УДК 621.317.089.6

М.А. Назаров, Э.В. Семенов

Абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей

Рассмотрены вопросы линейной абсолютной калибровки системы измерения нелинейных характеристик цепей на сверхкороткоимпульсном сигнале. Линейная абсолютная калибровка выполняется только для коррекции искажений, которые вносит регистрирующее устройство при регистрации сигнала в память. Систематическая погрешность регистрирующего устройства корректируется при помощи функции, обратной передаточной регистрирующего устройства, которая может иметь полюса, начиная с определенной частоты. Для исключения полюсов рассмотрены два типа фильтров (Гаусса и фильтр типа «приподнятый косинус»). Из откликов этих фильтров выбран оптимальный и рассчитана относительная погрешность для используемого в системе измерения нелинейных характеристик цепей колоколообразного импульса длительностью 100 нс.

Ключевые слова: нелинейные измерения, импульсное воздействие, абсолютная калибровка, систематическая погрешность.

Разработка и создание современных средств измерения характеристик нелинейных цепей в режимах, близких к режимам их функционирования, являются важным направлением в области развития измерительной техники [1]. Ряд параметров SPICE-моделей нелинейных элементов зависит от формы тестовых сигналов, на которых эти параметры измерены [2]. В настоящее время нами разрабатывается характериограф [3] для измерения нелинейных вольт-амперных (BAX) и вольтфарадных (BФХ) характеристик элементов, цепей и устройств, работающих на коротких видеоимпульсах. Характериограф впервые позволяет одновременно измерять ВАХ и ВФХ полупроводниковых элементов посредством воздействия сверхкоротким (100 нс и менее) видеоимпульсом даже в условиях продолжающихся переходных процессов в элементе.

ВАХ i_{IV} и ВФХ C(u) *p*-*n*-перехода определяются выражениями [4]:

$$i_{IV} = \frac{i_r(u)u_f(u) - i_f(u)u_r(u)}{u_f(u) - u_r(u)},$$
(1)

$$C(u) = \frac{i_{r}(u) - i_{f}(u)}{u_{r}(u) - u_{f}(u)},$$
(2)

где $i_r(u)$ и $i_f(u)$ – зависимости токов через элемент от напряжения на элементе на фронте и спаде видеоимпульса; $u'_r(u)$ и $u'_f(u)$ – зависимости производных по времени напряжения на элементе от напряжения на элементе на фронте и спаде видеоимпульса. Токи i_{IV} (через нелинейную проводимость) и i_C (через нелинейную емкость) протекают одновременно, и их соотношение может меняться в широких пределах ($i_{IV} \gg i_C$ или наоборот). Поэтому погрешность косвенных измерений C(u) по (2) может оказаться больше погрешности прямых измерений $i_r(u)$ и $i_f(u)$. Таким образом, должна быть обеспечена высокая точность прямых измерений указанных токов. Из этого следует необходимость калибровки регистрирующего устройства.

Кроме того, нелинейные свойства объектов проявляются по-разному в зависимости от формы тестового сигнала. По этой причине нужно точно знать форму тестового сигнала. Система разрабатывается таким образом, что тестовый сигнал с выхода цифроаналогового преобразователя (ЦАП) подается одновременно на исследуемый объект и на регистрирующее устройство. Поэтому в измерительной системе искажения тестового сигнала, которые вносит ЦАП, можно не учитывать, а форма тестового сигнала определяется регистрирующим устройством. Из вышеизложенного следует, что для более точного измерения нелинейных ВАХ и ВФХ необходимо выполнить абсолютную калибровку только регистрирующего устройства [5].

Регистрирующее устройство вносит как линейные, так и нелинейные искажения. В данной работе рассматривается коррекция только линейных искажений. Величина вносимых регистрирующим устройством линейных искажений была оценена в [5]. Целью работы является коррекция линейных искажений формы сигнала, которые вносит регистрирующее устройство, и измерение ВАХ с учетом коррекции.

Методика коррекции линейных искажений формы сигнала. Линейные искажения, которые вносит регистрирующее устройство (РУ) при регистрации сигнала, определяются передаточной функцией РУ (зависят от полосы пропускания РУ), которая имеет спад, начиная с определенной частоты. Спад передаточной функции РУ определяет линейные искажения. Поэтому для коррекции искажений нужно скорректировать спад передаточной функции. Алгоритм коррекции искажений показан на рис. 1, где Γ – генератор тестового сигнала; РУ – регистрирующее устройство; ППФ и ОПФ – прямое и обратное преобразование Фурье, а $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – входной сигнал и отклик регистрирующего устройства. Зарегистрированный (выходной) сигнал $s_2(t)$ имеет спектр

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) H(\omega). \tag{3}$$

где $S_1(\omega)$ – спектр входного сигнала $s_1(t)$; $H(\omega)$ – передаточная функция РУ. Из равенства (3) видно что для коррекции искажений зарегистрированного сигнала нужно его спектр домножить на функцию, обратную передаточной РУ (1/ $H(\omega)$), которая была найдена в [5]. Далее, взяв обратное преобразование Фурье (ОПФ), получим скорректированный сигнал во временной области $s_{\text{корр}}(t)$.

$$\begin{array}{c|c} & & & & \\ \hline S_1(t) & S_2(t) & & \\ \hline & & & \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} & & \\ & & \\ \end{array} \begin{array}{c} & & \\ \end{array} \begin{array}{c} & & \\ & & \\ \end{array} \begin{array}{c} & & \\ & & \\ \end{array} \end{array}$$

Рис. 1. Алгоритм коррекции искажений с использованием функции, обратной передаточной

Теперь оценим эффективность коррекции. Для этого необходимо определить, насколько искажается скорректированный сигнал по сравнению с входным. Входным сигналом будем считать ранее зарегистрированный сигнал $s_2(t)$, форма которого точно известна. Для оценки коррекции найдем относительную невязку входного и скорректированного сигналов, которая определяется выражением

 $\varepsilon(t) = [s_{\text{корр}}(t) - s_2(t)]/\max[s_2(t)],$ (4) где max[$s_2(t)$] – максимальное значение сигнала $s_2(t)$, $s_{\text{корр}}(t)$ – скорректированный сигнал. Алгоритм оценки относительной погрешности показан на рис. 2. В самом алгоритме коррекции (см. рис. 1) точность коррекции определяется точностью нахождения передаточной функции, поэтому для оценки коррекции (рис. 2) были найдены две передаточные функции для двух откликов регистрирующего устройства на единичный скачок по алгоритму, описанному в [5]. Домножив спектр ранее зарегистрированного сигнала на первую передаточную функцию РУ, получим спектр отклика $S_3(\omega)$ регистрирующего устройства на входной сигнал $s_2(t)$:

$$S_3(\omega) = S_2(\omega)H_1(\omega). \tag{5}$$



Рис. 2. Алгоритм оценки коррекции систематических искажений регистрирующего устройства

Далее, домножив спектр отклика $S_3(\omega)$ на функцию, обратную передаточной РУ для второго измерения $1/H_2(\omega)$, и взяв обратное преобразование Фурье, получим скорректированный сигнал $S_{\text{корр}}(t)$:

$$s_{\text{kopp}}(t) = F^{-1}[S_3(\omega)/H_2(\omega)].$$
 (6)

Далее находится относительная погрешность $\varepsilon(t)$ по формуле (4) для колоколообразного импульса длительностью 100 нс, показанного на рис. 3. На рис. 4 изображен график относительной погрешности для этого импульса без коррекции (кривая l) и после коррекции (кривая 2) по алгоритму на рис. 2.

Из рис. 4 видно, что с использованием коррекции систематическая погрешность уменьшается с 1,3 % (определено в [5]) до величин, не заметных на уровне шума, составляющего в данном случае не более 0,2 %. Увеличение уровня шума (случайной составляющей погрешности) – специфическая особенность коррекции с использованием обращения передаточной функции. Один из возможных

подходов борьбы с этим эффектом – домножение обращенной передаточной функции на передаточную функцию фильтра нижних частот.



Функция, обратная передаточной, начиная с определенной частоты, может иметь полюса (частоты, на которых передаточная функция имеет значение, равное нулю), которые для корректного вычисления нужно исключить. Из этих соображений следует, что необходимо применить фильтр нижних частот, который должен отфильтровывать частоты, на которых появляются полюса. Кроме того, в системе короткоимпульсных измерений во временной области важно, чтобы используемый фильтр не затягивал фронт импульсного сигнала и не создавал выбросов на переходной характеристике. Этим требованиям удовлетворяют фазолинейные фильтры. Были рассмотрены два типа таких фильтров: фильтр Гаусса и фильтр типа «приподнятый косинус».

Передаточные функции этих фильтров определяются следующими выражениями. Для фильтра Гаусса: $H_3(\omega) = \exp(-\omega/\omega_0)$, где ω_0 – частота среза фильтра; ω – текущая частота. Для фильтра типа «приподнятый косинус»:

$$H_{3}(\omega) = \begin{cases} 1 \quad \text{для} \quad \omega < (1-\alpha)\omega_{s}/2 \\ \cos^{2}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega - (1-\alpha)\omega_{s}/2}{\alpha\omega_{s}}\right) \\ 0 \quad \text{для} \quad \omega > (1+\alpha)\omega_{s}/2 \end{cases} \text{для}(1-\alpha)\omega_{s}/2 < \omega < (1+\alpha)\omega_{s}/2 ,$$

где ω_s – частота среза фильтра; ω – текущая частота; α – коэффициент «сглаженности» фильтра.

Скорректированный сигнал с использованием фильтра нижних частот определяется выражением $s_{\text{корр}}(t) = F^{-1}[S_2(\omega)H_3(\omega)/H(\omega)],$ (7) где $S_2(\omega)$ – спектр отклика регистрирующего устройства на входной сигнал $s_1(t)$; F^{-1} – обратное преобразование Фурье; $H(\omega)$ – передаточная функция регистрирующего устройства; $H_3(\omega)$ – передаточная функция фильтра нижних частот. На рис. 5 показаны формы отклика на входной сигнал без коррекции s(t) (переходная характеристика РУ) и отклика с коррекцией при помощи фильтра Гаусса – $s_r(t)$ и фильтра типа «приподнятый косинус» – $s_{cos}(t)$.



2 -отклика регистрирующего устроиства на единичный скачок. 1 - 663 коррекции – S(t)2 -отклика, скорректированного при помощи фильтра Гаусса, – $S_r(t)$;

3 – отклика, скорректированного при помощи фильтра типа «приподнятый косинус», – $s_{cos}(t)$

Из рис. 5 видно, что фильтр типа «приподнятый косинус» лучше повторяет форму переднего фронта и не создает выбросов на переднем фронте. Его и будем использовать в дальнейшем.

Оценка эффективности коррекции и определение ВАХ с учетом коррекции. Определим эффективность коррекции, которая получается при использовании фильтра типа «приподнятый косинус». Алгоритм определения относительной погрешности $\varepsilon(t)$ показан на рис. 6. Алгоритм схож с алгоритмом, приведенным на рис. 2, только добавлен фильтр типа «приподнятый косинус». Зарегистрированный ранее колоколообразный импульс $s_2(t)$ длительностью 100 нс будем считать входным (см. рис. 3). Параметры фильтра типа «приподнятый косинус» были подобраны оптимально: $\alpha = 0,91$; $\omega_s = 2\pi \cdot 400 \cdot 10^6$ рад/с. Коэффициент α выбирался таким образом, чтобы выброс сигнала на переходной характеристике практически отсутствовал (если уменьшить α , то будет выброс и осцилляции сигнала, а если увеличить, то фронт на переходной характеристике излишне затягивается). Критерий выбора частоты среза фильтра ω_s – максимальное отношение сигнал/шум и коррекция выброса на фронте.

На рис. 7 показан график относительной погрешности. Видно, что относительная погрешность сигнала при использовании фильтра типа «приподнятый косинус» составляет не более 0,04%.



Рис. 6. Алгоритм определения относительной погрешности при использовании фильтра типа «приподнятый косинус»



Рис. 7. График относительной погрешности є(t) при коррекции с фильтром типа «приподнятый косинус» для колоколообразного импульса длительностью 100 нс

Алгоритм коррекции искажений, приведенный выше, был реализован на измерительной установке в среде программирования LabVIEW 2011. В качестве примера была измерена ВАХ резистора номиналом 50 Ом с учетом коррекции искажений (рис. 8).





Заключение. В результате работы была исследована абсолютная калибровка сверхкороткоимпульсного измерителя нелинейных характеристик цепей, которая применялась только для регистрирующего устройства. Исследовалась калибровка при помощи функции, обратной передаточной регистрирующего устройства, и влияние одного из двух типов фильтров (Гаусса и фильтра типа «приподнятый косинус»).

В ходе работы установлено, что фильтр типа «приподнятый косинус» не ухудшает крутизну переднего фронта входного сигнала и не создает выброса на переднем фронте. Линейные искажения регистрирующего устройства при его применении составили не более 0,04% для колоколообразного импульса длительностью 100 нс. Данная коррекция получилась эффективнее коррекции обычного домножения зарегистрированного сигнала на функцию, обратную передаточной (без использования фильтра случайная погрешность, определяемая шумами, составила около 0,2%). В ходе коррекции удалось более чем на порядок снизить искажения зарегистрированного сигнала колоколообразной формы длительностью 100 нс (с 1,3 до 0,04%).

Работа поддержана по договору № 02.G25.31.0091 от 25.05.2013 между ЗАО «НПФ «Микран» и Минобразования РФ, выполняемому в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

Литература

1. Лощилов А.Г. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия / А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 161–165.

2. Моделирование нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов полупроводниковым диодом / Семенов Э.В., Бибиков Т.Х., Малютин Н.Д., Павлов А.П. // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 171–174.

3. Семенов Э.В. Сверхкороткоимпульсный характериограф [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.edwardsemyonov.narod.ru/nonlinearity/uwb-cap.html, свободный (дата обращения: 23.08.13).

4. Semyonov E.V. Ultra-short pulse meter of current-voltage and capacitance-voltage characteristics for NI LabVIEW // «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo), 2012 22nd International Crimean Conference, 10–14 Sept. 2012. – Sevastopol: Veber, 2012. – P. 857–858.

5. Назаров М.А. Оценка систематической погрешности измерения формы импульсного сигнала регистрирующим устройством / М.А. Назаров, Э.В. Семенов // Научная сессия ТУСУР–2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 1. – С. 324–326.

Назаров Максим Андреевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа Тел.: 8-952-800-23-25 Эл. почта: mnaz90@mail.ru

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Nazarov M.A., Semyonov E.V. Absolute calibration of non-linear ultra-short pulse meter of current-voltage and capacitance-voltage characteristics

The paper deals with the problems of linear absolute calibration of the system measurement of non-linear characteristics of the circuits on ultra-short pulse signal. Linear absolute calibration is performed only for the correction of distortions, which are made by the recording device when the signal is recorded in the memory. The systematic error of the recording device is corrected by using the function which inverse to the transfer function of the recording device. The transfer function may have poles, starting with a certain frequency. To eliminate the poles we have examined the influence of two types of filters (Gaussian filter and a «raised cosine» type). From the responses of these filters the best one was chosen and we calculated the relative error of measurement of non-linear characteristics of the circuits of the bell pulse duration of 100 ns. **Keywords:** non-linear measurements, pulse impact, absolute calibration, systematic error.

42