

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.4>

УДК: 621.3.09

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛОЙ НЕВЗАИМНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Э. В. Семенов, Н. Д. Малютин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 20 июля 2021 г.

Аннотация. В работе рассмотрены подходы и особенности измерения малой невязимности объектов. Приведено несколько вариантов мер невязимности и выбран наиболее устойчивый к шумам в регистрируемых сигналах. Рассмотрен способ нормирования выбранной меры невязимности. Показано, что проявление невязимности зависит от зондирующих сигналов. Отмечено, что основным фактором, ограничивающим диапазон измерения невязимности снизу, является различие импедансов входной и выходной цепей. Без выполнения калибровки при длительности тестового воздействия около 50 пс и разнице индуктивности присоединительных цепей порядка десятых долей нГн можно рассчитывать на диапазон измерения невязимности от 1%. Экспериментально выполнено наблюдение невязимности относительной величиной 3%.

Ключевые слова: невязимность, мера невязимности, некорректные задачи, короткоимпульсные сигналы, нелинейность.

Abstract. In the paper the methods and features of measuring the small nonreciprocity of objects is considered. Several variants of nonreciprocity characteristics are proposed and the variant with most noise immunity is selected. A method of normalizing the chosen nonreciprocity characteristic is considered. It is shown that the exposure of nonreciprocity depends on the probing signals. It is noted that the main factor that limiting the bottom bound of the nonreciprocity measurement range is the difference of the impedances of input and output networks. If a calibration is absent and if the difference between the inductance of the input and output networks is of few tenths of nH, then at a test impact duration of about 50 ps the bottom bound of the nonreciprocity

measurement range is of about 1%. The observation of nonreciprocity with a relative value of 3% has been performed experimentally.

Key words: nonreciprocity, nonreciprocity characteristic, ill-posed problems, short-pulse signals, nonlinearity.

Введение.

В последнее время наблюдается интерес к новым вариантам технического использования свойств невзаимности электрических цепей и сред [1]. В частности, наличие и степень невзаимности передаточных характеристик объекта [2, 3], позволит иметь дополнительные признаки объекта, по которым его можно обнаружить и классифицировать на фоне других объектов при решении задач дистанционного зондирования или диагностики. Интересно сочетать такие признаки, также, с наблюдением поляризационных характеристик [4], характеристик нелинейности преобразования сигналов объектом [5, 6]. По признаку невзаимности могут обнаруживаться, например, объекты (или конструкционные элементы объектов) с ферромагнитными свойствами или искусственно созданные объекты с полупроводниковыми элементами. Можно предположить, что совместный анализ нелинейных и невзаимных свойств позволит получить лучшую селективность по отношению к объектам и неоднородностям с определенными свойствами. Представляет интерес также сравнение чувствительности нелинейной и «невзаимной» локации при одинаковой пиковой мощности передатчика и чувствительности приемника.

Однако для проверки перечисленных предположений нужно иметь методический и аппаратный инструментарий измерения малых величин невзаимности, аналогичный инструментарию измерения нелинейности преобразования сигналов [7-9]. Проблема здесь в том, что невзаимность объектов в электрических цепях проявляется обычно в весьма сильной степени (например, обычный усилитель практически не передает сигнал с выхода на вход). Поэтому повода для разработки методов, которые были бы способны обнаруживать малые величины невзаимности практически не было.

Цель настоящей статьи – рассмотреть несколько характеристик невзаимности, основанных на ее определении, сравнить эти характеристики и оценить достижимую чувствительность по невзаимности на выбранных примерах компьютерных и физических моделей.

1. Определение и количественная мера невзаимности.

Наиболее общее определение взаимности дается в электромагнетизме: для взаимной системы взаимосвязь переменного тока и порожденного им электрического поля остается неизменной, если поменять местами точки, где протекает ток и наблюдается поле [10]. Для электрических цепей это условие формулируется относительно токов и напряжений: взаимосвязь тока в одной части цепи и вызванного им напряжения в другой части цепи остается неизменной, если поменять местами точку включения возбуждающего тока, и точку наблюдения напряжения [11].

Наиболее практичное определение взаимности получается, если от токов и напряжений (токов и электрических полей) перейти по известному правилу к падающим и отраженным волнам [12]. При этом для взаимной системы оказываются одинаковыми коэффициенты пропускания волны от одного порта к другому (S_{21}) и обратно (S_{12}).

Определение невзаимной системы, очевидно, во всех случаях дается как негативное – невзаимной является система, не являющаяся взаимной. В терминах матриц рассеяния это означает следующее условие:

$$S_{12} \neq S_{21}. \quad (1)$$

Неудовлетворение условию взаимности – бинарное обстоятельство; т.е. система не может быть более невзаимной или менее невзаимной в качественном отношении. Однако можно ввести количественную меру невзаимности. Отталкиваясь от (1), естественно определить такую меру как невязку $E(\omega)$ левой и правой частей (1):

$$E(\omega) = S_{12}(\omega) - S_{21}(\omega). \quad (2)$$

Вариант меры с отношением коэффициентов пропускания

$$E(\omega) = S_{12}(\omega)/S_{21}(\omega) \quad (3)$$

приводит, на самом деле, к соотношению, аналогичному (2). Действительно, на практике будет удобно оценивать отличие (3) от единицы:

$$E(\omega) = S_{12}(\omega)/S_{21}(\omega) - 1;$$

$$E(\omega) = [S_{12}(\omega) - S_{21}(\omega)]/S_{21}(\omega). \quad (4)$$

Реально в последнем выражении имеет смысл делить не на саму функцию $S_{21}(\omega)$, а на какую-либо ее норму (например, на модуль максимального коэффициента пропускания). Так что меры (2) и (4) отличаются только наличием/отсутствием нормирования, которое практически определяется удобством интерпретации результатов в конкретных экспериментах.

2. Некорректность задач по вычислению мер невзаимности. Модификации меры невзаимности для устранения некорректности.

Для дальнейшего анализа остановимся на мере невзаимности (2). Отметим, что невзаимный объект непременно должен содержать управляемые (нелинейные) элементы. В частном случае его свойства по отношению к внешним сигналам могут описываться и линейными соотношениями, но в общем случае это не так. Поэтому методически правильнее оперировать не коэффициентами рассеяния (параметрами линейной модели рассеивателя), а непосредственно тестовыми сигналами и откликами (падающими и отраженными волнами). Под таким углом зрения (2) будет иметь вид:

$$E(\omega) = U_1(\omega)/X_2(\omega) - U_2(\omega)/X_1(\omega). \quad (5)$$

где $X_1(\omega)$ и $X_2(\omega)$ – спектры падающих на первый и второй порты волн (тестовые сигналы), $U_2(\omega)$ и $U_1(\omega)$ – спектры откликов (прошедших волн) на сигналы $X_1(\omega)$ и $X_2(\omega)$ соответственно.

Вычисления по (5) относятся к числу некорректных математических задач. Действительно, в реальных системах зондирования и диагностики полоса спектра тестовых сигналов всегда ограничена, поэтому для некоторых частот в (5) будет выполняться деление на малые значения $X_{1,2}(\omega)$. Небольшие отклонения

в этих спектрах (например, вследствие шумов) будут приводить к большим отклонениям в вычисляемой мере невязки $E(\omega)$.

Сходная ситуация возникает при характеристике нелинейности преобразования широкополосных сигналов объектами [7]. Для данной ситуации известен прием устранения некорректности, который применительно к (5) будет состоять в домножении всех слагаемых на $X_1(\omega)$:

$$E(\omega)X_1(\omega) = U_1(\omega)X_1(\omega)/X_2(\omega) - U_2(\omega).$$

Переобозначив $E(\omega)X_1(\omega)$ как $E^*(\omega)$ получим новую меру невязки:

$$E^*(\omega) = U_1(\omega)X_1(\omega)/X_2(\omega) - U_2(\omega). \quad (6)$$

Некорректность в (6) устранена не в полной мере – в первом слагаемом деление на спектр $X_2(\omega)$ остается. Однако данная мера обладает перед (5) тем преимуществом, что характеристика невязки дается в виде невязки относительно наблюдаемого отклика на выходе системы $U_2(\omega)$. Такие результаты измерений проще интерпретировать при обработке (особенно при отображении сигналов во временной области).

Окончательно устранить некорректность вычислений в (6) можно, если домножить все слагаемые этого соотношения на $X_2(\omega)$:

$$E^*(\omega)X_2(\omega) = U_1(\omega)X_1(\omega) - U_2(\omega)X_2(\omega).$$

Обозначив в последнем соотношении $E^*(\omega)X_2(\omega)$ как $E^{**}(\omega)$, получим еще одну меру невязки:

$$E^{**}(\omega) = U_1(\omega)X_1(\omega) - U_2(\omega)X_2(\omega). \quad (7)$$

Во временной области данное соотношение будет иметь вид:

$$\varepsilon^{**}(t) = u_1(t)*x_1(t) - u_2(t)*x_2(t), \quad (8)$$

где * – символ свертки.

В (8) ни одно из слагаемых не соответствует по форме ни тестовым сигналам, ни откликам объекта, поэтому интерпретировать вычисленную таким образом меру невязки сложнее, чем (6). Взамен этого недостатка мы, однако, получаем то преимущество, что характеристика (8) будет иметь наилучшее среди рассмотренных характеристик отношение сигнал/шум при фиксированном отношении сигнал/шум в откликах объекта.

Далее в настоящей работе будем использовать меру невзаимности (8).

В отношении всех мер невзаимности, выраженных относительно тестовых сигналов и откликов, стоит сделать специальное уточнение. Исходящий из второго порта сигнал $u_2(t)$ следует понимать как отклик только на сигнал $x_1(t)$. Это означает, что тест сигналом $x_2(t)$ должен выполняться либо в другое время, либо должны быть предприняты меры по разделению отраженного от второго порта сигнала и сигнала, прошедшего с первого порта. Для простоты дальнейшего рассмотрения в данной работе будем считать, что тесты $x_1(t) \Rightarrow u_2(t)$ и $x_2(t) \Rightarrow u_1(t)$ выполняются последовательно.

3. Нормирование меры невзаимности. Слабая, сильная и «абсолютная» невзаимность.

Как уже отмечено, ни одно из слагаемых корректно вычисляемой меры невзаимности (8) не соответствует тестовому сигналу или отклику объекта. Но данная характеристика также может быть нормирована – к сигналу $u_2(t)*x_2(t)$. Конечно, нормировать следует к какой-либо норме сигнала $u_2(t)*x_2(t)$, например, к его амплитуде. В итоге получим нормированную меру невзаимности:

$$\varepsilon_n^{**}(t) = [u_1(t)*x_1(t) - u_2(t)*x_2(t)]/\max|u_2(t)*x_2(t)|. \quad (9)$$

Смысл такого нормирования в том, чтобы дать простую количественную оценку степени отличия свойств невзаимной системы от взаимной. Случай $\varepsilon_n^{**}(t) \equiv 0$ соответствует, очевидно, взаимной системе. При амплитуде $\varepsilon_n^{**}(t)$ много меньше единицы имеем случай слабой невзаимности. Если амплитуда $\varepsilon_n^{**}(t)$ меньше единицы, но уже сопоставима с ней (например, несколько десятых), то это случай сильной невзаимности.

Случай $\max|\varepsilon_n^{**}(t)| = 1$ является предельным в части невзаимности. В электрических цепях этому случаю соответствует идеальный вентиль. Для него отклик обратного направления передачи $u_1(t) \equiv 0$. Из чего в соответствии с (9)

следует единичная амплитуда $\varepsilon_n^{**}(t)$. В радиолокации объект с подобными свойствами называют «абсолютно невзаимным» [2].

4. Зависимость невзаимности от выбора тестовых сигналов. «Антивзаимность».

Также, как и нелинейность, невзаимность объектов может проявляться по-разному по отношению к разным сигналам. Например, если использовать в качестве $x_1(t)$ и $x_2(t)$ ступенчатые функции, то включенный на проход диод даст невзаимный четырехполюсник (в одном из направлений диод будет в прямом смещении, а в противоположном – в обратном). Однако ничто не мешает в качестве $x_2(t)$ использовать инвертированную ступенчатую функцию. В этом случае такой четырехполюсник будет взаимным – диод будет либо в прямом смещении, либо в обратном в обоих тестах.

Исследуемый объект довольно часто представляется в вышеупомянутом виде в задачах нелинейной локации. Поэтому при совместном тестировании нелинейности и невзаимности представляется важным выделить в отдельный класс объекты, невзаимность которых исчезает при определенном выборе пары тестовых сигналов. В частности, объекты, для которых мера (норма меры) невзаимности равна нулю при $x_2(t) = -x_1(t)$ представляется полезным обозначить как «антивзаимные».

5. Пример объекта для модельного и экспериментального исследования.

Для изучения применимости и свойств меры невзаимности (9) выберем объект, наличием и степенью невзаимности которого можно управлять. Поскольку в данной работе речь идет о проверке принципиальных свойств меры невзаимности, то для простоты исследования выберем объект с канализованной связью с ним (четырёхполюсник).

Хорошо подойдет в качестве такого четырехполюсника направленный ответвитель (НО), в одно из плеч которого включается либо линейная неоднородность, либо нелинейная (диод) (рис. 1). Волны разных направлений в такой структуре в разной степени взаимодействуют с диодом, что дает

невзаимные свойства. Дополнительным преимуществом такой цепи является то, что связь в НО может быть выбрана слабой, что даст малую величину невзаимности. Последнее позволит проверить свойства меры невзаимности (9) для случая малой невзаимности.

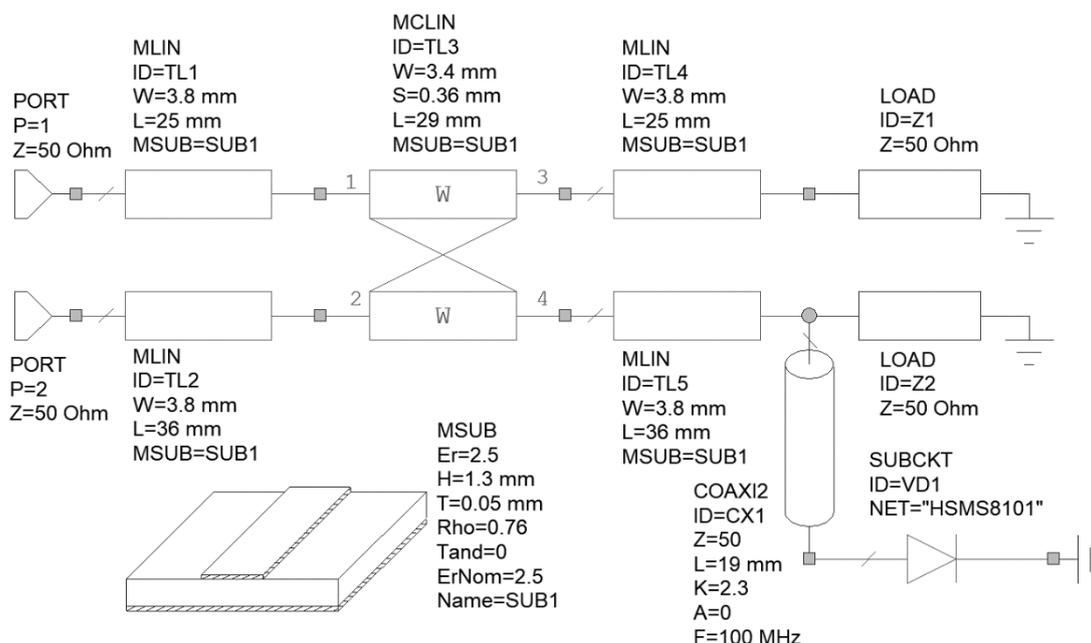


Рис. 1. Слабоневзаимный направленный ответвитель.

Направленный ответвитель взят готовый, производства Atten Electronics (модель AT-RF3030-04). Линии TL1-TL5 на рис. 1 образуют модель этого НО в САПР AWR Design Environment. К правым портам НО подключены терминальные нагрузки 50 Ом. Для случая невзаимной цепи к нижнему правому порту дополнительно подключается диод Шотки HSMS-8101 (через коаксиальный волновод CX1). Данный диод выбран в связи с его малой емкостью и малым напряжением открывания.

6. Определение меры невзаимности по компьютерной модели выбранного объекта.

В САПР AWR Design Environment была создана компьютерная модель направленного ответвителя (рис. 1) для двух случаев – с подключенным диодом VD1 и без него. В качестве тестового сигнала (падающая волна) использована

ступенчатая функция амплитудой 0.6 В и с длительностью фронта 50 пс (ступенчатые сигналы имеют преимущество в некоторых задачах рефлектометрии и дистанционного зондирования [13]).

На рис. 2 приведены прошедшие через слабонезвзаимный направленный ответвитель (с диодом) волны. Видно некоторое их различие (кривые 1 и 2). Кривая 3 изображает нормированную меру невязности, вычисленную по (9). Ее амплитуда составляет 6.6%. Замечательным обстоятельством является то, что при импульсном тестировании невязная часть отклика локализована во времени и далее может быть отдельно проанализирована и ассоциирована с определенными элементами сложного объекта.

Для сравнения на рис. 3 приведены волны, прошедшие через тот же направленный ответвитель, но без диода (взаимная цепь). Видно, что мера невязности тождественно равна нулю.

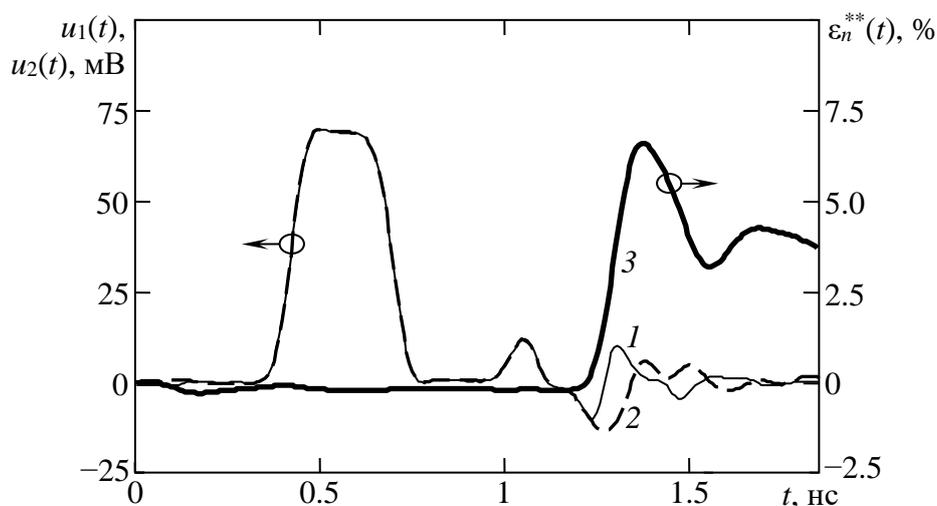


Рис. 2. Отклики слабонезвзаимного направленного ответвителя (модель): прошедшая волна $u_1(t)$ (кривая 1), прошедшая волна $u_2(t)$ (кривая 2) и нормированная мера невязности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (кривая 3).

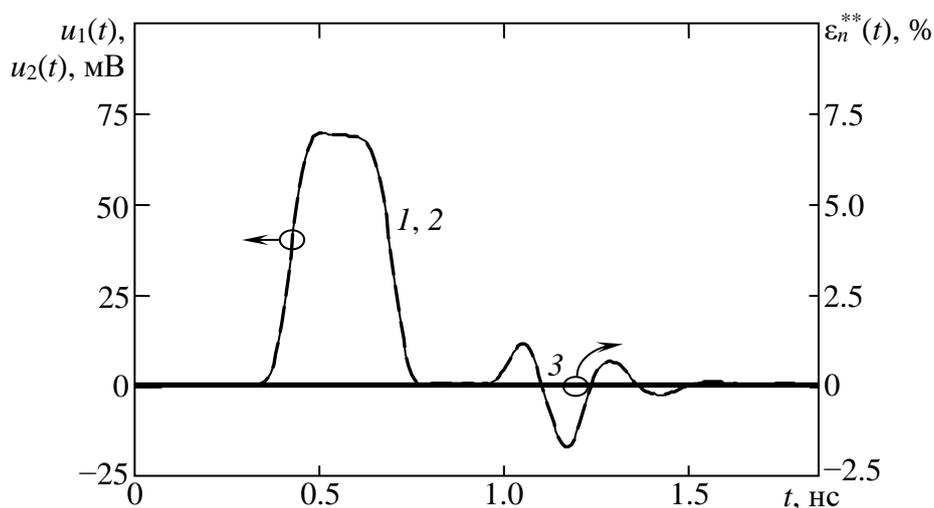


Рис. 3. Отклики взаимного направленного ответвителя (модель): прошедшая волна $u_1(t)$ (кривая 1), прошедшая волна $u_2(t)$ (кривая 2) и нормированная мера невязимности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (кривая 3).

7. Влияние разницы импедансов присоединительных цепей на порог обнаружения невязимности.

Когда порты объекта меняются местами, коэффициенты отражения по обоим портам объекта S_{11} и S_{22} должны оставаться неизменными. В противном случае общие потери по цепи $S_{11} \Rightarrow S_{21} \Rightarrow S_{22}$ станут отличными от потерь по цепи $S_{22} \Rightarrow S_{12} \Rightarrow S_{11}$ даже для взаимного объекта (при $S_{21} = S_{12}$). Коэффициент отражения определяется соотношением импедансов источника сигнала и нагрузки, поэтому требование неизменности, например, S_{11} при переключении портов означает, что импедансы обеих линий, подключаемых к первому порту, должны быть строго одинаковыми.

На рис. 4 показаны прошедшие через объект волны $u_1(t)$ (кривая 1) и $u_2(t)$ (кривая 2) для случая взаимного объекта (НО на рис. 1 без диода) при наличии во внутреннем сопротивлении источника сигнала индуктивности 1 нГн в дополнение к стандартному сопротивлению 50 Ом. Мера невязимности (кривая 3) при этом отлична от нуля и имеет амплитуду 0.9%.

Разницу индуктивностей присоединительных цепей в несколько десятых нГн следует расценивать как вполне возможную. Отсюда следует оценка, что порог обнаружения невязимности в рамках рассмотренной методики составит около 1%.

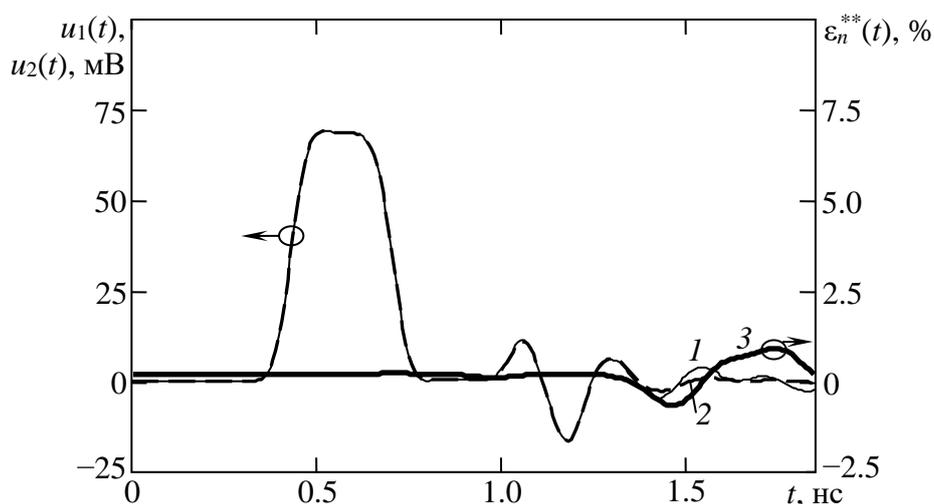


Рис. 4. Отклики взаимного направленного ответвителя (модель) при наличии во внутреннем сопротивлении источника сигнала индуктивности 1 нГн: прошедшая волна $u_1(t)$ (кривая 1), прошедшая волна $u_2(t)$ (кривая 2) и нормированная мера невзаимности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (кривая 3).

При необходимости наблюдения невзаимности величиной менее 1% потребуется калибровка, подобная используемой в векторных измерителях характеристик цепей (SOLT или аналогичная [14]).

8. Экспериментальное измерение меры невзаимности.

Для экспериментальных измерений использован генератор ступенчатых импульсов Pico Technology PG911 с длительностью фронта 50 пс. Амплитуда падающей волны установлена равной 0.6 В (как и на модели). Регистрация прошедших через объект волн выполнялась стробоскопическим осциллографом Pico Technology 9301-15 (полоса частот 15 ГГц, длительность фронта переходной характеристики 23 пс). Для исключения влияния на результаты измерений повторных отражений сигналов от выхода генератора и входа осциллографа, они были подключены к объекту измерения через коаксиальные кабели длиной 30 см. Удвоенное время запаздывания в таком кабеле составляет 3 нс, поэтому наблюдаемые на рис. 5 и 6 сигналы (на интервале времени около 2 нс) отражают только пропускание объектом первичной падающей волны (без повторных отражений).

На рис. 5 представлены результаты измерений для слабоневзаимного направленного ответвителя. Кривые 1 и 2 представляют, соответственно

прошедшие волны $u_1(t)$ и $u_2(t)$, кривая 3 – нормированную меру невязности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (формула (9)). Амплитуда меры невязности составляет 3.3%. Это вдвое меньше результата моделирования. Разница объясняется, вероятно, тем, что использована модель диода из справочного листка производителя (без адаптации под конкретный диод), а также погрешностями восстановления параметров направленного ответвителя. Отметим, что данное различие не имеет принципиального значения для целей настоящей работы.

На рис. 6 приведены результаты измерений для взаимного направленного ответвителя. Кривые имеют тот же смысл, что и на рис. 5. Амплитуда меры невязности не превышает 0.5%. Импульсный характер тестирования позволяет сделать вывод о том, что мы не наблюдаем признаков невязности по данной кривой, так как она не содержит локализованных экстремумов, превышающих средний уровень.

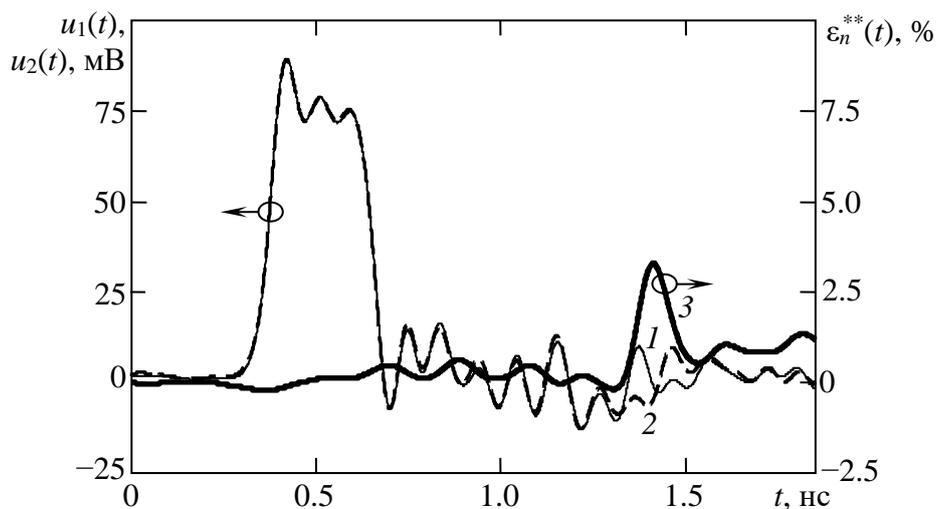


Рис. 5. Отклики слабонезвзаимного направленного ответвителя (эксперимент): прошедшая волна $u_1(t)$ (кривая 1), прошедшая волна $u_2(t)$ (кривая 2) и нормированная мера невязности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (кривая 3).

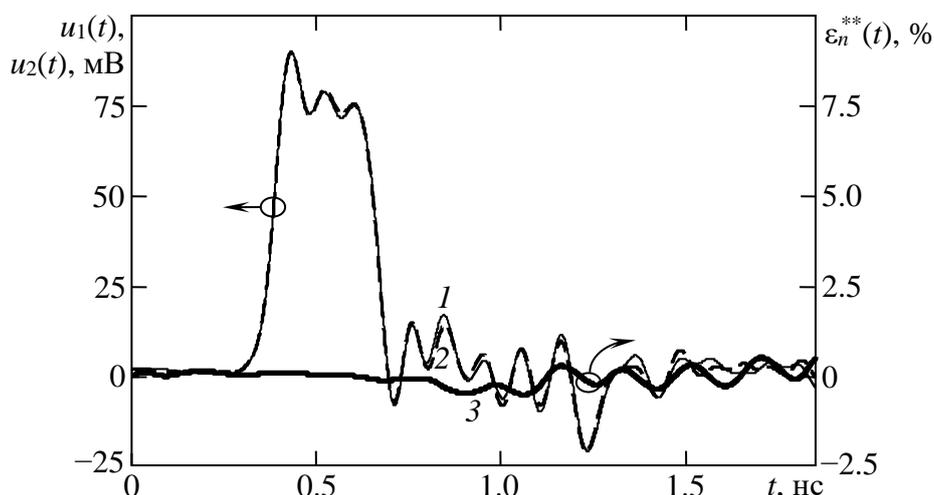


Рис. 6. Отклики взаимного направленного ответвителя (эксперимент): прошедшая волна $u_1(t)$ (кривая 1), прошедшая волна $u_2(t)$ (кривая 2) и нормированная мера невязности $\varepsilon_n^{**}(t)$ (кривая 3).

Наблюдаемое на рис. 6 отличие меры невязности от нуля обусловлено погрешностями измерения. Эта погрешность носит систематический характер и связана, как мы полагаем, с различием импедансов присоединительных цепей.

Заключение.

Наблюдение невязности может быть использовано для получения дополнительных классификационных признаков объектов, в том числе в сочетании с наблюдением нелинейного отклика. В то же время методический и аппаратный инструментарий измерения малых величин невязности в литературе к настоящему времени практически не отражен.

Определение меры невязности как разности коэффициентов пропускания объекта в двух направлениях приводит к некорректной математической задаче. Исключить некорректность можно за счет свертки каждого слагаемого в таком выражении с зондирующими сигналами. Практически это дает улучшение отношения сигнал/шум в мере невязности.

Рассмотренная мера невязности допускает естественный способ нормирования, который позволяет по результатам измерения различать слабую, сильную и «абсолютную» невязность.

Проявление невязности зависит от зондирующего сигнала (формы, полярности, амплитуды). Например, некоторые системы, будучи невязными в

общем случае, демонстрируют взаимные свойства по отношению к паре противофазных тестовых сигналов («антивзаимность»).

Основным фактором, ограничивающим диапазон измерения невзаимности снизу, является асимметрия импеданса внешних цепей, подводящих тестовый сигнал и регистрирующих отклик объекта. В частности, для длительности тестовых сигналов около 50 пс асимметрия индуктивности присоединительных цепей в несколько десятых нГн дает нижнюю границу диапазона измерения невзаимности порядка 1%. Для расширения диапазона измерения вниз понадобится использование калибровки (SOLT или подобной). Для дистанционного зондирования данной ситуации соответствует разница условий отражения от объекта по двум связям с ним.

С использованием предложенной меры невзаимности экспериментально наблюдалась невзаимность объекта относительной величиной 3% без применения калибровки при длительности фронта зондирующего сигнала 50 пс. Экспериментально подтверждено также основное свойство меры невзаимности обращаться в ноль для взаимной цепи.

Финансирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEWM-20200039 от 01.03.2020).

Литература

1. Сычев А.Н., Малютин Н.Д. Современные устройства, антенны и отражатели с невзаимными свойствами (обзор). *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>
2. Khlusov V., Ligthart L., Sharygin G. Detection of objects with non-reciprocal properties by polarization radar. *Proceedings of First European Radar Conference (EURAD)*. Amsterdam, Netherlands. Published by Horizon House Publications Ltd. 2004. P.69-72.

3. Karnychev V., Lighthart L., Khlusov V., Sharygin G. Determination of polarization invariants of asymmetric scattering matrix. *Proceedings of 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*. Gdansk, Poland. 2002. P.572-575. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2002.1017912>
4. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами. *Труды Центральной аэрологической обсерватории*. 1959. Т.30. С.39-55.
5. Patent USA No. 3631484. Augenblick H.A. *Harmonic Detection System*. Application Date: 30.07.1969. Publication Date: 28.12.1971. IPC7 G 01 S 13/58.
6. Штейншлейгер В.Б. К теории рассеяния электромагнитных волн вибратором с нелинейным контактом. *Радиотехника и электроника*. 1978. Т.23. №7. С.1329-1338.
7. Семенов Э.В., Семенов А.В. Использование разности сверток тестовых сигналов и откликов объекта для исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов. *Радиотехника и электроника*. 2007. Т.52. №4. С.480-485. <https://doi.org/10.1134/S1064226907040109>
8. Семенов 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.
9. Семенов Э.В. Сопоставление методов сверхширокополосной нелинейной локации, использующих один и несколько зондирующих импульсов. *Труды XXIII Всеросс. симп. «Радиолокационное исследование природных сред»*. Санкт-Петербург. 2005. Т.5. С.305-310.
10. Lorentz H.A. Het theorema van Poynting over de energie in het electromagnetisch veld en een paar algemeene stellingen over de voortplanting van het licht. *Verlagen der Afdeeling Natuurkunde van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen*. 1895. V.4. P.176-187.
11. Guillemin E.A. *Introductory Circuit Theory*. New York, John Wiley & Sons. 1953. 550 p.

12. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. *Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп.* Москва, Советское радио. 1971. 388 с.
13. Semyonov E.V., Kosteletskiy V. Comparative Analysis of Step and Pulse Signals as a Test-Signals for Nonlinear Sensing of the Semiconductor Objects. *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Astana, Kazakhstan, 2017. Published by S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University. 2017. 4 p. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998537>
14. Ferrero A., Sanpietro F., Pisani U. Multiport Vector Network Analyzer Calibration: *A General Formulation. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1994. V.42. №12. P.2455-2461. <https://doi.org/10.1109/22.339781>

Для цитирования:

Семенов Э.В., Малютин Н.Д. Измерение малой невязимности объектов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.4>