

УДК 621.317.35

Д.К. Отузбаева, Э.В. Семенов

Анализ искажений короткоимпульсных сигналов различной формы в сверхширокополосных измерителях вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик

Исследована возможность уменьшения систематической погрешности сверхширокополосного измерителя вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик за счет оптимизации формы тестового сигнала. Проведено моделирование ожидаемой систематической погрешности, а также исследованы причины различий искажений для полученных импульсов.

Ключевые слова: нелинейные измерения, импульсные воздействия, нелинейные характеристики, систематическая погрешность.

Современные нелинейные измерители для получения нелинейных характеристик элементов производят измерения гармоническим сигналом [1]. При этом возникает методическая погрешность, если в последующем исследуемый элемент будет работать с импульсными сигналами [2]. В данной статье рассматривается альтернативный тип измерителя – характерограф (рис. 1), который позволяет одновременно измерять вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики полупроводниковых элементов посредством воздействия сверхкоротким (100 нс и менее) видеоимпульсом [3]. Одна из проблем таких устройств: линейные искажения, возникающие из-за неравномерности передаточной характеристики и приводящие к систематической погрешности измерений. Существует несколько способов уменьшения влияния систематической погрешности: калибровка измерителя [4] или выбор для измерений тестового импульса, при котором систематическая погрешность будет минимальна. Настоящая статья посвящена исследованию второго способа.

Моделирование искажений регистрирующего устройства при воздействии сигналов разных форм. Сверхкороткоимпульсный характерограф состоит из шасси National Instruments PXI-1033, генератора тестовых сигналов Tabor Electronics 5201, аналогово-цифрового преобразователя PXI-5114, ЭВМ и измерительного преобразователя. Их назначение и технические характеристики приведены в [3].

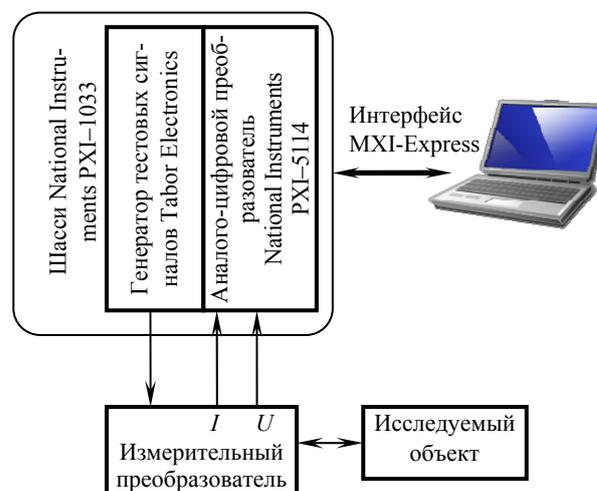


Рис. 1. Структурная схема системы для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик сверхширокополосным импульсом

Линейные искажения, вносимые регистрирующим устройством PXI-5114, описываются его передаточной характеристикой. Для упрощения задачи моделирования представим передаточную характеристику регистрирующего устройства как передаточную характеристику фильтра нижних частот (ФНЧ) первого порядка, имеющую вид

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + i\omega/\omega_{cp}},$$

где $\omega = 2\pi f$ (рад/с), $\omega_{cp} = 2\pi f_{cp}$, $f_{cp} = 155$ МГц – частота среза передаточной характеристики регистрирующего устройства PXI-5114. Тогда переходная характеристика этого фильтра имеет вид

$$h(t) = 1 - \exp[-\omega_{cp}t].$$

В качестве тестовых импульсов $u_{\text{вх}}(t)$ рассмотрим три формы импульсов длительностью 100 нс: трапецевидный, гауссовский и импульс экспоненциальными фронтами. Фронт импульса с экспоненциальными фронтами задается формулой

$$u_{\text{вх}}(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right), \quad (1)$$

где τ_f – коэффициент, характеризующий длительность фронта. Гауссовский импульс задается соотношением

$$u_{\text{вх}}(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_e}\right)^2\right], \quad (2)$$

где τ_e – параметр, отвечающий за длительность импульса.

Импульсы были заданы с частотой дискретизации 5 Гвыб/с, соответствующей частоте дискретизации регистрирующего устройства. Отклик регистрирующего устройства $u_{\text{вых}}(t)$ на каждый из этих импульсов был найден согласно формулам:

$$S(\omega) = F[u_{\text{вх}}(t)]H(\omega), \quad (3)$$

$$u_{\text{вых}}(t) = F^{-1}[S(\omega)], \quad (4)$$

где $F[u_{\text{вх}}(t)]$ – прямое преобразование Фурье, $F^{-1}[S(\omega)]$ – обратное преобразование Фурье спектра сигнала.

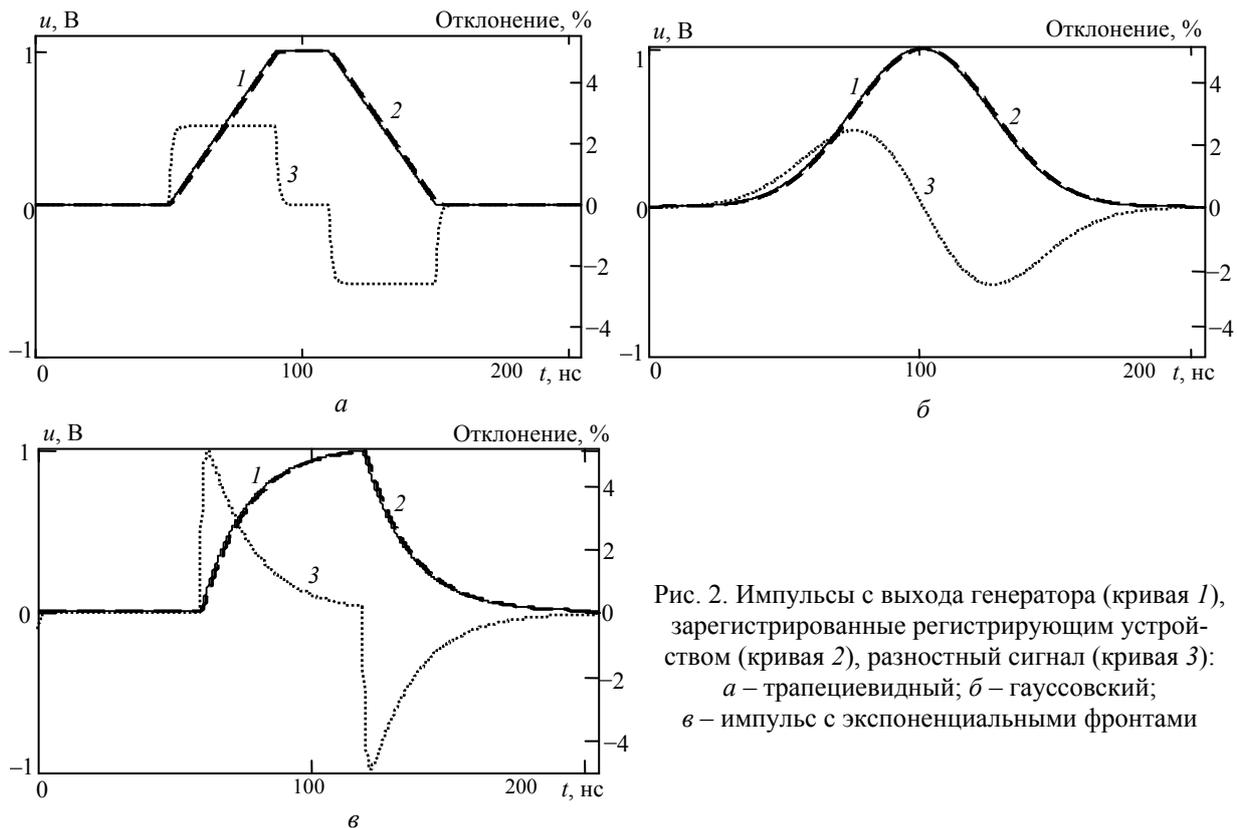


Рис. 2. Импульсы с выхода генератора (кривая 1), зарегистрированные регистрирующим устройством (кривая 2), разностный сигнал (кривая 3): а – трапецевидный; б – гауссовский; в – импульс с экспоненциальными фронтами

Полученные отклики регистрирующего устройства и поданные на него импульсы приведены на рис. 2. Видно, что величина отклонения разностного сигнала для каждого импульса составляет приблизительно 2,5%, т.е. систематическая погрешность их регистрации примерно одинакова. Большая часть этой погрешности обусловлена некоторой задержкой сигнала регистрирующим устройством. На результаты измерений ВАХ и ВФХ она не влияет, поэтому рассмотрим остаточную систематическую погрешность после компенсации этой задержки.

Сигнал, принятый регистрирующим устройством, сдвинут во времени на величину вносимого им группового времени запаздывания τ :

$$\tau = -d\phi/dt,$$

для расчета отклика системы на входное воздействие вместо формулы (3) воспользуемся формулой

$$S(\omega) = F[u_{\text{вх}}(t)]H(\omega)\exp(i\omega\tau).$$

Полученные в результате моделирования значения максимального отклонения зарегистрированного сигнала от сформированного, а также отклонения по переднему и заднему фронту приведены в таблице и на рис. 3. Оценка искажений приведена для участков, на которых переходные процессы, связанные с началом импульса и обусловленные конечной крутизной переходной характеристики, завершены. Конкретно в качестве такого участка выбран участок фронта 20...80% от амплитуды импульса.

Значение отклонения сформированного сигнала от зарегистрированного

Форма импульса	Значение отклонения, %	
	Передний фронт	Задний фронт
Трапецевидный импульс	0,0009	0,0009
Гауссовский импульс	0,036	0,038
Импульс с экспоненциальными фронтами	0,011	0,011

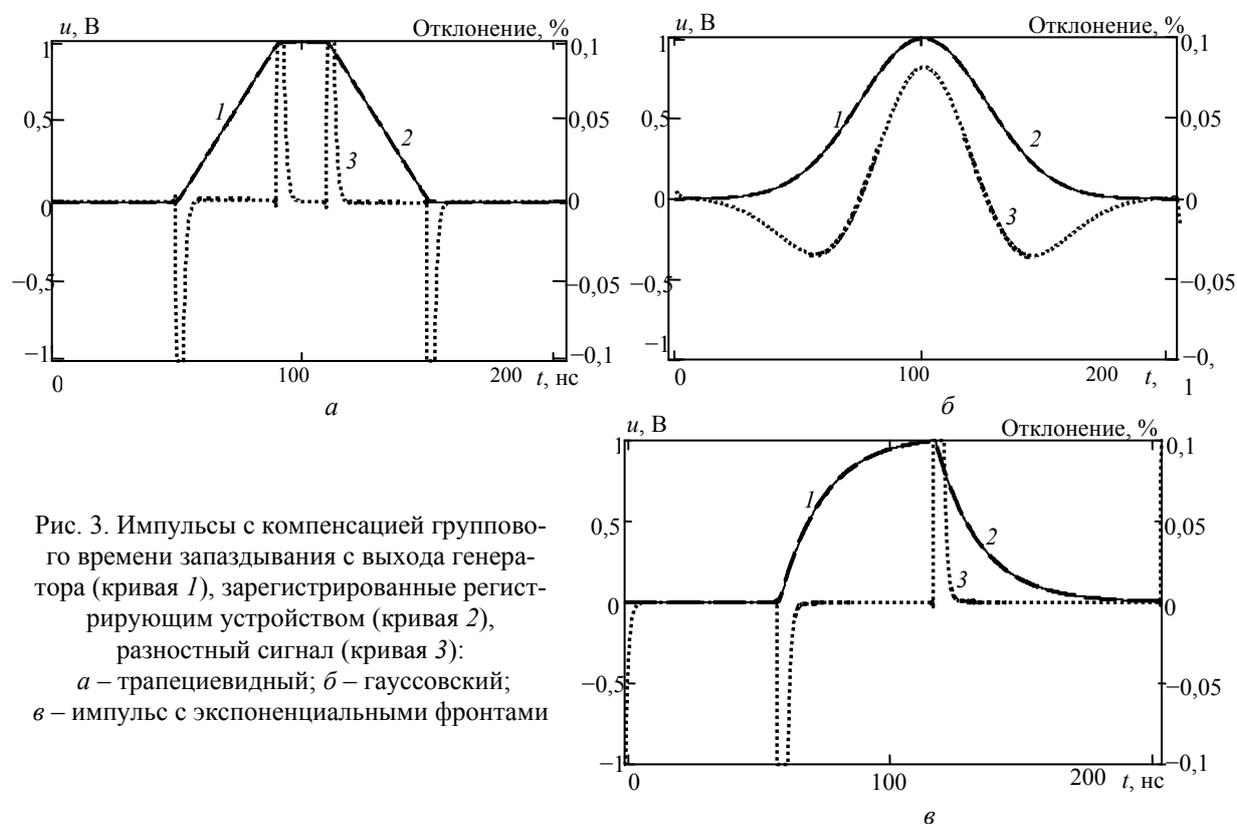


Рис. 3. Импульсы с компенсацией группового времени запаздывания с выхода генератора (кривая 1), зарегистрированные регистрирующим устройством (кривая 2), разностный сигнал (кривая 3):
 а – трапецевидный; б – гауссовский;
 в – импульс с экспоненциальными фронтами

Согласно ранее проведенному математическому моделированию [5], а также результатам настоящего исследования, импульсы, имеющие участки линейного возрастания, имеют меньшее значение отклонения разностного сигнала, давая наименьшую систематическую погрешность измерений. При условии компенсации группового времени запаздывания импульс с экспоненциальными фронтами также дает малые искажения. Гауссовский импульс имеет гладкую форму, однако систематическая погрешность его регистрации достигает 0,08%. Таким образом, импульсы с фронтом, описываемым по линейному закону или имеющие экспоненциальное возрастание, имеют преимущество при регистрации регистрирующим устройством, в отличие от экспоненциальной функции квадрата времени.

Исследование причин различий в искажениях сигналов. Для установления причин различий в искажениях сигналов воспользуемся асимптотическими методами анализа, т.е. рассмотрим только участок фронта импульса, на котором переходные процессы, связанные с началом фронта, завершились.

Для нахождения отклика регистрирующего устройства на входное воздействие воспользуемся интегралом Дюамеля, применяемым для нахождения отклика системы на произвольно меняющееся во времени входное воздействие:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_{\text{ВХ}}(0)h(t) + \int_0^t u'_{\text{ВХ}}(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (5)$$

Фронт трапецевидного импульса описывается уравнением прямой

$$u_{\text{ВХ}}(t) = kt,$$

где k – коэффициент наклона прямой. Таким образом, отклик регистрирующего устройства на линейно нарастающий фронт будет описываться выражением

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = 0 \cdot h(t) + \int_0^t k(1 - \exp(-\omega_{\text{CP}}\tau - \omega_{\text{CP}}t))d\tau = kt - \frac{k(1 - \exp(-\omega_{\text{CP}}t))}{\omega_{\text{CP}}}. \quad (6)$$

После окончания переходных процессов, связанных с началом фронта, выражение $\exp(-\omega_{\text{CP}}t)$ стремится к нулю, так как $(-\omega_{\text{CP}}t)$ стремится к минус бесконечности. Таким образом, второе слагаемое в (6) стремится к k/ω_{CP} . Следовательно прямая, описывающая фронт, сместится на величину k/ω_{CP} , что можно рассматривать как задержку, так как наклон прямой не изменился. В таком случае, введя задержку, можно получить сигнал на выходе, идентичный исходному, т.е. сигнал с такой формой фронта обладает устойчивостью к влиянию систематической погрешности.

Экспоненциальный фронт импульса описывается выражением (1). С помощью интеграла Дюамеля (5) вычислили отклик регистрирующего устройства на входное воздействие

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = 0 \cdot [1 - \exp(-\omega_{\text{CP}}t)] + \int_0^t \frac{1}{\tau_f} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_f}\right) [1 - \exp(\omega_{\text{CP}}t - \omega_{\text{CP}}\tau)] d\tau.$$

После проведения некоторых математических преобразований выходное выражение принимает вид:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{\exp(-\omega_{\text{CP}}t)}{\omega_{\text{CP}}\tau_f - 1} + 1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau_f} + \ln\left(\frac{\omega_{\text{CP}}\tau_f}{\omega_{\text{CP}}\tau_f - 1}\right)\right]. \quad (7)$$

Так же, как и в прошлом примере, по окончании переходных процессов, связанных с началом фронта, выражение $\exp(-\omega_{\text{CP}}t)$ стремится к нулю, поэтому первое слагаемое в (7) стремится к нулю. Тогда выходная функция имеет вид входного воздействия за исключением наличия некоторой дополнительной величины в степени экспоненты, что можно рассматривать как задержку сигнала после регистрации. Таким образом, выходная функция стремится к

$$u_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow 1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau_f} + \ln\left(\frac{\omega_{\text{CP}}\tau_f}{\omega_{\text{CP}}\tau_f - 1}\right)\right].$$

Найдем отклик регистрирующего устройства на входное воздействие в виде импульса гауссовской формы, описываемого выражением (2):

$$\begin{aligned} u_{\text{ВЫХ}}(t) &= 1 \cdot [1 - \exp(-\omega_{\text{CP}}t)] - \int_0^t \frac{-2t}{\tau_e^2} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_e^2}\right) [1 - \exp(\omega_{\text{CP}}t - \omega_{\text{CP}}\tau)] d\tau = \\ &= \frac{2}{\omega_{\text{CP}}\tau_e^2} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_e^2}\right) [t \exp(-\omega_{\text{CP}}t) - t^2 \omega_{\text{CP}} - t] + 1 - \exp(-\omega_{\text{CP}}t). \end{aligned}$$

После окончания переходных процессов, связанных с началом фронта, выражение $\exp(-\omega_{\text{CP}}t)$

стремится к нулю, тогда выходная функция имеет вид: $u_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow 1 - \frac{2}{\omega_{\text{CP}}\tau_e^2} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_e^2}\right) [t^2 \omega_{\text{CP}} + t]$. Выра-

жение $\exp\left(-\frac{t^2}{\tau_e^2}\right)$ соответствует входному воздействию, однако наличие перед ним множителя

$\left[t + t^2 \omega_{cp} \right]$, зависящего от времени, указывает на то, что выходной сигнал не будет совпадать по форме с входным.

Заключение. Обнаружено, что систематическая погрешность для различных форм тестовых импульсов не одинакова. При длительности переходного процесса в регистрирующем или генерирующем устройстве, сопоставимой с длительностью фронта импульсного сигнала, меньшую систематическую погрешность дает гладкая форма сигнала (гауссовские импульсы), а при длительности переходного процесса в регистрирующем или генерирующем устройстве много меньшей длительности фронта импульса преимуществами обладают сигналы с линейным или экспоненциальным фронтом. Аналитически и в вычислительных экспериментах установлено, что если фронт меняется по линейному закону, либо описывается функцией экспоненты, то систематическая погрешность его регистрации устройством с передаточной характеристикой фильтра нижних частот с частотой среза реальной передаточной характеристикой регистрирующего устройства [5] минимальна. В случае если фронт возрастает как экспоненциальная функция квадрата времени (гауссовский импульс), то значение отклонения зарегистрированного сигнала от исходного имеет наибольшее значение.

Литература

1. X-параметры: новый принцип измерений ВЧ- и СВЧ-компонентов (X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components) / D.E. Root, J. Horn, L. Bettset al. // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2009. – Т. 2. – С. 20.
2. Семенов Э.В. Виртуальный нелинейный импульсный измеритель характеристик цепей для САПР Microwave Office / Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин, А.Г. Лоцилов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымКо '2009): матер. 19-й Международ. конф. Севастополь, Украина, 14–18 сентября 2009 г. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 1. – С. 103–104.
3. Семенов Э.В. Программно-аппаратный комплекс для сверхкороткоимпульсной характеристики полупроводниковых элементов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments. – 2012: сборник трудов XI Международ. науч.-практ. конф. Москва, 6–7 декабря 2012 г. – М.: ДМК-пресс, 2012. – С. 10–12.
4. Назаров М.А. Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей / М.А. Назаров, Э.В. Семенов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 3, ч. 1. – С. 38–42.
5. Моделирование систематической погрешности сверхширокополосных нелинейных измерителей при различных параметрах тестовых / Д.К. Отузбаева, Э.В. Семенов // Современная техника и технологии: матер. 19-го Междунар. науч.-практ. конф., Томск 15–19 апреля 2014 г. – Томск: ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 133.

Отузбаева Дарина Кунтаевна

Магистрант каф. радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУРа

Тел.: +7-905-990-63-71

Эл. почта: darina.otyz@gmail.com

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. РЗИ

Тел.: +7 (382-2) 41-33-65

Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Otuzbayeva D.K., Semyonov E.V.

Distortion analysis of various form short-pulse signal in UWB current-voltage and capacitance-voltage characteristics measuring system

The paper deals with the possibility of reducing the systematic inaccuracy in UWB current-voltage and capacitance-voltage characteristics measuring system by optimizing form of signal. Expected systematic inaccuracy was simulated, also causes of differences obtained pulse signal distortion were investigated.

Keywords: nonlinear measurements, pulse impact, non-linearity characteristic, video pulses, systematic error.