

УДК 621.317/619

М.А. Назаров, Э.В. Семенов

Анализ нелинейно-инерционных свойств устройств оцифровки с использованием их модели в виде нелинейного рекурсивного фильтра

Рассмотрен метод анализа нелинейно-инерционных свойств устройств регистрации (аналого-цифрового преобразования) сигналов. Метод включает построение модели устройства оцифровки в виде нелинейного рекурсивного фильтра ограниченного порядка (второго-третьего). Две-четыре нелинейные функции в такой модели предлагается рассматривать как характеристики нелинейности устройства. Указано на влияние этих характеристик на разные части переходной характеристики устройства. Для выбранного примера (цифрового осциллографа) показано, что нелинейность собственно квантующего узла осциллографа имеет бессистемный характер, но мала на фоне относительно гладких искажений в аналоговом тракте осциллографа.

Ключевые слова: нелинейный фильтр, сверхширокополосный импульсный сигнал, нелинейные искажения, поведенческая модель, безынерционная нелинейность, реактивная нелинейность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-110-114

Устройства оцифровки сигналов являются одним из ключевых компонентов многих радиосистем. В ряде случаев важными являются нелинейные искажения в таких устройствах (для систем связи со сложными сигналами или для систем диагностики и зондирования с анализом нелинейного отклика объектов [1, 2]). Например, при обнаружении нелинейных объектов в задачах сверхкороткоимпульсной сверхширокополосной нелинейной локации [3] необходимо учитывать нелинейные искажения сигналов приемником (устройством оцифровки). Характеризации нелинейно-инерционных свойств систем для произвольных воздействий посвящен ряд работ, например [4–6], однако до сих пор ни одно из решений не воспринято инженерами для практического использования [7].

В работе [8] предложен метод анализа нелинейных искажений произвольных сигналов устройством с разделением этих искажений на составляющие за счет применения простой поведенческой нелинейной модели системы. Показано, что каждая из вневременных характеристических функций этой модели определяет нелинейные искажения в отдельных частях переходного процесса системы. Мы полагаем, что далее семейство характеристических функций модели [8] можно использовать непосредственно для исчерпывающей характеристики нелинейных искажений различных устройств.

В настоящей статье демонстрируется возможность использования семейства характеристик нелинейного рекурсивного фильтра, используемого в качестве поведенческой модели устройства, для исчерпывающей характеристики нелинейности устройства оцифровки (аналого-цифрового преобразования) сигнала.

Пример анализируемого устройства оцифровки

На практике в различных задачах широко используются устройства оцифровки с полосой 100...150 МГц, разрядностью 8 бит и чувстви-

тельностью около 10 мВ. В качестве примера выберем типичное устройство со схожими параметрами: осциллограф National Instruments PXI-5114 [9]. По заявлениям производителя данное регистрирующее устройство имеет полосу пропускания 125 МГц, длительность фронта переходной характеристики не более 2,8 нс, коэффициент нелинейных искажений –58 дБ (0,13%).

Построение параметризованной модели устройства

Нелинейная модель устройства показана на рис. 1. Модель представляет собой нелинейный рекурсивный фильтр второго порядка. Расчет выходного напряжения по заданному входному току определяется выражениями (2)–(7) в [7].

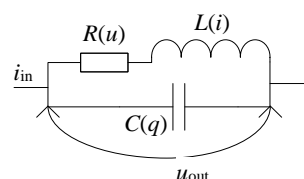


Рис. 1. Нелинейная модель регистрирующего устройства National Instruments PXI-5114

В данной модели нелинейная ампер-вольтовая характеристика $u(i)$ соответствует амплитудной характеристике устройства и оказывает влияние после окончания переходного процесса (на плоской вершине переходной характеристики). Нелинейная кулон-вольтовая характеристика $u(q)$ определяет крутизну фронта переходной характеристики устройства и оказывает влияние в начале переходного процесса, а нелинейная вебер-амперная характеристика $i(\psi)$ влияет на величину и форму выброса перерегулирования переходной характеристики.

Определим нелинейные функции $u(i)$, $u(q)$, $i(\psi)$ данной цепи для семейства переходных характеристик моделируемого устройства. Семейство переходных характеристик было измерено (рис. 2) при подаче сигнала с генератора PicoSource PG 911 [10] с

длительностью фронта не более 60 пс, что значительно меньше времени нарастания напряжения канала регистрирующего устройства (около 2,8 нс).

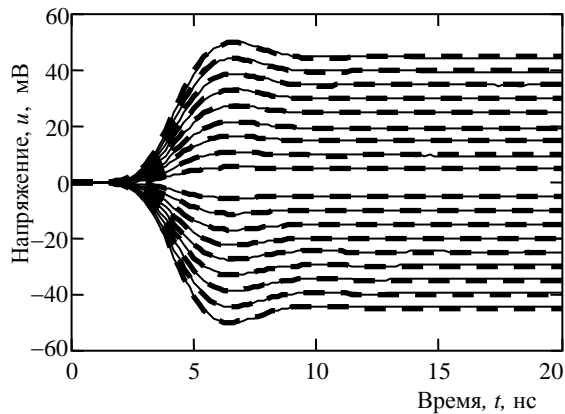


Рис. 2. Семейство переходных характеристик NI PXI-5114: измеренные (сплошные кривые), рассчитанные по нелинейной модели (пунктирные кривые)

Для определения искажений на плоской вершине переходной характеристики (безынерционные искажения) измерим ампер-вольтовую характеристику $u(i)$ канала регистрирующего устройства. Поскольку коэффициент нелинейных искажений канала регистрирующего устройства мал и составляет около 0,13% [9], то для измерения амплитудной характеристики необходимо использовать цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с нелинейностью, на порядок меньшей нелинейности канала регистрирующего устройства. В качестве ЦАП был выбран чип Asahi Kasei AK4490. Нелинейность ЦАП с буферными усилителями составляет не более 0,0015% [11], что на два порядка меньше нелинейности канала регистрирующего устройства. ЦАП выдавал ступенчатый сигнал с длительностью ступеньки 62,5 мкс, что значительно больше времени переходных процессов для генератора и в канале регистрирующего устройства. Ступеньки генерировались для 20 значений напряжений в диапазоне напряжений от -50 до +50 мВ (для диапазона 0,1 В канала регистрирующего устройства National Instruments PXI-5114), а значение точки стробирования выбиралось в момент времени 60 мкс от начала каждой ступеньки.

Результат измерения $u(i)$ представлен на рис. 3. Ожидаемая нелинейность моделируемого устройства мала, поэтому нелинейность функций $u(i)$, $u(q)$, $i(\psi)$ будет неразличима глазом. Для целей графического отображения на рисунках усилим нелинейность характеристических функций (в K раз) согласно выражению

$$y^*(x) = y_0(x) + K[y(x) - y_0(x)], \quad (1)$$

где $y(x)$ – одна из функций $u(i)$, $u(q)$, $i(\psi)$; $y_0(x)$ – линеаризация соответствующей характеристической функции; $y^*(x)$ – функция с усиленной нелинейностью. Для всех характеристик примем $K = 15$.

Из рис. 3 видно, что нелинейность ампер-вольтовой характеристики (статическая нелиней-

ность) незначительна даже с усиленной на графике нелинейностью (далее будет показано, что нелинейность функций $u(q)$, $i(\psi)$ в несколько раз превышает нелинейность функции $u(i)$). Поэтому далее функцию $u(i)$ будем считать линейной. Линейность функции $u(i)$ означает, что резистор в рекурсивном фильтре (см. рис. 1) также линеен.

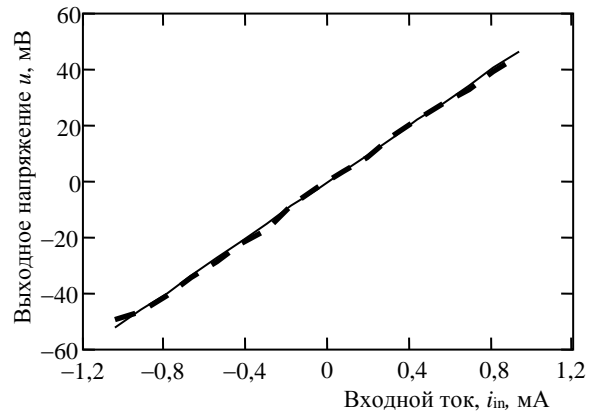


Рис. 3. Линеаризованная ампер-вольтовая характеристика канала NI PXI-5114 (сплошная кривая) и измеренная кривая с усиленной нелинейностью (пунктирная кривая)

Нелинейно-инерционные искажения определяются экстрагированными функциями $u(q)$ и $i(\psi)$. Определим данные функции из семейства измеренных переходных характеристик (см. рис. 2).

Из рис. 2 видно, что фронт переходной характеристики в начальный момент времени имеет экспоненциальный характер. Для уменьшения невязки измеренного и смоделированного сигналов будем подавать на вход модели единичный скачок, сглаженный фильтром Гаусса с постоянной времени 1,2 нс.

Определение характеристик $u(q)$ и $i(\psi)$ проводится в соответствии с рекурсивным алгоритмом, изложенным в [7]. Переходная характеристика с минимальной амплитудой (около 5 мВ) считается малосигнальной. Линейная емкость и индуктивность $C_0 = q/u$ и $L_0 = \psi/i$ для этой кривой определяются вариационным методом для достижения наилучшего соответствия измеренной и смоделированной переходных характеристик. Для следующей переходной характеристики C_1 и L_1 определяются также погрешностью ее моделирования, но в таблице значений C и L остаются также и предыдущие значения, определяющие нелинейность кривых $u(q)$ и $i(\psi)$. Интерполяция между значениями в таблицах выполняется кубическим сплайном.

Экстрагированные функции $u(q)$ и $i(\psi)$ показаны на рис. 4 и 5 (с усилением нелинейности в 15 раз по выражению (1)).

Сопротивление этого резистора равно входному сопротивлению регистрирующего устройства (50 Ом), поскольку он определяет преобразование входного напряжения устройства во входной ток модели.

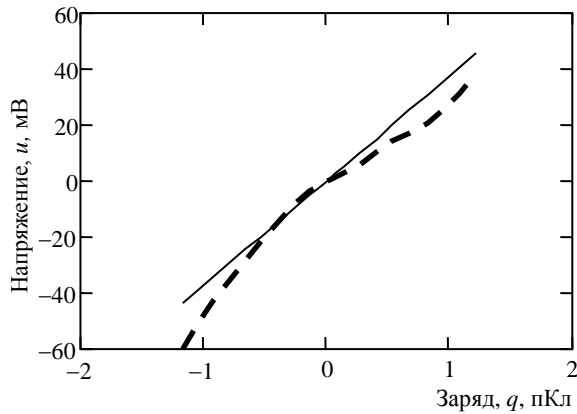


Рис. 4. Линеаризованная кулон-вольтовая характеристика канала NI PXI-5114 (сплошная кривая) и измеренная кривая с усиленной нелинейностью (пунктирная кривая)

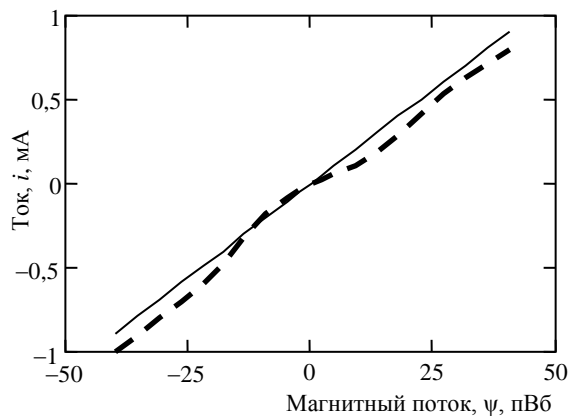


Рис. 5. Линеаризованная вебер-амперная характеристика канала NI PXI-5114 (сплошная кривая) и измеренная кривая с усиленной нелинейностью (пунктирная кривая)

Оценка качества моделирования нелинейных искажений сигналов

Особую важность для нелинейно-инерционных моделей имеет качество отображения ими нелинейных искажений сигналов. В качестве метода оценки нелинейных искажений будем использовать метод сравнения реального отклика объекта на тестовый

сигнал и отклика линеаризованной модели объекта на этот же сигнал [12–16]. Характеристика нелинейности по данному методу для измеренных переходных характеристик определяется выражением в [12]

$$\varepsilon(t) = u_{\text{out}}(t) - F^{-1} \left(\frac{F[u_{\text{out}0}(t)]}{F[i_{\text{in}0}(t)]} \right) * i_{\text{in}}(t), \quad (2)$$

где F^{-1} и F – обратное и прямое преобразование Фурье соответственно; $i_{\text{in}0}(t)$ и $u_{\text{out}0}(t)$ – тестовый сигнал (ток) малой амплитуды и отклик объекта малой амплитуды (напряжение) на него соответственно (0,1 мА и 5 мВ в нашем случае); * – символ свертки; $\varepsilon(t)$ – характеристика нелинейности при тестовом токе $i_{\text{in}}(t)$ и отклике напряжения $u_{\text{out}}(t)$ на этот ток.

Вычислим характеристику нелинейности для каждой измеренной переходной характеристики, используя выражение (2). На рис. 6, а приведено семейство характеристик нелинейности, нормированных к верхнему пределу измерения регистрирующего устройства (50 мВ). На рис. 6, б приведены характеристики нелинейности, вычисленные аналогичным образом по смоделированным переходным характеристикам.

Из сопоставления рис. 6, а и б видно, что характеристики нелинейности по результатам измерения и моделирования имеют одинаковые минимальные и максимальные величины (в пределах $-2 \dots 1\%$), а отображающие их поверхности близки по форме. Таким образом, можно утверждать, что полученная модель адекватно отражает нелинейные искажения регистрирующего устройства National Instruments PXI-5114.

Анализ характеристик нелинейности устройства оцифровки

Анализ кривых на рис. 3–5 показывает следующее. Статическая нелинейность устройства носит бессистемный характер и мала (0,34%) относительно искажений внутри переходного процесса. Если устройство оцифровки используется для регистрации импульсных сигналов, то этой нелинейностью можно пренебречь без заметного ухудшения качества характеристики общей нелинейности.

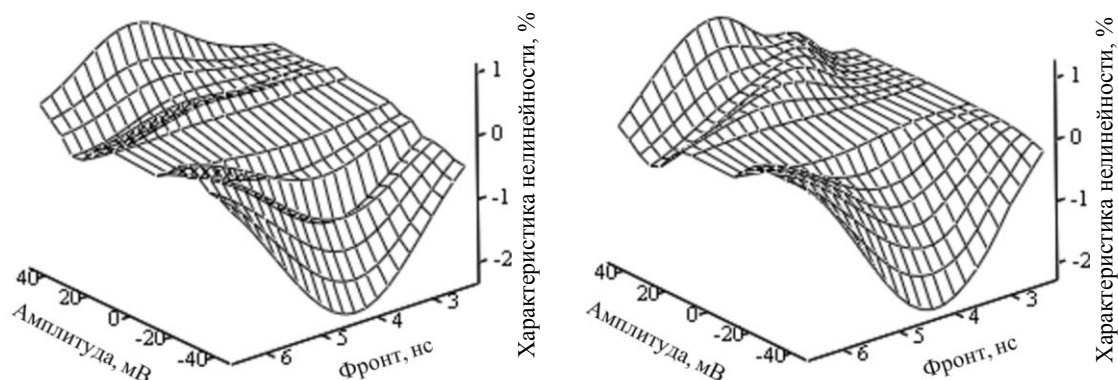


Рис. 6. Поверхности распределения характеристики нелинейности ε для фронта (в %) в зависимости от амплитуды переходной характеристики ($-50 \dots 50$ мВ) на фронте (2,3...6,5 нс) по модели – а, по измеренным переходным характеристикам – б

Наибольший вклад (до 2,2%) в общую нелинейность вносят нелинейности емкостей входного буфера (усилителя) устройства оцифровки (кулон-вольтовая характеристика на рис. 4). Эта нелинейность относительно гладкая (не связана с матрицей аналого-цифрового преобразователя) и имеет четные составляющие нелинейности (несимметричная схема буфера).

Нелинейность обратных связей (вебер-амперная характеристика на рис. 5) имеет уровень до 0,8% и сказывается в окрестности выброса на переходной характеристике устройства.

Заключение

В работе проанализированы нелинейно-инерционные свойства типичного устройства регистрации сигналов с полосой 125 МГц. Для этого синтезирована его модель в виде нелинейного рекурсивного фильтра. Исходя из измеренной переходной характеристики (единственный выброс на плоской вершине без провала), оказалось достаточно модели второго порядка.

Три вневременные характеристики полученной модели исчерпывающим образом характеризуют нелинейно-инерционные свойства устройства: ампер-вольтовая характеристика отражает нелинейность на плоской вершине, кулон-вольтовая – на фронте сигнала, а вебер-амперная – нелинейность выброса на плоской вершине.

Установлено, что указанная производителем нелинейность может быть ассоциирована только со статической нелинейностью устройства (нелинейность матрицы АЦП, десятые доли процента). Нелинейность на фронтах сигналов оказывается на порядок больше и обусловлена искажениями в аналоговом входном буфере.

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

Литература

1. Байкалова А.Е. Увеличение динамического диапазона приемной системы нелинейного видеоимпульсного локалатора / А.Е. Байкалова, Э.В. Семенов // Прикладные аспекты СВЧ-техники: матер. 32-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: СевГУ, 2022. – Вып. 4. – С. 241–242.
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. «Центральное конструкторское бюро автоматики». – Омск, 2008. – С. 174–177.
3. Авдеев В.Б. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация / В.Б. Авдеев, А.В. Бердышев, С.Н. Панычев // Телекоммуникации. – 2006. – № 8. – С. 23–27.
4. Лабутин С.А. Оценивание и коррекция динамических искажений сигналов на основе нелинейных моделей средств измерений // Измерительная техника. Метрология. – 1986. – № 12. – С. 22–29.
5. Ланнэ А.А. Синтез нелинейных систем. Нерекурсивные системы, детерминированный случай // Электронное моделирование. – 1980. – № 1. – С. 60–68.

6. Лабутин С.А. Коррекция нелинейно-инерционных искажений импульсных сигналов в измерительных преобразователях // Техника средств связи. Сер.: Радиоизмерительная техника. – 1989. – Вып. 1. – С. 9–15.

7. Semyonov E.V. Simple Behavioral Model of Baseband Pulse Devices in the Form of a Second-Order Nonlinear Recursive Filter // IEEE Transactions on circuits and systems-ii: express briefs. – 2021. – Vol. 68, No. 6. – P. 2192–2196.

8. Семенов Э.В. Анализ состава нелинейных искажений при видеоимпульсных воздействиях с применением поведенческих нелинейных моделей электрических цепей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 29–39.

9. PXI-5114 Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pxi-5114-specs/page/specs.html#>, свободный (дата обращения: 01.11.2022).

10. PicoSource® PG900 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picosource-pg900-series-data-sheet.pdf>, свободный (дата обращения: 01.11.2022).

11. TEAC NT-503 Owner's manual. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://teac.jp/downloads/products/teac/NT-503/NT-503_OM_EFS_vE.pdf, свободный (дата обращения: 01.11.2022).

12. Semyonov E.V. Using the difference between convolutions of test signals and responses of the object to study the nonlinearity of the conversion of ultra-wideband signals / E.V. Semyonov, A.V. Semyonov // Radio engineering and electronics. – 2007. – Vol. 52, No. 4. – P. 480–485 (in Russ.).

13. Semyonov E. Measurements of the nonlinearity of the ultra wideband signals transformation / E. Semyonov, A. Loschilov // Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 3–16. DOI: 10.5772/16867.

14. Иванов И.Ф. О едином методе измерения нелинейности импульсных устройств / И.Ф. Иванов, В.С. Трофимов // Радиотехника. – 1963. – Т. 18, № 2. – С. 52–60.

15. The IM microscope: a new approach to nonlinear analysis of signals in satellite communications system / D.S. Arnstein, X.T. Vuong, C.B. Cotner, H.M. Daryanani // COMSAT Technical Review. – 1992. – Vol. 22, No 1. – P. 93–123 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.artellc.com/wp-content/uploads/T3-3-White-Paper-XTV-Spring-1992-IM-Microscope.pdf>, свободный (дата обращения: 09.11.2022).

16. Calculating passive intermodulation products with IM Microscope method / W. Haining, L. Jiangang, W. Jiqin, Z Chenxin // J. of Air Force Engineering University: Natural Science Edition. – 2005. – Vol. 6, No 3. – P. 47–49 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kjgcdx.ijournal.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20050314, свободный (дата обращения: 09.11.2022).

Назаров Максим Андреевич

М.н.с. каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 41-33-65
Эл. почта: mnaz90@mail.ru

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ПСС ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0001-5470-1185

Тел.: (382-2) 41-33-65

Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Nazarov M.A., Semyonov E.V.

Simple behavioral model of a recording device using a second-order non-linear recursive filter

A method to analyze the non-linear-inertial properties of devices for recording (analog-to-digital conversion) of signals is considered. The method includes a building of a model of a digitizing device in the form of a nonlinear recursive filter of a limited order (second or third). Two or four non-linear functions in such a model are proposed to be considered as characteristics of the non-linearity of the device. The influence of these characteristics on different parts of the transient response of the device is indicated. For the selected example (digital oscilloscope), it is shown that the nonlinearity of the oscilloscope quantizing unit itself has an unsystematic character, but is small against the background of relatively smooth distortions in the analog path of the oscilloscope.

Keywords: non-linear filter, ultra-wideband pulse signal, non-linear distortions, behavioral model, inertial non-linearity, reactive non-linearity.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-110-114

References

1. Baikalova E.V., Semyonov E.V. Uvelichenie dinamicheskogo diapazona priemnoj sistemy nelinejnogo videoimpul'snogo lokatora [Increasing the dynamic range of the receiving system of a nonlinear video pulse locator]. *Prilozheniya SVCH-tehniki. Materialy 32 Mezhdunarodnoj konferencii «SVCH tehnika i telekommunikacionnye tehnologii»* [Applied Aspects of Microwave Engineering: Proceedings of the 32nd International Conference]. Sevastopol, SevGU Publ., 2022, vol. 4, pp. 241–242 (in Russ.).
2. Semyonov E.V., Malyutin N.D., Loschilov A.G. *Programno-apparatnyj kompleks dlya issledovaniya nelinejnosti preobrazovaniya videoimpul'snyh signalov sverhshirokopolosnymi priemnikami* [Hardware-software complex for studying the nonlinearity of video-pulse signal conversion by ultra-wideband receivers]. *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverhshirokopolosnyh RES. Materialy II nauch.-tekh. konferencii* [Exchange of experience in the field of creation of ultra-wideband radio-electronic means. Proceedings of the II science and engineering conferences]. Omsk, 2008, pp. 174–177 (in Russ.).
3. Avdeev V.B. [Ultra-short-pulse ultra-wideband non-linear radar] / V.B. Avdeev, A.V. Berdyshev, S.N. Panychev. *Telecommunications*, 2006, no. 8, pp. 23–27 (in Russ.).
4. Labutin S.A. [Estimation and correction of dynamic signal distortions based on nonlinear models of measuring instruments]. *Measuring technology. Metrology*, 1986, no. 12, pp. 22–29 (in Russ.).
5. Lanne A.A. [Synthesis of nonlinear systems. Non-recursive systems, deterministic case]. *Electronic Modeling*, 1980, no. 1, pp. 60–68 (in Russ.).
6. Labutin S.A.. [Correction of non-linear-inertial distortions of pulse signals in measuring transducers]. *Communication Technology. Series Radio Measuring Equipment*, 1989, vol. 1, pp. 9–15 (in Russ.).
7. Semyonov E.V. Simple Behavioral Model of Baseband Pulse Devices in the Form of a Second-Order Nonlinear Recursive Filter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 2021, vol. 68, no. 6, pp. 2192–2196.
8. Semyonov E.V. [Analysis of the Composition of Non-linear Distortions under Video Impulse Effects Using Behavioral Nonlinear Models of Electrical Circuits]. *Izvestia Universities of Russia. Radioelectronics*, 2022, no. 1, pp. 29–39 (in Russ.).
9. PXI-5114 Specification. Available at: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pxi-5114-specs/page/specs.html#> (Accessed: November 01, 2022).
10. PicoSource® PG900 Series. Available at: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picosource-pg900-series-data-sheet.pdf> (Accessed: November 01, 2022).
11. TEAC NT-503 Owner's manual. Available at: https://teac.jp/downloads/products/teac/NT-503/NT-503_OM_EFS_vE.pdf (Accessed: November 01, 2022).
12. Semyonov E.V. Using the difference between convolutions of test signals and responses of the object to study the nonlinearity of the conversion of ultra-wideband signals / E.V. Semyonov, A.V. Semyonov // *Radio Engineering and Electronics*, 2007, vol. 52, no. 4, pp. 480–485 (in Russ.).
13. Semyonov E., Loschilov A. Measurements of the nonlinearity of the ultra wideband signals transformation / E. Semyonov, A. Loschilov // *Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation. Rijeka, Croatia: InTech*, 2011, pp. 3–16. doi: 10.5772/16867.
14. Ivanov I.F., Trofimov V.S. On a Unified Method for Measuring the Nonlinearity of Pulsed Devices. *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1963, vol. 18, no. 2, pp. 52–60. (in Russ.).
15. The IM microscope: a new approach to nonlinear analysis of signals in satellite communications systems / D.S. Arnstein, X.T. Vuong, C.B. Cotner, H.M. Daryanani // *COMSAT Technical Review*, 1992, vol. 22, no 1, pp. 93–123. Available at: <https://www.artellc.com/wp-content/uploads/T3-3-WhitePaper-XTV-Spring-1992-IM-Microscope.pdf> (Accessed: November 09, 2022).
16. Calculating passive intermodulation products with IM Microscope method / W. Haining, L. Jiangang, W. Jiqin, Z. Chenxin // *J. of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2005, vol. 6, no. 3, pp. 47–49. Available at: http://kjcjdx.ijournal.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20050314 (Accessed: November 09, 2022).

Maxim A. Nazarov

Junior researcher,

Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 41-33-65

Email: mnaz90@mail.ru

Edward V. Semyonov

Doctor of Science in Engineering, Professor,

Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0001-5470-1185

Phone: +7 (382-2) 41-33-65

Email: edwardsemyonov@narod.ru