

Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение

М. А. Назаров^{1,2}✉, Э. В. Семенов^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, Томск, Россия

✉ mnaz90@mail.ru

Аннотация

Введение. Распространенная система параметров, включающая точки компрессии и точки пересечения для различных гармоник, непригодна для устройств, работающих при видеоимпульсных воздействиях (например, до модулятора в передатчике, после демодулятора в приемнике). Ранее авторами разработаны простые модели в виде нелинейных рекурсивных фильтров, дающие удовлетворительную погрешность описания отклика широкого класса видеоимпульсных цепей. Система нелинейных функций таких моделей может рассматриваться как новая система характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных цепей, для чего необходимо разработать метод, обеспечивающий их измерение с допустимой погрешностью. В общей постановке эта задача весьма сложна, поэтому в настоящей статье рассмотрен лишь нелинейный рекурсивный фильтр первого порядка. Полученные зависимости, тем не менее, дают удовлетворительные результаты для устройств без выброса на плоской вершине переходной характеристики.

Цель работы. Рассмотреть способ измерения характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных устройств без выброса на плоской вершине переходной характеристики.

Материалы и методы. Рассмотренный рекурсивный фильтр представлен эквивалентной схемой из нелинейных резистивного и емкостного элементов. Поэтому задача сводится к измерению их вольт-амперной характеристики (ВАХ) и кулон-вольтовой характеристики. ВАХ измеряется на плоских вершинах переходных характеристик устройства. Имея определенную ВАХ, получаем возможность вычислить ток (и далее заряд) емкостного элемента. Экспериментальное исследование выполнено на примере трехкаскадного усилителя с апериодической переходной характеристикой.

Результаты. Переходные характеристики фильтра аппроксимированы моделью с точностью не хуже 3.2 %.

Заключение. Рассмотренная система функций может быть получена с определяемой и удовлетворительной для практики погрешностью, что позволяет ее рассматривать как новую систему параметров нелинейных видеоимпульсных устройств.

Ключевые слова: нелинейные поведенческие модели, видеоимпульсные сигналы, вольт-амперная характеристика, кулон-вольтовая характеристика, нелинейные искажения

Для цитирования: Назаров М. А., Семенов Э. В. Минималистичная система характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерение // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 123–132. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-123-132

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00605.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; принята к публикации после рецензирования 14.08.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Minimalistic System of Characteristics of Non-linear Baseband Pulse Devices and Its Measurement

Maxim A. Nazarov^{1,2}✉, Edward V. Semyonov^{1,2}

¹Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ mnaz90@mail.ru

Abstract

Introduction. The general system of parameters, including compression points and intersection points of various harmonics, is unsuitable for devices operating under the influence of baseband pulses (for example, before the modulator in the transmitter, after the demodulator in the receiver). Previously, the authors have developed simple models in the form of nonlinear recursive filters, which give a satisfactory error in describing the response of a wide class of baseband pulse circuits. The system of nonlinear functions of such models can be considered as a new system of characteristics of nonlinear-dynamical baseband impulse circuits, for which it is necessary to develop a method that ensures their measurement with an acceptable error. In the general formulation, this problem is rather challenging; therefore, this article considers only a first-order nonlinear recursive filter. However, the obtained result gives satisfactory results for devices without flat top transient overshoot.

Aim. To consider a method for measuring the characteristics of nonlinear-dynamical baseband impulse devices without overshoot on the flat top of the transient response.

Materials and methods. The considered recursive filter is represented by an equivalent circuit consist of nonlinear resistive and capacitive elements. Therefore, the task is reduced to measuring their current-voltage characteristics (IV) and charge-voltage characteristics (CVC). IV characteristics are measured at the flat tops of the transient characteristics of the device. Having a certain IV, we obtain the opportunity to calculate the current (and then the charge) of the capacitive element. The experimental study was carried out on the example of a three-stage amplifier with an aperiodic transient response.

Results. The transient characteristics of the filter are approximated by the model with an accuracy of no worse than 3.2 %.

Conclusion. The considered system of functions can be obtained with a definable error that satisfactory for practice, which allows it to be considered as a new system of parameters for nonlinear baseband pulse devices.

Keywords: nonlinear behavioral models, baseband pulse signals, current-voltage characteristic, charge-voltage characteristic, nonlinear distortions

For citation: Nazarov M. A., Semyonov E. V. Minimalistic System of Characteristics of Non-linear Baseband Pulse Devices and Its Measurement. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 123–132. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-123-132

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-29-00605.

Submitted 12.05.2023; accepted 14.08.2023; published online 28.09.2023

Введение. Видеоимпульсные сигналы получили широкое распространение в системах связи, цифровых каналах передачи информации, а также в системах измерений. Определение характеристик устройств, обеспечивающих передачу и обработку видеоимпульсных сигналов, является важной задачей при их проектировании.

Указанные системы, в общем случае, содер-

жат нелинейные каскады. Это требует рассмотрения всей системы как нелинейной. Известны 2 подхода к описанию нелинейных устройств [1–3]: использование моделей в виде принципиальных схем и поведенческих моделей устройств. Модели на основе принципиальных схем требуют знания характеристик отдельно взятых электронных компонентов, из которых

состоит устройство. Точность моделирования ограничена качеством моделей активных компонентов, из которых состоит устройство.

Поведенческие модели устанавливают связь между выходом и входом устройства, не требуя знания внутренней структуры устройства. Примером описания устройства на основе поведенческой модели служит модель полигармонических искажений [4–7]. Указанные модели позволяют описывать поведение устройств, работающих при воздействии узкополосными сигналами, но не подходят для описания реакции на импульсные сигналы, имеющие сплошной спектр.

При видеоимпульсных воздействиях адекватны модели, основанные на ряде Вольтерры–Винера. При практической реализации они приводят к полиномам относительно текущего и предыдущих значений входного сигнала [8]. Из-за отсутствия рекурсивных связей в таких моделях требуется большое количество характеристических функций, что весьма затрудняет их практическое применение. В частности, усложняется решение обратной задачи – нахождение параметров модели по ограниченному числу измерений ее характеристик [9]. При большом порядке модели задача становится плохо обусловленной, а решение – неоднозначным, что делает невозможным вычисление погрешности определения характеристических функций полученного решения. Указанное обстоятельство не позволяет рассматривать систему функций в моделях Вольтерры–Винера как собственную систему характеристик нелинейно-инерционных видеоимпульсных цепей аналогично моделям полигармонических искажений (X -параметрам).

Ранее авторами настоящей статьи разработаны модели в виде многопетлевых рекурсивных фильтров с интеграторами в цепях обратной связи. Указанные модели полностью описываются 2–5 нелинейными функциями [10, 11]. Задача описания процессов в таких моделях существенно упрощается по сравнению с трансверсальными фильтрами (без обратных связей). Однако для моделей второго и третьего порядка часть функций по-прежнему характеризует внутреннюю динамику фильтра, недоступную непосредственному наблюдению. В результате харак-

теристики определяются рекурсивным или итерационным методом [10, 11], что весьма затрудняет нахождение погрешности их определения.

В настоящей статье рассмотрено ограниченно моделью нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка, который, тем не менее, удовлетворительно представляет отклики нелинейно-инерционных устройств (усилителей, аналого-цифровых преобразователей и т. д.) без выброса на плоской вершине переходной характеристики. В виде эквивалентной схемы указанный фильтр представляется цепью из нелинейных резистивного и емкостного элементов. Таким образом, задача сводится к измерению вольт-амперной характеристики (ВАХ) и кулон-вольтовой характеристики (КВХ) этих элементов. Напряжения, приложенные к указанным элементам, доступны наблюдению, поэтому задачу нахождения характеристик этих элементов предложено рассматривать как косвенные измерения с определяемой погрешностью.

Цель настоящей статьи – рассмотреть метод измерения характеристических функций нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка, позволяющий определять погрешность измерения.

Используемая нелинейно-инерционная модель устройств. Нелинейные резистивный и емкостный элементы, представляющие используемую модель в виде эквивалентной схемы, могут быть соединены по-разному. Наиболее простой для анализа и интерпретации представляется цепь, состоящая из емкостного и электропроводного элементов [6]. Для такой цепи входным параметром является протекающий через нее ток, а откликом – падение напряжения на ней. Если в анализируемом устройстве входным сигналом является напряжение падающей волны, оно пересчитывается во входной ток согласно выражению

$$i_{\text{in}}(t) = u_{\text{in}}(t)/\rho,$$

где $i_{\text{in}}(t)$, $u_{\text{in}}(t)$ – сила тока и напряжение падающей волны соответственно; ρ – волновое сопротивление подводящей линии.

Функциональная схема используемой нелинейно-инерционной модели рекурсивного фильтра первого порядка приведена на рис. 1, а

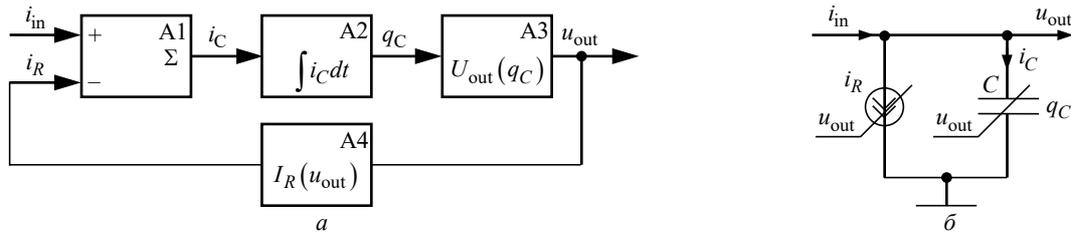


Рис. 1. Функциональная схема нелинейного рекурсивного фильтра первого порядка (а) и его эквивалентная схема (б)
 Fig. 1. Functional diagram of a nonlinear first order recursive filter (a) and its equivalent circuit (b)

[10]. Характеристическими функциями модели являются ВАХ $I_R(u_{out})$ и КВХ $U_{out}(q_C)$.

Эквивалентная схема модели указанного рекурсивного фильтра представлена на рис. 1, б. Во входном узле эквивалентной схемы из входного тока i_{in} ответвляется ток проводимости i_R . Оставшийся ток представляет собой емкостный ток i_C . Указанное преобразование токов отображается на функциональной схеме (рис. 1, а) блоком А1. Интегрированию, представленному на функциональной схеме блоком А2, соответствует заряд конденсатора C эквивалентной схемы, в результате которого возникает заряд q_C . Преобразование заряда в выходное напряжение (узел А3 функциональной схемы) соответствует конденсатору C (рис. 1, б), напряжение на котором нелинейно зависит от заряда. Поданное по цепи обратной связи выходное напряжение поступает на узел А4, который соответствует нелинейному источнику тока i_R на эквивалентной схеме и позволяет рассчитать силу тока проводимости.

Математически модель реализуется совокупностью рекурсивных формул:

$$\begin{aligned} i_C(j) &= i_{in}(j) - i_R(j-1); \\ q_C(j) &= q_C(j-1) + \Delta t [i_C(j) + i_C(j-1)]/2; \\ u_{out}(j) &= U_{out}[q_C(j)]; \\ i_R(j) &= I_R[u_{out}(j)], \end{aligned} \quad (1)$$

где j – номер точки в дискретизированном сигнале; Δt – интервал дискретизации; i_C – ток через конденсатор; i_R – ток через резистор; q_C – заряд конденсатора; u_{out} – выходное напряжение.

Измерение характеристик устройства в рамках нелинейной рекурсивной модели первого порядка. Нелинейные ВАХ и КВХ определяются по результатам экспериментальных измерений. Известно [10, 11, 15], что для получения характеристики нелинейно-инерционных устройств необходимо рассмотреть реакцию на ступенчатые функции разной амплитуды.

Ступенчатый ток i_{in} различной силы (рис. 2, а) задается на входе цепи измерительным генератором. Осцилляции на плоской вершине этих функций являются отклонением от идеальной ступенчатой функции, однако на

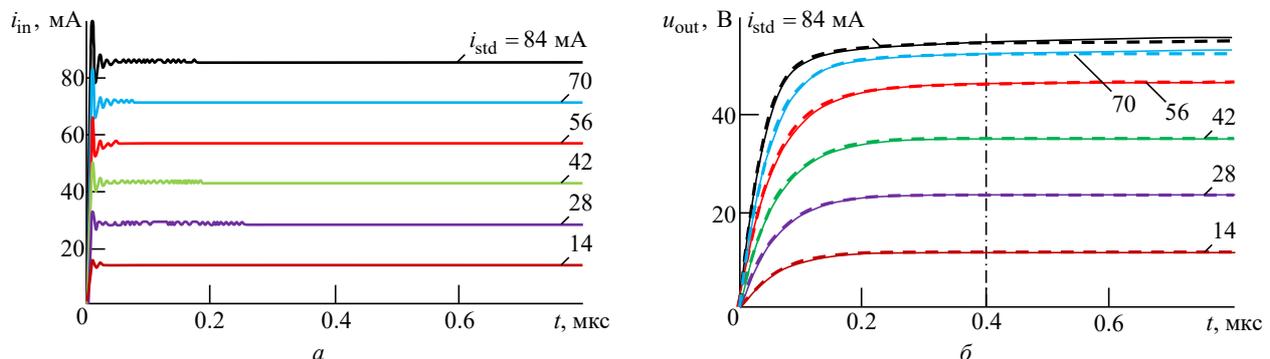


Рис. 2. Семейства входных токов (а) и выходных напряжений (б) для установившихся значений входного тока i_{std} : измеренные (сплошные кривые) и рассчитанные по модели (штриховые кривые). Штрихпунктирная линия – момент стробирования напряжения

Fig. 2. Families of input currents (a) and output voltages (b) for steady input currents i_{std} : measured (solid curve) and calculated by the model (dashed curve). The dash-dotted line is the moment of voltage strobing

результаты измерений существенно не влияют, так как период этих осцилляций (13 нс) много меньше длительности регистрируемой переходной характеристики (200 нс). Отклик цепи первого порядка (рис. 1) на ступенчатый ток имеет экспоненциальный вид с выходом на плоскую вершину (рис. 2, б). Строблируя выходное напряжение на плоских вершинах семейства переходных характеристик, определяем ВАХ резистора $I_R(u_{out})$ для всего семейства входных токов и выходных напряжений. Описанный подход соответствует известному методу импульсного измерения ВАХ [12].

Далее измеряется КВХ объекта. Поскольку воздействие является видеоимпульсным, нужно применять квазистатические методы определения реакции емкостного элемента [13]. Однако непосредственно эти методы в данном случае неприменимы, поскольку параллельно току через емкостный элемент протекает ток электропроводности (через резистор).

Из рис. 1, б и (1) следует, что входной ток i_{in} является суммой тока проводимости и емкостного тока. Семейство токов проводимости $i_R(t)$ определим из зарегистрированного выходного напряжения $u_{out}(t)$ с использованием измеренной ВАХ: $i_R(t) = I_R[u_{out}(t)]$. Емкостный ток $i_C(t)$ определим как разность входного тока и тока проводимости (рис. 3, а):

$$i_C(t) = i_{in}(t) - i_R(t). \quad (2)$$

Интегрированием емкостного тока по времени определяем заряд конденсатора $q_C(t)$

(рис. 3, б). Если модель, представленная на рис. 1, адекватна действительным свойствам объекта измерения, заряд конденсатора должен монотонно увеличиваться с выходом на плоскую вершину. Строблируя заряд и напряжение на плоских вершинах переходных характеристик, определим КВХ $U_{out}(q_C)$. Наблюдаемый на рис. 3, б спад после достижения максимума обусловлен зарядом диффузионных емкостей элементов устройства, не укладываемых в модель первого порядка.

Критерии выбора точки стробирования при измерении характеристик. Входящий в состав модели, представленной на рис. 1, конденсатор безынерционен в том смысле, что установление на нем некоторого напряжения означает формирование заряда конденсатора, определяемого КВХ $U_{out}(q_C)$, без задержки. В реальных объектах измерения накопление энергии, моделируемое емкостным элементом, может сопровождаться задержкой, например при накоплении и релаксации диффузионного заряда при ограниченной скорости диффузии носителей заряда. В результате на вершинах переходных характеристик объекта наблюдается медленное увеличение напряжения, которое не может быть учтено в рамках модели на рис. 1. При этом данный эффект носит нелинейный характер и в большей степени наблюдается при больших сигналах.

Чтобы сохранить удовлетворительное качество моделирования, следует выбирать отсчеты на переходных характеристиках (стробировать) там, где влияние дополнительной инерционности объекта минимально, т. е. сразу после достижения установившегося значения. Однако

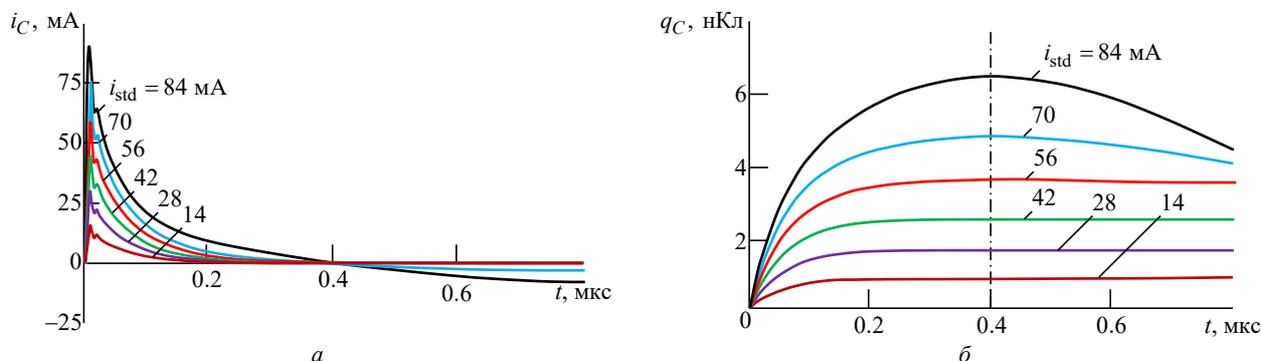


Рис. 3. Семейства емкостных токов (а) и заряда конденсатора (б). Штрихпунктирная линия – момент времени стробирования заряда

Fig. 3. Families of capacitive currents (a) and capacitive charge (b). The dash-dotted line is the moment of voltage strobing

при этом уменьшается диапазон охватываемых значений напряжения и заряда, т. е. сужается диапазон измерения ВАХ и КВХ объекта.

Экспериментальные измерения. В качестве объекта измерения выбран трехкаскадный усилитель (рис. 4).

Входные ступенчатые сигналы формировались генератором сигналов произвольной формы National Instruments PXI-5422. Время нарастания выходного напряжения указанного генератора не превышает 4.8 нс. Переходные характеристики регистрировались аналого-цифровым преобразователем National Instruments PXI-5114 с длительностью переходной характеристики не более 3.5 нс. Указанные параметры не вносят существенных погрешностей в измерение переходных характеристик, поскольку ожидаемое время нарастания выходного напряжения выбранного усилителя составляет несколько сотен наносекунд.

На вход усилителя подавалось семейство токов (см. рис. 2, а) и измерялось семейство откликов по напряжению (см. рис. 2, б, сплошные кривые). Напряжение на выходе усилителя зависит как от входного воздействия, так и от коэффициента усиления и не превышает 60 В. Далее вычислено семейство емкостных токов (см. рис. 3, а) и соответствующее им семейство зарядов (см. рис. 3, б). В соответствии с изложенным методом определены ВАХ (рис. 5, а) и КВХ (рис. 5, б) в точке стробирования, установленной со смещением 0.4 мкс от начала переходного процесса. К этому моменту быстрая часть переходного процесса (для которой модель по рис. 1 адекватна) заканчивается и остается медленное увеличение выходного напряжения, обусловленное зарядом диффузионных емкостей транзисторов.

Проверим рассмотренную модель и метод измерения ее характеристик. Установим в модели (см. рис. 1, а) измеренные ВАХ и КВХ и подадим на ее вход семейство ступенчатых

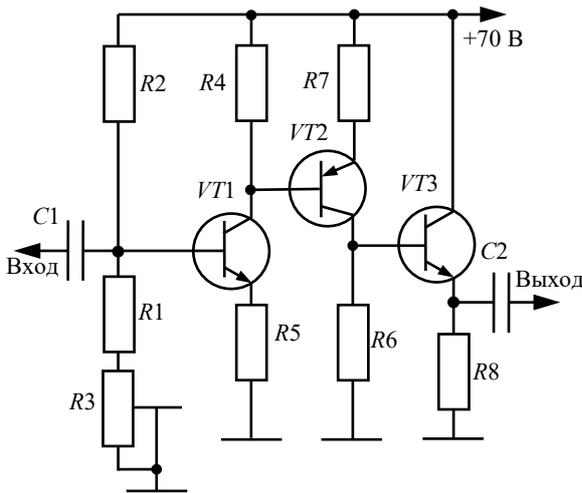


Рис. 4. Принципиальная схема импульсного усилителя мощности

Обозн.	Номинал	Обозн.	Тип
R1	560 Ом	VT1	BD 139-16
R2	51 кОм	VT2	BD 140-16
R3	1 кОм	VT3	BD 139-16
R4	240 Ом		
R5	240 Ом		
R6	1.1 кОм		
R7	120 Ом		
R8	750 Ом		
C1	0.1 мкФ		
C2	47 мкФ		

Fig. 4. Schematic diagram of a switching power amplifier

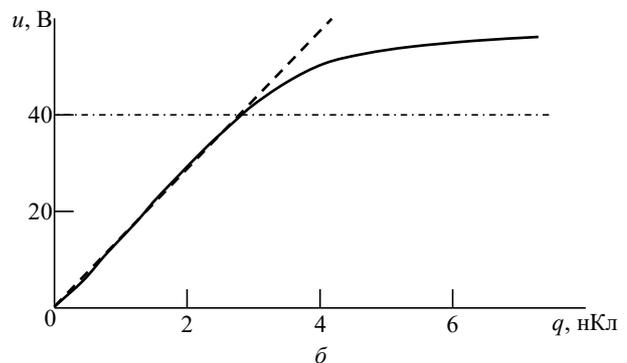
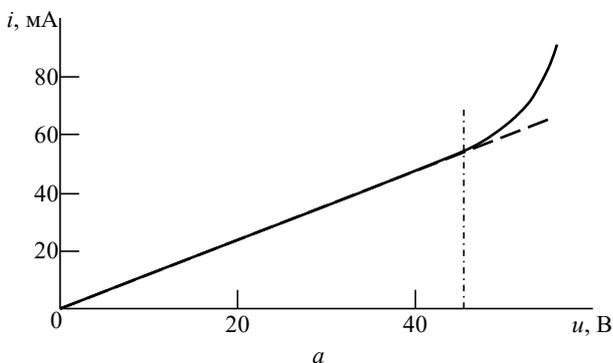


Рис. 5. Вольт-амперная (а) и кулон-вольтовая (б) характеристики. Штриховые линии – линейризация функций. Штрихпунктирные линии – напряжение, начиная с которого характеристики становятся нелинейными

Fig. 5. Current-voltage (а) and charge-voltage (б) characteristics. Dashed lines – the functions linearization. Dashed-dotted lines – the voltage at which the characteristics become nonlinear

функций токов, представленное на рис. 2, а. Отклики модели на это семейство изображены на рис. 2, б штриховыми кривыми. Относительная погрешность между измеренными переходными характеристиками и характеристиками, рассчитанными по модели, составила не более 3.2 %. Для поведенческих моделей это типичный и удовлетворительный результат [10, 11].

Из рис. 5, а и б видно, что с ростом напряжения рассматриваемые характеристики отклоняются от прямой, поскольку усилитель входит в режим насыщения и нелинейные искажения проявляются в большей степени.

Из сравнения рис. 5, а и б следует, что отклонения КВХ от прямой начинаются раньше (при 40 В), чем отклонения ВАХ (при 45 В). Это свидетельствует о том, что нелинейные искажения сигнала на фронте импульса начинаются раньше, чем на плоской вершине. Другими словами, динамическая нелинейность в усилителе превалирует над статической (кроме области выраженного насыщения усилителя).

Оценка погрешности измерения характеристик устройства. Измерения ВАХ и КВХ являются косвенными. Погрешность их измерения определяется погрешностью измерения переходных характеристик.

Инструментальная погрешность измерения переходных характеристик определяется погрешностями генератора ступенчатых функций и регистрирующего устройства.

Генератор ступенчатых функций National Instruments PXI-5422 обладает как статической (на плоской вершине импульса), так и динамической (в пределах переходного процесса) погрешностями воспроизведения сигнала. Поскольку длительность фронта ступенчатой функции (4.8 нс) пренебрежимо мала по сравнению с длительностью переходной характеристики рассматриваемого усилителя (около 150 нс), динамической погрешностью генератора можно пренебречь. Статическая погрешность генератора определяется его амплитудной характеристикой (АХ) и выражается в трех аспектах: смещение АХ по амплитуде, погрешность наклона АХ и ее нелинейность. Смещение по амплитуде и погрешность наклона устраняются при калибровке и далее не учитываются. Нелинейность АХ генератора не превышает

0.3 %. Поскольку генератор задает входной ток устройства, нелинейность его АХ определяет погрешность измерения ВАХ по току.

Динамическую погрешность (в пределах переходного процесса) регистрирующего устройства (National Instruments PXI-5114) также можно не учитывать, поскольку длительность фронта его переходной характеристики не превышает 2.8 нс. Статическая погрешность регистрирующего устройства содержит те же 3 составляющие, что и для генератора. Аналогично рассмотренному для генератора, после калибровки остается только погрешность, связанная с нелинейностью АХ. Нелинейность регистрирующего устройства National Instruments PXI-5114 была оценена в [14] и составляет 0.3 %. Поскольку регистрирующее устройство фиксирует напряжение на выходе объекта измерения, указанную погрешность можно рассматривать как погрешность измерения ВАХ по напряжению.

Погрешность измерения КВХ по напряжению получается аналогично погрешности измерения ВАХ. Погрешность измерения заряда определяется исходя из того, что заряд является интегральной функцией тока $i_C(t)$ через конденсатор модели. Этот ток определяется по (2), поэтому погрешность его измерения зависит от погрешностей установки входного тока $i_{in}(t)$ и погрешности измерения тока проводимости $i_R(t)$. Погрешность установки $i_{in}(t)$, задаваемого генератором, как указывалось, составляет 0.3 %. Предел погрешности для $i_R(t)$ определяется погрешностью измерения u_{out} (0.3 %) и максимальной крутизной ВАХ. На максимально крутом участке ВАХ изменение напряжения на 0.3 % дает изменение тока на 1.6 %. Поскольку максимальные значения токов i_{in} и i_R примерно равны, для отыскания погрешности измерения i_C можно просуммировать относительные погрешности для i_{in} и i_R . В итоге предел погрешности измерения i_C составляет 1.9 %. Погрешность измерения заряда, получаемого интегрированием $i_C(t)$, будет в среднем меньше 1.9 %, поскольку максимальная погрешность наблюдается только в

отдельные моменты времени. Однако эту оценку (1.9 %) можно принять в качестве верхнего предела погрешности измерения q_C .

Заключение. Предложен минималистичный вариант характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств. Это характеристики, входящие в качестве нелинейных функций в описание рекурсивного фильтра первого порядка, моделирующего устройство.

Для упрощения интерпретации работы фильтра ему сопоставлена эквивалентная схема из параллельно соединенных емкостного и резистивного элементов с нелинейными свойствами. Входным параметром выбранной модели является ток через RC -цепь, а выходным – напряжение на ней. В итоге характеристическими функциями модели являются ВАХ и КВХ. При необходимости анализа устройств, для которых входным параметром является напряжение, последнее пересчитывается во входной ток с учетом волнового сопротивления подводящей линии.

Показано, что характеристические функции использованной модели могут быть определены со степенью метрологической определенности, позволяющей отнести данную операцию к измерениям с оцениваемой погрешностью. Метод измерения включает регистрацию семейства переходных характеристик объекта измерения при разных амплитудах входного воздействия. ВАХ определяется на плоском участке

этого семейства. КВХ определяется на плоской вершине заряда конденсатора, который находится интегрированием тока через него.

Показано, что точку стробирования для измерения нелинейных характеристик модели следует выбирать на участке, где влияние дополнительной инерционности объекта измерения минимально, т. е. сразу после окончания участка быстрого изменения переходных характеристик.

Метод измерения характеристик объекта проиллюстрирован на примере трехкаскадного импульсного усилителя мощности. Несмотря на то, что усилитель содержит 6 нелинейных емкостей и 6 нелинейных проводимостей, его системные характеристики удовлетворительно описаны предложенной моделью. Относительная погрешность аппроксимации переходных характеристик рассмотренного усилителя по модели не превышает 3.2 %.

Для конкретных числовых параметров входного воздействия определены погрешности измерения характеристик усилителя. Рассмотренная методика позволяет выполнить аналогичный расчет для произвольных уровней входного воздействия при заданной инструментальной погрешности измерения. Погрешность измерения тока и напряжения по характеристикам усилителя не превышает 0.3 %, а погрешность измерения заряда 1.9 %.

Список литературы

1. Nonlinear system and subsystem modeling in the domain / M. I. Sobhy, E. A. Hosny, M. W. R. Ng, E. A. Bakkar // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, iss. 12. P. 2571–2579. doi: 10.1109/22.554605
2. Pedro J. C., Maas S. A. A comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, iss. 4. P. 1150–1163. doi: 10.1109/TMTT.2005.845723
3. Systematic behavioral modeling of nonlinear microwave/RF circuits in the time domain using techniques from nonlinear dynamical systems / D. E. Root, J. Wood, N. Tuffillaro, D. Schreurs, A. Pekker // Proc. of the IEEE Intern. Workshop on Behavioral Modeling and Simulation. Santa Rosa, 08 Oct. 2002. P. 71–74. doi: 10.1109/BMAS.2002.1291060
4. Broadband poly-harmonic distortion (PHD) behavioral models from fast automated simulations and large-signal vectorial network measurements / D. E. Root, J. Verspecht, D. Sharrit, J. Wood, A. Cognata // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, iss. 11. P. 3656–3664. doi: 10.1109/TMTT.2005.855728
5. Qi H., Benedikt J., Tasker P. A novel approach for effective import of nonlinear device characteristics into CAD for large signal power amplifier design // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, San Francisco, 11–16 June 2006. P. 477–480. doi: 10.1109/MWSYM.2006.249596
6. A novel measurement based method enabling rapid extraction of a rf waveform look-up table based behavioral model / S. Woodington, T. Williams, H. Qi, D. Williams, L. Pattison, A. Patterson, J. Lees, J. Benedikt, P. J. Tasker // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. Atlanta, 15–20 June 2008. P. 1453–1456. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4633053

7. Amini A.-R., Boumaiza S. Time-invariant behavioral modeling for harmonic balance simulation based on waveform shape maps // IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Ottawa, 11–14 Aug. 2015. Acc. № 15805288. doi: 10.1109/NEMO.2015.7415098

8. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers / D. R. Morgan, Z. Ma., J. Kim, M. G. Zierdt, J. Pastalan // IEEE Trans. on Signal Processing. 2006. Vol. 54, iss. 10. P. 3852–3860. doi: 10.1109/TSP.2006.879264

9. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation / Soc. ind. appl. math. 2005. 354 p. doi: 10.1137/1.9780898717921

10. Semyonov E. V. Simple behavioral model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021. Vol. 68, iss. 6. P. 2192–2196. doi: 10.1109/TCSII.2020.3048819

11. Semyonov E. V. Synthesis of behavioral models for circuits with nonlinearity less than model error // IEEE Trans. on Circuits and Systems II:

Express Briefs. 2023. Vol. 70, iss. 6. P. 2216–2220. doi: 10.1109/TCSII.2022.3231873

12. Ultra-short pulse current–voltage characterization of the intrinsic characteristics of high- κ devices / C. D. Young, Y. Zhao, M. Pendley, B. H. Lee, K. Matthews, J. H. Sim, R. Choi, G. A. Brown, R. W. Murto, G. Bersuker // Japanese J. of Applied Physics. 2005. Vol. 44, № 4S. P. 2437–2440. doi: 10.1143/JJAP.44.2437

13. Kuhn M. A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13, № 6. P. 873–885. URL: https://homepages.rpi.edu/~sawyes/quasi_static_CV.pdf (дата обращения 04.05.2023)

14. Назаров М. А., Семенов Э. В. Анализ нелинейно-инерционных свойств устройств оцифровки с использованием их модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра // Докл. ТУСУР. 2022. Т. 25, № 4. С. 110–114.

15. Singleton H. E. Theory of nonlinear transducers // MIT. Research Lab. of electronics. Tech. rep. № 100. 1950. 52 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4896/RLE-TR-160-04722817.pdf> (дата обращения 30.04.2023)

Информация об авторах

Назаров Максим Андреевич – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, младший научный сотрудник кафедры радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – сверхкороткоимпульсные и сверхширокополосные нелинейные измерения. Адрес: ИСЭ СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия
E-mail: mnaz90@mail.ru

Семенов Эдуард Валерьевич – доктор технических наук (2012), доцент (2009), старший научный сотрудник Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, профессор кафедры радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – синтез нелинейных моделей элементов и устройств для импульсных режимов; измерение нелинейных искажений сложных сигналов; диагностические и локационные системы с использованием нелинейного отклика на импульсные воздействия. Адрес: ИСЭ СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия
E-mail: edwardsemyonov@narod.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>

References

1. Sobhy M. I., Hosny E. A., Ng M. W. R., Bakkar E. A. Nonlinear System and Subsystem Modeling in the Domain. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1996, vol. 44, iss. 12, pp. 2571–2579. doi: 10.1109/22.554605

2. Pedro J. C., Maas S. A. A Comparative Overview of Microwave and Wireless Power-Amplifier Behavioral Modeling Approaches. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, iss. 4, pp. 1150–1163. doi: 10.1109/TMTT.2005.845723

3. Root D. E., Wood J., Tuffillaro N., Schreurs D., Pekker A. Systematic Behavioral Modeling of Nonlinear Microwave/RF Circuits in the Time Domain Using Techniques from Nonlinear Dynamical Systems. Proc. of the 2002 IEEE Intern. Workshop on Behavioral

Modeling and Simulation, Santa Rosa, 08 Oct, 2002, pp. 71–74. doi: 10.1109/BMAS.2002.1291060

4. Root D. E., Verspecht J., Sharrit D., Wood J., Cognata A. Broadband Poly-Harmonic Distortion (PHD) Behavioral Models from Fast Automated Simulations and Large-Signal Vectorial Network Measurements. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, iss. 11, pp. 3656–3664. doi: 10.1109/TMTT.2005.855728

5. Qi H., Benedikt J., Tasker P. A Novel Approach for Effective Import of Nonlinear Device Characteristics into CAD for Large Signal Power Amplifier Design. IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, San Francisco, 11–16 June 2006, pp. 477–480. doi: 10.1109/MWSYM.2006.249596

6. Woodington S., Williams T., Qi H., Williams D., Pattison L., Patterson A., Lees J., Benedikt J., Tasker P. J. A Novel Measurement Based Method Enabling Rapid Extraction of a RF Waveform Look-Up Table Based Behavioral Model. 2008 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Atlanta, 15–20 June 2008, pp. 1453–1456. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4633053

7. Amini A. R., Boumaiza S. Time-Invariant Behavioral Modeling for Harmonic Balance Simulation Based on Waveform Shape Maps. 2015 IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Ottawa, 11–14 Aug. 2015, Acc. no. 15805288. doi: 10.1109/NEMO.2015.7415098

8. Morgan D. R., Ma. Z., Kim J., Zierdt M. G., Pastalan J. A generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers. IEEE Trans. on Signal Processing. 2006, vol. 54, iss. 10, pp. 3852–3860. doi: 10.1109/TSP.2006.879264

9. Tarantola A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Soc. ind. appl. math. 2005, 354 p. doi: 10.1137/1.9780898717921

10. Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of Baseband Pulse Devices in the Form of a Second-Order Nonlinear Recursive Filter. IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021, vol. 68, iss. 6, pp. 2192–2196. doi: 10.1109/TCSII.2020.3048819

11. Semyonov E. V. Synthesis of Behavioral Models for Circuits with Nonlinearity Less Than Model Error. IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2023, vol. 70, iss. 6, pp. 2216–2220. doi: 10.1109/TCSII.2022.3231873

12. Young C. D., Zhao Y., Pendley M., Lee B. H., Matthews K., Sim J. H., Choi R., Brown G. A., Murto R. W., Bersuker G. Ultra-Short Pulse Current–Voltage Characterization of the Intrinsic Characteristics of High- κ Devices. Japanese J. of Applied Physics. 2005, vol. 44, no. 4S, pp. 2437–2440. doi: 10.1143/JJAP.44.2437

13. Kuhn M. A Quasi-Static Technique for MOS C-V and Surface State Measurements. Solid-State Electronics. 1970, vol. 13, no. 6, pp. 873–885. Available at: https://homepages.rpi.edu/~sawyses/quasi_static_CV.pdf (accessed 04.05.2023)

14. Nazarov M. A., Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of a Recording Device Using a Second-Order Non-Linear Recursive Filter. Proc. of TUSUR University. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 110–114. (In Russ.)

15. Singleton H. E. Theory of Nonlinear Transducers. MIT. Research Lab. of electronics. Tech. rep. № 100. 1950, 52 p. Available at: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4896/RLE-TR-160-04722817.pdf> (accessed 30.04.2023)

Information about the authors

Maxim A. Nazarov – junior researcher of Institute of High Current Electronics SBRAS, junior researcher of the Department of Radioelectronics and Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: ultra-short pulse and ultra-wideband non-linear measurements.

Address: IHCESBRAS, 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

Email: mnaz90@mail.ru

Edward V. Semyonov – Dr Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor (2009), Senior Researcher of Institute of High Current Electronics SBRAS, Professor of the Department of Radioelectronics and Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: synthesis of nonlinear models for elements and devices at pulse impacts; measurement of nonlinear distortions of complex signals; diagnostic and radar systems with analysis of nonlinear response to pulse impacts.

Address: IHCESBRAS, 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

E-mail: edwardsemyonov@narod.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>
