

тронных пар, наблюдаемых на мониторе персонального компьютера. Как видно из представленных рисунков, сигнал регистрируется с каждой оптопары с временным сдвигом по оси X и степенью сжатия стенок пищевода по оси Y.

Перистальтика пищевода на 3-ем и 4-ом каналах (рис. 5) оптико-электронного зонда соответствует средней и нижней части грудного отдела исследуемого органа. Заключение исследований – перистальтика пищевода нарушена, т.к. наблюдается хаотичная, нехарактерная для нормы, реакция стенок на данном участке исследуемого органа.

На примере одного из обследованных больных четко подтверждается диагноз дисфагии пищевода,

закрывающийся в недостаточной перистальтической работе стенок на конкретном уровне исследуемого органа. С помощью диаграмм определен участок, обладающий этим функциональным нарушением.

#### Заключение

Как показали проведенные исследования, разработанный оптико-электронный диагностический комплекс способен четко выявлять функциональные нарушения пищевода и может быть эффективным дополнительным инструментом для регистрации таких патологий, как кардиоспазм и ахалазия кардии, кардиальная грыжа пищеводного отверстия диафрагмы, рефлюкс-эзофагит и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноусов А.Ф., Богопольский П.М., Курбанов Ф.С. Хирургия пищевода. – М.: Медицина, 2000. – 353 с.
2. Сакс Ф.Ф., Байтингер В.Ф., Медведев М.А., Рыжов А.И. Функциональная морфология пищевода. – М.: Медицина, 1987. – 172 с.

3. Gunther S.V., Votyakov V.F., Grekhov I.S. System for investigation of functional abnormalities of esophagus // Works of the 9<sup>th</sup> Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. – Tomsk, 2003. – P. 152–154.

УДК 621.317.757

## НЕЛИНЕЙНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫХ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ

Э.В. Семёнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: edwardsemyonov@narod.ru

*Приведены результаты экспериментальных исследований по зондированию видеоимпульсными сигналами линии передачи, содержащей линейную и нелинейную неоднородности. Показано, что использованная характеристика нелинейности преобразования сигналов позволяет различать характер неоднородностей (линейная или нелинейная) с применением видеоимпульсных тестовых сигналов и определять расстояние до нелинейной неоднородности.*

#### Введение

Рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов позволяет получить информацию о наличии неоднородностей в линии передачи, расстоянии до них и характере их импеданса. При использовании синусоидальных тестовых сигналов исследуют нелинейность преобразования сигналов неоднородностями в линии передачи (в качестве примера приведем прибор для исследования проводных линий «Визир»). Нелинейные свойства проявляют полупроводниковые элементы [1], а также дефекты линии передачи, представляющие собой контакты металл-окисел-металл [2]. Представляет интерес использование видеоимпульсных тестовых сигналов и для исследования нелинейности преобразования сигналов неоднородностями. В [3, 4] рассмотрен метод исследования нелинейности преобразования сигналов объектом, допускающий использование видеоимпульсных тестовых сигналов.

Цель данной статьи – рассмотреть применение метода [3] для исследования нелинейности преобразования сигналов неоднородностями в линии передачи с использованием видеоимпульсных тестовых сигналов.

#### 1. Метод исследования

За основу возьмем метод [3]. Метод включает последовательное воздействие на исследуемый объект двумя тестовыми сигналами  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ , один из которых является линейным преобразованием другого:

$$X_2(\omega) = K_1(\omega)X_1(\omega), \quad (1)$$

где  $X_1(\omega)$  и  $X_2(\omega)$  – спектры тестовых сигналов,  $K_1(\omega)$  – известная или заданная функция. Характеристика нелинейности  $\varepsilon(t)$  преобразования сигналов определяется по формуле [3]:

$$\varepsilon(t) = u_1(t) - F^{-1}[K_1^{-1}(\omega)] * u_2(t),$$

где  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье,  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  – отклики объекта на тестовые сигналы  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  соответственно, \* – символ свертки.

Учтем, что генератор тестовых сигналов вносит искажения, и фактически полученные на его выходе сигналы  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  отличаются от требуемых тестовых сигналов  $x_1^*(t)$  и  $x_2^*(t)$ . Если генератор вносит только линейные искажения сигналов, то

$$X_1(\omega) = H_1(\omega)X_1^*(\omega); X_2(\omega) = H_2(\omega)X_2^*(\omega), \quad (2)$$

где  $X_1^*(\omega)$  и  $X_2^*(\omega)$  – спектры сигналов  $x_1^*(t)$  и  $x_2^*(t)$  соответственно,  $H_1(\omega)$  – функция, определяющая линейные искажения тестовых сигналов генератором. Из (1) и (2) следует, что  $K_1(\omega) = X_2(\omega)/X_1(\omega) = X_2^*(\omega)/X_1^*(\omega)$ . В этом случае  $K_1(\omega)$  удобно отыскивать как отношение спектров требуемых тестовых сигналов. Регистрировать фактически полученные тестовые сигналы не обязательно. Если же генератор вносит нелинейные искажения воспроизводимых сигналов, то в общем случае  $X_2(\omega)/X_1(\omega) \neq X_2^*(\omega)/X_1^*(\omega)$ . В этом случае  $K_1(\omega)$  нельзя искать как отношение спектров  $X_2^*(\omega)$  и  $X_1^*(\omega)$ . В связи с этим будем регистрировать фактически полученные тестовые сигналы и отыскивать  $K_1(\omega)$  как отношение их спектров. Тестовые сигналы и отклики исследуемой линии передачи регистрировались одним каналом приемника, а их разделение осуществлялось стробированием по времени.

В качестве тестового сигнала  $x_1^*(t)$  использовался прямоугольный видеопульс длительностью 4,3 нс. Второй тестовый сигнал должен отличаться от первого по форме или амплитуде [3]. Для того чтобы не уменьшать энергию сигнала  $x_2^*(t)$  по сравнению с энергией сигнала  $x_1^*(t)$ , получим сигнал  $x_2^*(t)$  преобразованием сигнала  $x_1^*(t)$  при помощи фазового корректора. Ограничимся фазовым корректором второго порядка. Это позволит выполнять данное преобразование при помощи как цифровых, так и аналоговых корректоров<sup>1</sup> [5] (в данном исследовании использовался цифровой корректор). Передаточная функция фазового корректора второго порядка выглядит следующим образом [5]:

$$H(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 - \frac{\omega_0}{m}j\omega + \omega_0^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_0}{m}j\omega + \omega_0^2},$$

где  $\omega_0$  – частота, для которой  $\arg[H(j\omega_0)] = -\pi$ ,  $m$  – коэффициент крутизны фазовой характеристики. Диапазон значений параметров  $m$  и  $\omega_0$ , при которых формы первого и второго тестовых сигналов существенно различаются, достаточно широк. Было принято, что  $m=1/2$  и  $\omega_0/(2\pi)=14,6$  МГц.

## 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включала цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который использовался в качестве генератора тестовых сигналов. Частота дискретизации ЦАП составляла 235 МГц, номинальное выходное сопротивление генератора было 75 Ом. Амплитуда тестового сигнала  $x_1(t)$  на выходе генератора составляла 0,25 В. Выходной сигнал генера-

тора подавался на параллельно соединенные вход приемника и вход исследуемой линии передачи с неоднородностями. В качестве приемника использовался осциллограф Tektronix TDS1012 (входное сопротивление 1 МОм, входная емкость 20 пФ). Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя осциллографа составляла 1 ГГц.

Исследуемая линия передачи (рис. 1) включала два каскадно соединенных отрезка коаксиального кабеля РК75-4-15 (волновое сопротивление 75 Ом) длиной 15 м и 10 м, поглощающую оконечную нагрузку R1 сопротивлением 75 Ом, диод Шоттки VD1 (нелинейная неоднородность), включенный согласно рис. 1 на расстоянии 15 м от генератора, и конденсатор C1 емкостью 18 пФ (линейная неоднородность), включенный параллельно резистору R1. Емкость конденсатора была выбрана так, чтобы отклик данной неоднородности мало отличался от отклика неоднородности в виде диода Шоттки. Это позволило проверить возможность различения характера неоднородностей (линейная или нелинейная) по характеристике нелинейности при одинаковых откликах неоднородностей на импульсный тестовый сигнал.

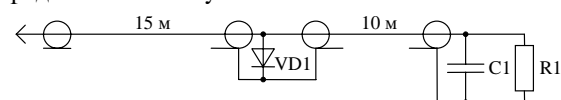


Рис. 1. Исследуемая линия передачи с линейной и нелинейной неоднородностями

## 3. Результаты эксперимента и их анализ

Результаты эксперимента приведены на рис. 2. Слева приведены тестовые сигналы ( $x_1(t)$  – кривая 1,  $x_2(t)$  – кривая 2). Справа приведены отклик  $u_1(t)$  исследуемой линии передачи на сигнал  $x_1(t)$  (кривая 3) и характеристика нелинейности  $\varepsilon(t)$  (кривая 4). В отклике линии передачи вначале наблюдается отклик от нелинейной неоднородности, а затем от линейной (нелинейная неоднородность находится ближе к началу линии, чем линейная).

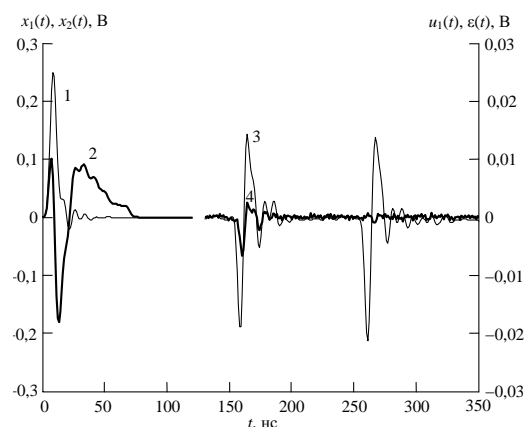


Рис. 2. Тестовые сигналы ( $x_1(t)$  – кривая 1,  $x_2(t)$  – кривая 2), отклик  $u_1(t)$  исследуемой линии передачи на сигнал  $x_1(t)$  (кривая 3) и характеристика нелинейности  $\varepsilon(t)$  (кривая 4)

<sup>1</sup> В используемом диапазоне частот аналоговые пассивные фазовые корректоры реализуемы как на элементах с сосредоточенными параметрами [5], так и на связанных линиях [6–8].

В окрестности отклика от нелинейной неоднородности наблюдается экстремум характеристики нелинейности  $\varepsilon(t)$ . Представляется, что точность, с которой полученная характеристика нелинейности отражает нелинейность преобразования сигналов неоднородностями, ограничивается в основном нелинейностью приемника (т.е. вносимыми приемником дополнительными нелинейными искажениями регистрируемых сигналов)<sup>2</sup>. Это утверждение основано на том, что в окрестности отклика от линейной неоднородности, рис. 2, наблюдается незначительно превышающий уровень шума экстремум  $\varepsilon(t)$ . Этот экстремум характеризует нелинейность преобразования сигналов приемником, если не предполагать нелинейности преобразования сигналов линейной неоднородностью.

### Выводы

Рассмотренная характеристика нелинейности, полученная с использованием видеоимпульсных

тестовых сигналов для линии передачи, содержащей линейную и нелинейную неоднородности, имеет экстремум в окрестности отклика от нелинейной неоднородности. В остальной части отклика линии передачи (в том числе и в окрестности отклика от линейной неоднородности) существенного превышения характеристики нелинейности над уровнем шума не наблюдается. Различение характера неоднородностей (линейная или нелинейная) с применением упомянутой характеристики нелинейности возможно. Такая возможность сохраняется и в том случае, если отклики неоднородностей на тестовый сигнал  $x_1(t)$  неразличимо сходные (как это имеет место в проведенном эксперименте). Экстремум характеристики нелинейности локализован во времени, что обеспечивает возможность определения расстояния до нелинейной неоднородности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант Президента РФ № МК-1702.2004.8).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42. – № 10. – С. 1181–1185.
2. Штейншлейгер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 142. – Вып. 1. – С. 131–145.
3. Семёнов Э.В. Исследование нелинейности преобразования детерминированных сверхширокополосных сигналов путем линейного комбинирования откликов объекта на линейно зависимые тестовые сигналы // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 18–21.
4. Семёнов Э.В. Сопоставление методов сверхширокополосной нелинейной локации, использующих один и несколько зондирующих импульсов // Радиолокационное исследование природных сред: Труды XXIII Всеросс. симп. – Санкт-Петербург, 2005. – Вып. 5. – С. 305–310.
5. Кисель В.А. Аналоговые и цифровые корректоры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
6. Семёнов Э.В., Малютин Н.Д., Маничкин А.Н. Фазовое звено с характеристиками функционального антипода С-секции // Радиотехника. – 2001. – № 5. – С. 32–35.
7. Семёнов Э.В., Малютин Н.Д. Широкополосные корректоры группового времени запаздывания на основе спиралеобразных связанных линий // Радиотехника. – 1998. – № 2. – С. 50–53.
8. Семёнов Э.В. Фазовые фильтры на основе связанных линий и их применение для аналоговой обработки широкополосных сигналов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1998. – 22 с.

<sup>2</sup> Нелинейные искажения сигналов в генераторе допустимы, т.к. регистрируются фактически полученные тестовые сигналы и  $K_1(\omega)$  отыскивается как отношение их спектров.