

УДК 621.317.351, 004.67

М.А. Лазько, Э.В. Семенов

Способ регистрации откликов объекта для повышения чувствительности сверхширокополосного нелинейного измерителя характеристик цепей

Предложен способ регистрации откликов, который позволяет повысить чувствительность сверхширокополосного измерителя нелинейных характеристик цепей. Представлены результаты эксперимента по измерению характеристики нелинейности объекта, проявляющего слабые нелинейные свойства. Экспериментальные исследования проведены с использованием аппаратной платформы PXI.

Ключевые слова: метод нелинейной рефлектометрии, некачественные контакты, повышение чувствительности, характеристика нелинейности, отношение сигнал/шум.

Актуальность проблемы. В настоящее время стали преобладать цифровые устройства, в то время как методы и средства оценки нелинейных характеристик устройств не претерпели особых изменений. Чаще всего для оценки нелинейности устройств применяются гармонические или полигармонические сигналы. Однако такие сигналы более близки к рабочим сигналам для аналоговой техники, в то время как цифровые устройства работают с импульсными сигналами. Одним из подходов к исследованию характеристик нелинейности цепей является использование метода нелинейной рефлектометрии [1]. Актуальность данного метода в целях оценки характеристик нелинейности цепей продемонстрирована в работах [2–4].

Представленный метод был реализован в приборе Р4-И-01 [5]. С его помощью проводились исследования контактных соединений, на основании которых было выявлено, что неоднородности в виде некачественных контактов проявляют нелинейные свойства. Во время исследований также было отмечено, что величина сопротивления неоднородностей, проявляющих нелинейные искажения, очень мала [6], в то время как уровень собственных шумов измерителя нелинейных характеристик цепей практически сравним с величиной откликов от нелинейных неоднородностей. Это значительно затрудняло наблюдение и выявление неоднородностей, проявляющих нелинейные свойства. На основании полученных результатов была поставлена задача, направленная на повышение чувствительности сверхширокополосного измерителя нелинейных характеристик цепей.

Способ регистрации откликов для повышения чувствительности. Метод нелинейной рефлектометрии заключается в последовательном воздействии на объект двумя тестовыми импульсами разной формы, которые линейно связаны заранее известной математической функцией (идеальная передаточная функция звена, осуществляющего линейное преобразование). Идеальная передаточная функция не учитывает нелинейность генератора. При расчете результата измерений использование тестовых импульсов, реально воздействующих на объект, допускает влияние нелинейности генератора [7]. Поэтому передаточную функцию предпочтительно рассчитывать по зарегистрированным тестовым импульсам. Полученная функция позволяет привести второй отклик к виду первого, чтобы вычислить их разность. Полученная таким образом характеристика отображает разность преобразования импульсов объектом, которая объясняется различным влиянием нелинейных свойств исследуемого объекта на разные тестовые импульсы. Такая характеристика получила название характеристики нелинейности. Основной особенностью метода нелинейной рефлектометрии является то, что все расчеты производятся во временной области.

Расчет характеристики нелинейности $\varepsilon(t)$ производится по формуле

$$\varepsilon(t) = u_1(t) - h(t) * u_2(t), \quad (1)$$

где $h(t)$ – передаточная функция; $*$ – символ свертки; $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – отклики объекта на тестовые сигналы.

Традиционно для вычисления характеристики нелинейности тестовые импульсы и отклики от них регистрируются в одном диапазоне измерения напряжения, который выбирается исходя из размаха тестового импульса. Размах тестового воздействия превышает предельное рабочее напряжение

микросхем аналого-цифрового преобразования (АЦП), поэтому с целью уменьшения входного напряжения на входе канала регистрирующего устройства включают управляемую схему аттенуаторов, которая ослабляет сигнал до требуемого уровня. После преобразования сигнала в цифровой вид восстанавливается реальная амплитуда сигнала путем умножения на коэффициент, обратный коэффициенту ослабления. Однако стоит учитывать, что микросхема аналого-цифрового преобразования вносит собственные шумы, которые после восстановления сигнала также увеличиваются (рис. 1). В случае регистрации тестовых импульсов на уровне 4...8 В собственные шумы, вносимые регистрирующим устройством, незначительно влияют на расчет передаточной функции. Но в случае регистрации откликов от малых неоднородностей, амплитуда которых может составлять сотни милливольт, с прежним коэффициентом передачи аттенуаторов уровень собственных шумов входного тракта регистрирующего устройства будет сравним с величиной откликов.

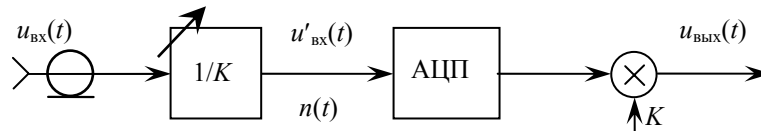


Рис. 1. Структурная схема входного канала регистрирующего устройства: $u_{\text{вх}}(t)$ – входной сигнал; $u'_{\text{вх}}(t)$ – сигнал, приведенный к входу микросхемы АЦП; $n(t)$ – шум, вносимый входным трактом регистрирующего устройства; $1/K$ – коэффициент передачи управляемой схемы аттенуаторов; $u_{\text{вых}}(t)$ – выходной сигнал после усиления

Приведенный к входу аналого-цифрового преобразователя сигнал с учетом собственных шумов входного тракта описывается следующей формулой:

$$u'_{\text{вх}}(t) = \frac{u_{\text{вх}}(t)}{K} + n(t). \quad (2)$$

Выходной сигнал после аналого-цифрового преобразования и умножения на коэффициент ослабления имеет вид

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вх}}(t) + n(t)K. \quad (3)$$

Предлагается следующий способ регистрации откликов, который позволит уменьшить влияние собственных шумов входного тракта регистрирующего устройства. Он предполагает двухпроходное аналого-цифровое преобразование. На первом проходе регистрируются тестовые воздействия, рассчитывается передаточная функция $h(t)$ и сохраняется в память. На втором проходе диапазон измеряемого напряжения перестраивается исходя из максимальной амплитуды отклика для использования максимальной разрядности АЦП.

Связь между измеряемым диапазоном напряжения ΔU и коэффициентом ослабления K прямо пропорциональна:

$$\frac{1}{K} \propto \Delta U, \quad (4)$$

$$\Delta U_1 > \Delta U_2, \quad K_1 > K_2,$$

где ΔU_1 и ΔU_2 – диапазоны измеряемых напряжений для двух проходов; K_1 и K_2 – соответствующие этим диапазонам коэффициенты ослабления.

С целью сравнения чувствительности для двух способов регистрации откликов рассчитаем параметр сигнал/шум для характеристики нелинейности как отношение амплитуды отклика характеристики нелинейности к среднеквадратическому значению шума:

$$SNR = \frac{\max[\varepsilon(t)]}{\sigma[n(t)]}, \quad (5)$$

где $\max[\varepsilon(t)]$ – амплитуда отклика характеристики нелинейности; $\sigma[n(t)]$ – среднеквадратическое отклонение шума.

Подставляя (1) в формулу (5) и учитывая (3) получим расчетную формулу для определения параметра сигнал/шум. Запишем выражения для двух способов регистрации откликов с разными диапазонами измерения:

$$SNR_1 = \frac{\max[u_1(t) - h(t) * u_2(t)]}{\sigma[n_1(t) - h(t) * n_2(t)]K_1}, \quad (6)$$

$$SNR_2 = \frac{\max[u_1(t) - h(t) * u_2(t)]}{\sigma[n_1(t) - h(t) * n_2(t)] K_2}$$

Чтобы определить, во сколько раз уменьшится случайная погрешность измерения характеристики нелинейности, вычислим отношение представленных параметров сигнал/шум. После упрощения выражения получим:

$$\frac{SNR_1}{SNR_2} = \frac{\sigma[n_1(t) - h(t) * n_2(t)]}{\sigma[n_1(t) - h(t) * n_2(t)]} \cdot \frac{K_2}{K_1} = \frac{\sqrt{2}\sigma[n(t)]}{\sqrt{2}\sigma[n(t)]} \cdot \frac{K_2}{K_1} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (7)$$

В результате упрощения выражения (7) получили отношение, которое напрямую описывает связь коэффициента ослабления входного канала регистрирующего устройства с приростом отношения сигнал/шум. Улучшение параметра сигнал/шум обеспечивается в результате регистрации откликов в минимальном диапазоне, соответствующем амплитуде отклика.

Описание экспериментальной установки. С целью подтверждения теоретических выводов была разработана экспериментальная установка для проведения измерений. Базовым вычислительным блоком является аппаратная платформа в формате PXI, в которую устанавливаются модуль регистрирующего устройства NI PXI-5114 и контроллер NI PXI-8196, выполняющий функции электронно-вычислительной машины (ЭВМ). Для формирования сигналов использовался генератор сигналов произвольной формы (ГСПФ) Tektronix 3021. Для разделения падающей и отраженной волны использовалась линия задержки (ЛЗ). Управление оборудованием, а также обработку и визуализацию данных выполняет программное обеспечение, разработанное с помощью среды программирования LabVIEW. Ниже представлены структурная схема экспериментальной установки для измерения нелинейных характеристик цепей и интерфейс разработанного программного обеспечения (рис. 2).

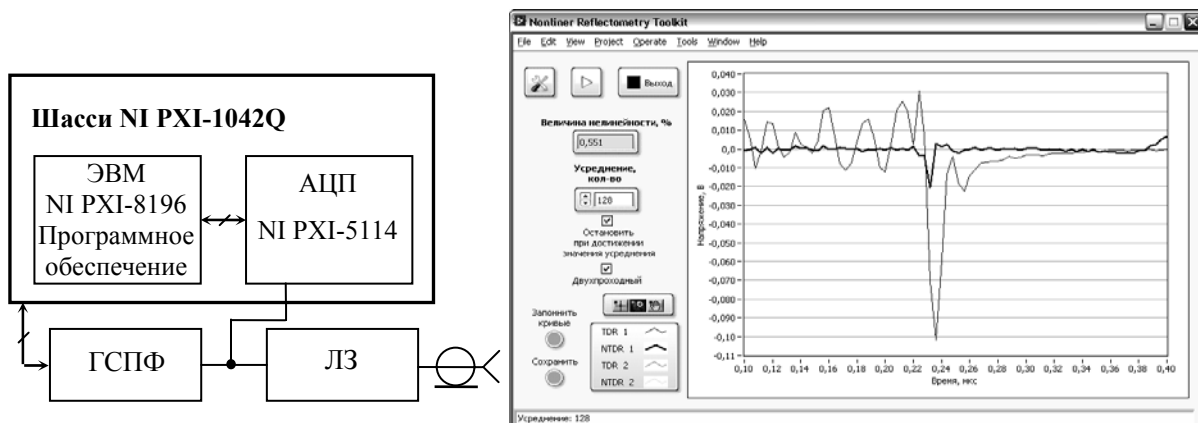


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки (слева) и интерфейс программного обеспечения (справа)

Экспериментальная установка работает следующим образом. В программном обеспечении задаются параметры тестового воздействия, после чего полученный сигнал загружается в буфер ГСПФ и запускается генерация. Для разделения падающей и отраженной волны используем линию задержки (ЛЗ). Аналого-цифровым преобразователем регистрируются тестовые воздействия и задержанные по времени отклики от объекта. Полученные данные в цифровой форме передаются на ЭВМ. В результате расчетов в соответствии со способом, описанным в [1], получаем характеристику нелинейности исследуемого объекта. В качестве результатов измерений на графике можем наблюдать две характеристики: линейную и нелинейную рефлектограмму (рис. 2, справа).

Экспериментальные исследования. С помощью разработанной экспериментальной установки были проведены эксперименты по обнаружению и измерению малых неоднородностей, проявляющих нелинейные свойства. В качестве малой неоднородности была разработана нелинейная нагрузка, в которой использовалась схема с параллельно включенным резистором и диодом Шотки RMEG2020ej (нелинейная неоднородность), обеспечивающая наибольшее падение напряжения на резисторе и тем самым обеспечивая слабое влияние диода (рис. 3, а).

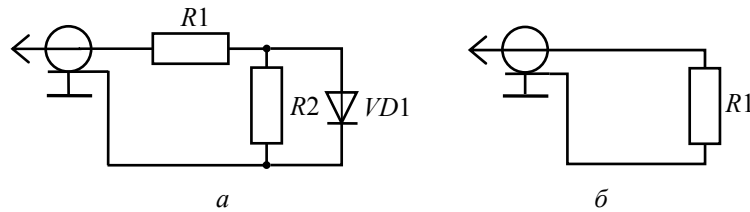


Рис. 3. Схемы экспериментальных нагрузок: а – нелинейная нагрузка; б – линейная нагрузка

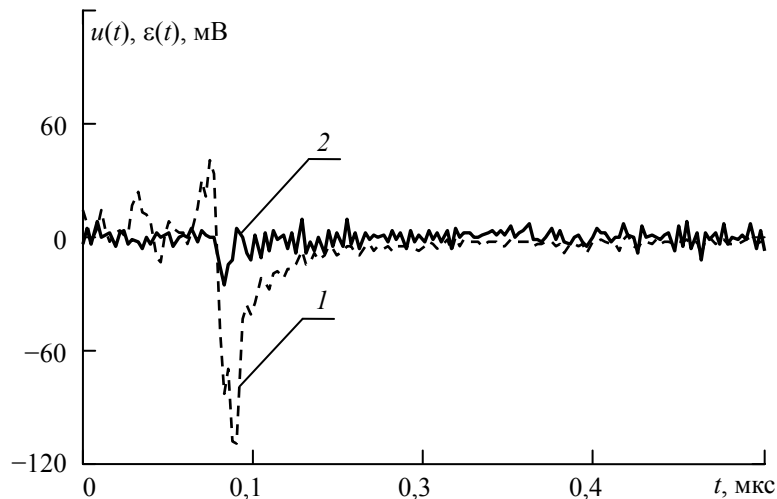


Рис. 4. Характеристики нелинейной нагрузки, измеренные традиционным способом: 1 – отклик от нагрузки $u_1(t)$; 2 – характеристика нелинейности $\varepsilon(t)$

Результат регистрации откликов от нелинейной нагрузки традиционным способом приведен на рис. 4. Измерения проводились с использованием функции усреднения по 128 осциллограммам. Отклик от нелинейной нагрузки явно выражен, и его амплитуда составляет 110 мВ. На характеристике нелинейности в точке 0,083 мкс также имеется экстремум амплитудой 25 мВ на фоне шумов, среднеквадратическое отклонение которых составляет 5 мВ. По характеристике нелинейности однозначно локализовать нелинейную нагрузку в целом сложно.

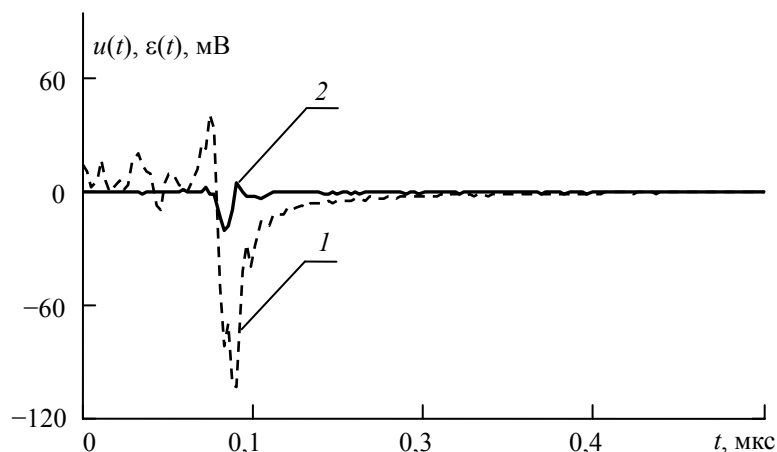


Рис. 5. Характеристики нелинейной нагрузки, измеренные модифицированным способом: 1 – отклик от нагрузки $u_1(t)$; 2 – характеристика нелинейности $\varepsilon(t)$

Эксперимент для нелинейной нагрузки был проведен повторно с применением двухпроходного способа регистрации откликов. Результаты измерения приведены на рис. 5. Видно, что амплитуда характеристики нелинейности уточнилась и составляет 20 мВ, а шумы снизились до уровня 0,3 мВ.

Для того чтобы убедиться, что представленная характеристика нелинейности отражает действительно нелинейность нагрузки, а не собственную нелинейность экспериментальной установки, проведем дополнительно измерения для заведомо линейной нагрузки – резистора (см. рис. 3, б).

Сопротивление резистора выбрано так, чтобы отклики от нелинейной и линейной нагрузки были приблизительно одинаковые. На рис. 6 приведены результаты измерения для линейной нагрузки. Можно видеть, что характеристика нелинейности для линейной нагрузки не имеет экстремума (т.е. собственные нелинейные искажения экспериментальной установки незначительны).

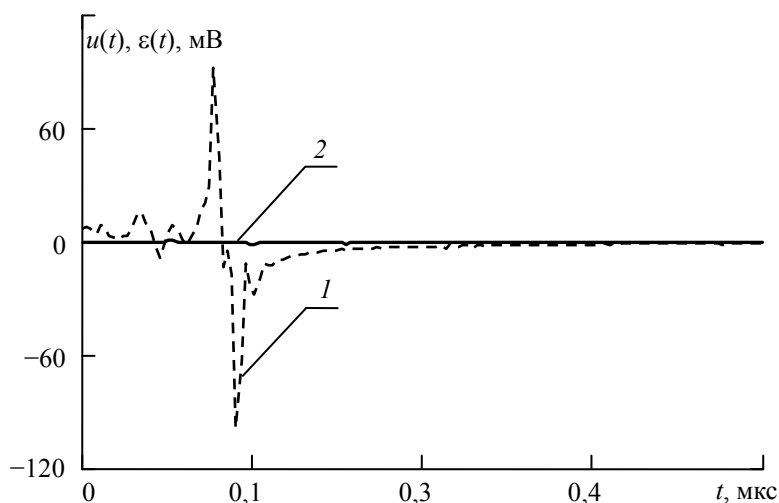


Рис. 6. Характеристики линейной нагрузки, измеренные модифицированным способом: 1 – линейный отклик $u_1(t)$; 2 – нелинейный отклик $\varepsilon(t)$

Выводы. Экспериментально показано, что модифицированный способ регистрации откликов в рамках метода нелинейной рефлектометрии позволяет регистрировать и локализовать нелинейные отклики на порядок меньше, чем традиционный способ (порядка единиц мВ). Для традиционного способа регистрации откликов параметр сигнал/шум составил 18 дБ, а для модифицированного способа – 36 дБ. В соответствии с (7) делаем вывод, что чувствительность повысилась на 18 дБ.

Представленные экспериментальные данные подтверждают правильность теоретических выкладок и возможность повышения таким способом чувствительности нелинейного измерителя характеристик цепей. Предложенный подход способствует обнаружению малых неоднородностей, например в виде некачественных контактов, проявляющих нелинейные свойства.

Литература

1. Пат. 2263929 С1 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 S 13/00. Способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом / Семёнов Э.В.; заявитель и патентообладатель Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. – № 2004110640; заявл. 04.07.2004; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31 (III ч.). – 595 с.
2. Семенов Э.В. Программно-аппаратный комплекс для исследования нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов сверхширокополосными приемниками / Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин, А.Г. Лощилов // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС: матер. II науч.-техн. конф. Омск, 15–17 октября 2008 г. – Омск: ЦКБ Автоматики, 2008. – С. 174–177.
3. Средства измерения характеристик нелинейности радиотехнических цепей при широкополосном импульсном воздействии / Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин, А.А. Бомбизов и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2009): матер. 19 Междунар. конф. Севастополь, Украина, 14–18 сентября 2009 г. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 754–755.
4. Семенов Э.В. Исследование нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов приемниками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.edwardsemyonov.narod.ru/know-how/baseband_nonlinearity_of_receiver.html, свободный (дата обращения: 05.01.2013).
5. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем / А.А. Бомбизов, А.А. Ладур, А.Г. Лощилов и др. // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
6. Диагностика качества электрических контактов методом нелинейной рефлектометрии с учетом термоэффектов / Э.В. Семенов, С.А. Артишев, А.А. Городилов, С.Б. Сунцов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2012): матер. 22-й Междунар. конф. Севастополь, Украина, 10–14 сентября 2012 г. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 915–916.

7. Семенов Э.В. Исследование нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, ТУСУР, 2012. – С. 13.

Лазько Михаил Анатольевич

Аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУРа

Тел.: (383-2) 41-37-09

Эл. почта: lazko.ma@sibmail.com

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, доцент каф. РЗИ

Тел.: (383-2) 25-33-60

Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Lazko M.A., Semyonov E.V.

The method of recording of object responses to improve the sensitivity of ultra wideband nonlinear vector network analyzer

In the paper we propose the method of recording of object responses which increase the sensitivity of ultra wideband nonlinear network analyzer. The results of experiments on the detection of nonlinear object which have small nonlinear properties are given. Experimental investigations were performed using the PXI hardware platform.

Keywords: nonlinear reflectometry, defective contacts, nonlinearity characteristic, signal-to-noise ratio.
