осциллограммы позволяют измерять АЭП очень сложных по форме импульсов. Примером является импульс типа «вспышка», осциллограмма которого изображена на рис. 5. Для таких импульсов могут использоваться только методы, основанные на математической обработке осциллограмм. Согласно полученным результатам, АЭП в данном случае составляет 1,15 мкВс. Курсоры на расчетной осциллограмме устанавливаются по визуальному началу и концу измеряемого импульса.

Представленные примеры свидетельствуют о возможности использования математической обработки осциллограмм в приборах серии R&S RTM для расчета АЭП и подтверждают правильность получаемых ее оценок.

Точность измерений АЭП расчетным методом определяется погрешно-

стями измерений временных и амплитудных параметров сигналов. Первая из них, согласно [7], составляет 0,4%, вторая — 3,5 ppm. Полагая, что математическая обработка осциллограмм выполняется с большой точностью, можно утверждать, что ошибка измерения АЭП будет определяться амплитудными погрешностями и в пределе составит около 0,4%. Таким образом, точность измерений АЭП с использованием расчетных осциллограмм оказывается лучше, чем для любых оценочных методов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, измерение абсолютной электрической площади знакопеременных импульсов может быть выполнено на основе математических функций, заложенных в современных осциллографах. Рассмотренный принцип измерений применим во многих приложениях, относящихся к сферам радиоэлектроники, электротехники и физики.

Использование расчетных осциллограмм позволяет упростить процесс измерений, а также снизить вероятность возникновения ошибок, связанных с последующей обработкой полученных результатов, и, следовательно, способствует общему повышению качества экспериментальных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА И ССЫЛКИ

1. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока. — Под ред. Форгова В.Е. — М.: Наука, 2002. — 399 с.
2. Шейндлин А.Е. Новая энергетика. — М.: Наука, 1987. — 464 с.
3. Грязнов М.И. Интегральный метод измерения импульсов. — М.: «Советское радио», 1975. — 280 с.
4. Корякин В.С., Кравчук Ю.В., Лебедева О.В. и др. Измерители радиопомех. — Под ред. Фастовского И.А. — М.: Связь, 1973. — 152 с.
5. Ушаков В.Н., Долженко О.В. Электроника: от элементов до устройств. — М.: Радио и связь, 1993. — 352 с.
6. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Советское радио, 1970. — 728 с.
7. Осциллографы цифровые R&S RTM20xx. Руководство по эксплуатации. 2013 г.

*The present article introduces the method to measure absolute electric area of alternating pulses using math waveforms. There is a detailed analysis of the mostly used pulse measurement methods given within this article as well as the acceptability assessment for the specified parameter. From this article you will get to know about the necessary requirements to oscilloscopes for this measurement type and see measurement examples of complex signals received using R&S RTM series oscilloscope.*