

13. *Ginevskiy A.S., Zhelannikov A.I. Vikhrevye sledy samoletov [Vortex traces of aircraft].* Moscow: Fizmatlit, 2008, 170 p.
14. *Kuz'menko A.S. Ispol'zovanie komp'yuternogo modelirovaniya protsessov opryskivaniya v zadachakh povysheniya effektivnosti aviatsionno-khimicheskikh rabot [The use of computer modeling of spraying processes in the tasks of increasing the efficiency of aviation chemical works],* *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences],* 2019, No. 2 (204), pp. 89-104.
15. *Radchenko I.V., Kramchaninov V.P., Dubrinskiy V.P. Samolet An-2 [Plane An-2].* Moscow: Transport, 1969, 440 p.
16. *Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii samoleta An-2 [Manual for the flight operation of the An-2 aircraft].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1984, 199 p.
17. *Ukazaniya po tekhnologii aviatsionno - khimicheskikh rabot v sel'skom i lesnom khozyaystve SSSR [Instructions on the technology of aerial - chemical works in agriculture and forestry of the USSR].* Moscow: Vozdushnyy transport, 1982, 120 p.
18. *Didio Zh.R., Fisher L.K., Lerkh M. i dr. Tekhnika i tekhnologiya bezopasnogo primeneniya sredstv zashchity rasteniy [Technique and technology for the safe use of plant protection products].* Moscow: Agropromizdat, 1991, 186 p.
19. *Popov S.Ya., Dorozhkina L.A., Kalinin V.A. Osnovy khimicheskoy zashchity rasteniy [Fundamentals of chemical plant protection],* ed. by professor S.Ya. Popova. Moscow: Art-Lion, 2003, 208 p.
20. *Zinchenko V.A. Khimicheskaya zashchita rasteniy: sredstva, tekhnologiya i ekologicheskaya bezopasnost' [Chemical plant protection: means, technology and environmental safety].* Moscow: KolosS, 2005, 232 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Панатов.

**Асовский Валерий Павлович** – Акционерное общество научно-производственная компания «ПАНХ» (АО НПК «ПАНХ»); e-mail: vasov63@mail.ru; г. Краснодар, Россия; д.т.н.; ученый секретарь.

**Кузьменко Алла Сергеевна** – Южный федеральный университет; e-mail: akuzm@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043437260; кафедра летательных аппаратов; к.т.н.; доцент.

**Asovsky Valery Pavlovich** – Joint Stock Company Scientific and Production Company «PANH» (JSC NPK «PANH»); e-mail: vasov63@mail.ru; Krasnodar, Russia; dr. of eng. sc.; scientific secretary.

**Kuzmenko Alla Sergeevna** – Southern Federal University; e-mail: akuzm@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043437260; the department of aircraft; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-29-39

**Д.В. Беляев, Д.Е. Губарев, К.Е. Румянцев**

### **СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА С ОСЦИЛЛЯЦИЯМИ НА ВЕРШИНЕ МНОГОПороговыми измерителями длительности**

*В системах автоматического измерения длительности видеоимпульсов используются различные устройства усиления и формирования импульсов нормированного уровня, длительность которых равна длительности входных сигналов. Грубое измерение длительности видеоимпульсов может производиться однопороговыми измерителями. Более точными являются многопороговые измерители и измерители с плавающим порогом. Измерители длительности импульсов нашли широкое применение в аппаратуре радиоэлектронной борьбы, в измерительной технике. Вариация формы электрических сигналов не позволяет применить единственный метод измерения, наилучший для всех форм, поэтому продолжается поиск технических решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям: широкий диапазон длительностей и скважностей. Целью работы является провести матема-*

*математический анализ случайной погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности. В ходе работы были получены результаты численного эксперимента по измерению длительности импульса с осцилляциями на вершине многопороговыми измерителями длительности. А также проведено сравнение четырех многопороговых измерителей длительности для исследуемой формы импульса. Результаты расчетов представлены для динамического диапазона сигнала 60 дБ и шага квантования амплитуды 3дБ и 12 дБ.*

*Многопороговый измеритель; длительности импульсов; случайная погрешность; импульс с осцилляциями на вершине и срезе; шаг квантования амплитуды.*

**D.V. Belyaev, D.E. Gubarev, K.E. Rumyantsev**

### **RANDOM ERROR OF PULSE DURATION MEASUREMENT WITH OSCILLATIONS AT THE TOP BY MULTI-THRESHOLD DURATION METERS**

*In systems for automatic measurement of the duration of video pulses, various devices for amplifying and shaping pulses of a normalized level are used, the duration of which is equal to the duration of the input signals. A rough measurement of the duration of video pulses can be made with one-threshold meters. More accurate are multi-threshold and floating-threshold meters. Pulse duration meters have found wide application in electronic warfare equipment, in measuring technology. The variation in the shape of electrical signals does not allow the use of a single measurement method, which is the best for all shapes, therefore, the search for technical solutions that satisfy the conflicting requirements continues: a wide range of durations and duty cycles. The aim of this work is to carry out a mathematical analysis of the random error in measuring the pulse duration with oscillations at the top by multi-threshold duration meters. In the course of the work, the results of a numerical experiment were obtained to measure the duration of a pulse with oscillations at the top using multi-threshold duration meters. And also a comparison was made of four multi-threshold duration meters for the investigated pulse shape. The calculation results are presented for a signal dynamic range of 60 dB and an amplitude quantization step of 3dB and 12 dB.*

*Multi-threshold meter; pulse duration; random error; an impulse with oscillations at the top and cut; amplitude quantization step.*

**Введение.** Современные системы идут по пути увеличения динамического и частотного диапазонов, увеличения количества и видов применяемых сигналов, освоения нано- и пикосекундных диапазонов. В основе этих достижений лежат новые методы цифровой обработки сигналов, использование новейших изделий полупроводниковой техники. Все это позволяет создавать быстродействующие элементы, прецизионные аналоговые приборы и средства вычислительной техники, открывшие широкие возможности для реализации новых идей при построении аппаратуры [1–8].

В связи с этим, становится актуальной проблема значительного улучшения параметров комплексов освещения радиотехнической обстановки (РТО), радиомониторинга радиотехнической обстановки, необходимых для успешного обнаружения и классификации современных источников радиоизлучений.

Измерители длительности импульсов нашли широкое применение в аппаратуре радиоэлектронной борьбы, в измерительной технике. Вариация формы электрических сигналов не позволяет применить единственный метод измерения, наилучший для всех форм, поэтому продолжается поиск технических решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям: широкий диапазон длительностей и скважностей.

Целью настоящей работы является математический анализ случайной погрешности измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине и срезе многопороговыми измерителями длительности.

Принцип работы многопорогового измерителя заключается в многопороговой фиксации уровня входного сигнала. Шаг квантования обычно выбирается равномерным в логарифмическом масштабе. Фронт и срез формируемых нормированных импульсов определяется алгоритмом работы многопорогового измерителя в конкретной ситуации.

Под истинной длительностью понимается длительность импульса на уровне половины амплитуды.

Так как амплитуда и форма принимаемого сигнала априорно неизвестны и могут изменяться в широких пределах, возникает погрешность формирования импульсов по длительности. Величина на этой погрешности определяется как параметрами сигнала (амплитудой, формой, длительностью фронта и среза), так и параметрами формирующего устройства (шагом квантования, динамическим диапазоном, уровнем шумов на входе пороговых устройств и д.р.).

Для измерения длительности импульсов в станциях радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы широко сейчас применяют многопороговые измерители длительности, с формированием нормированного импульса.

Поступающие на вход измерителя длительности импульсы отличаются широким многообразием форм: прямоугольные, экспоненциальные, экспоненциально-степенные, двухэкспоненциальные, гауссовские, синусные, синус-квадратные, с провалом на вершине. Случайная погрешность измерения длительности указанных импульсов многопороговыми измерителями подробно освещена в работах [6–11].

**Анализ случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине.** Проведем анализ случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине четырьмя типами измерителей длительности в широком динамическом диапазоне: первый измеритель (далее измеритель 1) – многопороговый измеритель длительности с формированием фронта нормированного импульса при срабатывании самого чувствительного порога, среза – при отпуске первого сверху из сработавших, второй измеритель (далее измеритель 2) формирует фронт нормированного импульса при срабатывании самого чувствительного порога, срез – при отпуске второго сверху из сработавших, третий измеритель (далее измеритель 3) – формирует нормированный импульс путем усреднения нормированных импульсов по двум средним порогам, четвертый измеритель (далее измеритель 4) формирует нормированный импульс путем усреднения нормированных импульсов по двум максимально разнесенным порогам [6]. Эпюры, поясняющие работу измерителей приведены на рис. 1.

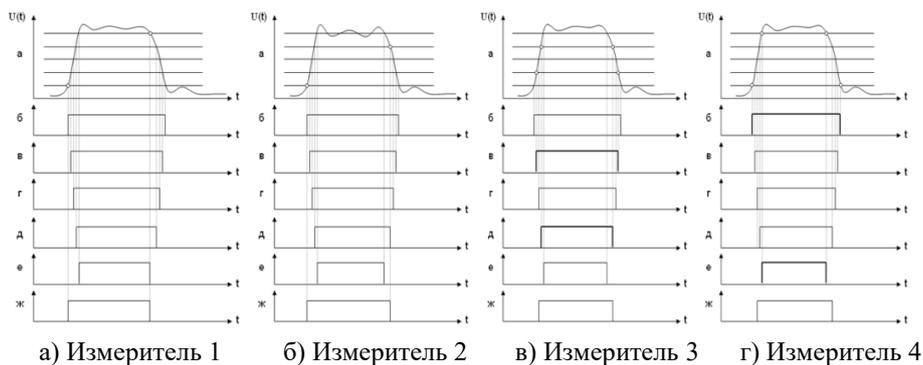


Рис. 1. Эпюры напряжений при формировании нормированного импульса формируемые многопороговыми измерителями длительности

Основным источником случайной погрешности будем рассматривать наличие шума на входе измерителя длительности, порождаемого собственными шумами тракта приемной части аппаратуры радиомониторинга или радиоэлектронной борьбы. Влияние шума на многопороговый измеритель будет сказываться в смещении временного положения моментов срабатывания и отпускания пороговых устройств. Случайную погрешность будем называть шумовой по принципу происхождения ошибки. Среднеквадратическое значение момента срабатывания порогового устройства из-за наличия шума определяется как [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ш}}{S}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ш}$  – уровень шума на входе порогового устройства;

$S$  – крутизна фронта импульса в окрестности порогового уровня.

Кривизна фронта (среза) импульса является производной от функции, описывающей форму импульса.

Считая шумы в области фронта и среза независимыми, получаем выражение для суммарной среднеквадратической погрешности:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – среднеквадратическое отклонения моментов срабатывания фронта и среза соответственно.

Подставляя в (1) крутизну импульса в момент срабатывания порога  $S(t_1)$  по которому формируется начало нормированного импульса, находим среднеквадратическую погрешность формирования фронта:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_1)}. \quad (3)$$

Подставляя в (1) крутизну импульса в момент срабатывания порога  $S(t_2)$ , находим среднеквадратическую погрешность формирования среза:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{ш}}{S(t_2)}, \quad (4)$$

Подставляя (3), (4) в (2), получаем выражение для суммарной среднеквадратической погрешности формирования длительности нормированного импульса для измерителей 1 и 2:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{ш} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_1)} + \frac{1}{S^2(t_2)}}. \quad (5)$$

Для измерителей 3 и 4, у которых формируются два нормированных импульса для нахождения среднего значения нормированного импульса, среднеквадратическая погрешность формирования длительности нормированного импульса будет иметь вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{ш}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{S^2(t_1)} + \frac{1}{S^2(t_2)} + \frac{1}{S^2(t_3)} + \frac{1}{S^2(t_4)}}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что погрешность формирования длительности нормированного импульса, вызванная наличием шума на входе многопорогового измерителя, зависит только от уровня входного шума и крутизны фронта и среза измеряемого импульса. Среднеквадратическое значение погрешности формирования нормированного импульса прямо пропорционально среднеквадратиче-

скому значению шума на входе и уменьшается с увеличением крутизны фронта и среза импульса. Полученные выражения (5) и (6) позволяют провести анализ зависимости среднеквадратического отклонения длительности нормированного импульса от крутизны фронта и среза измеряемого импульса и, следовательно, от его формы.

Рассмотрим импульс с осцилляциями на вершине наложенные на трапециевидальный импульс. Форма такого импульса представлена на рис. 2 [6–8]. Импульс описывается выражением (7):

$$F(t) := \begin{cases} \frac{U_{mm}}{\tau_f} t & \text{if } 0 \leq t < \tau_f \\ U_{mm} \cdot \left( 1 + \frac{\sin(60\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - \text{shir} t)}{2} \right) & \text{if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ \frac{U_{mm}}{\tau_s} (\tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s - t) & \text{if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \\ U_{mm} \cdot 3000 \cdot (\cos(55\pi \cdot t) \cdot \exp(\text{ampas} - \text{shir} t)) & \text{if } t \geq \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases} \quad (7)$$

где  $F(t)$  – форма импульса;  
 $U_{mm}$  – амплитуда импульса;  
 $\tau_f$  – длительность фронта;  
 $\tau_s$  – длительность среза;  
 $\tau_{ist}$  – истинная длительность импульса по уровню половинной амплитуды;  
 $\text{ampas}$  – амплитуда осцилляции на вершине;  
 $\text{shir}$  – ширина осцилляций на вершине.

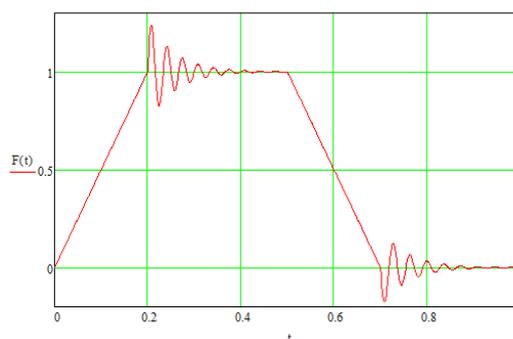


Рис. 2. Форма импульса с осцилляциями на вершине и после среза

Производная будет иметь вид (8):

$$S(t) = F'(t) = \begin{cases} \frac{U_{m_w}}{\tau_f} & \text{if } 0 \leq t < \tau_f \\ 30 \cdot \text{pp} \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \cos(60 \cdot \text{pp} \cdot x) \cdot U_{m_w} - \frac{\text{shir} \cdot e^{-\text{ampas} - \text{shir} \cdot x} \cdot \sin(60 \cdot \text{pp} \cdot x) \cdot U_{m_w}}{2} & \text{if } \tau_f \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \\ -\frac{U_{m_w}}{\tau_s} & \text{if } \tau_{ist} + 0.5\tau_f - 0.5\tau_s \leq t < \tau_{ist} + 0.5\tau_f + 0.5\tau_s \end{cases} \quad (8)$$

Очевидно, что осцилляция после среза не будет участвовать в расчетах, поскольку она не влияет на формирование нормированного импульса многопороговыми измерителями.

Расчет случайной погрешности измерения длительности проводился в программе MathCad численными методами для амплитуд исходного сигнала от 0 дБ, соответствующих максимальной амплитуде, до минус 60 дБ, при шаге установки порога порога 3дБ и 12 дБ. Уровень шума в расчете принимался равным минус 60 дБ [9–15].

На рис. 3, 4, 6–10 представлены зависимости систематических погрешностей измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине измерителями 1–4 при шаге квантования 3 дБ и 12 дБ.

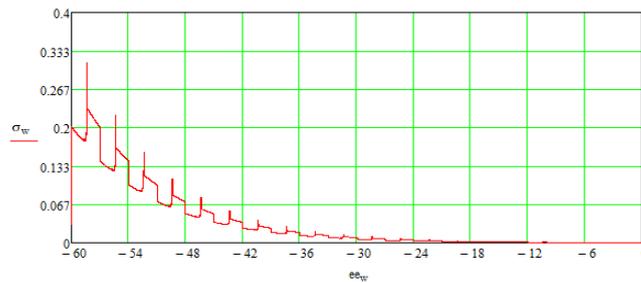


Рис. 3. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=3$  дБ для измерителя 1

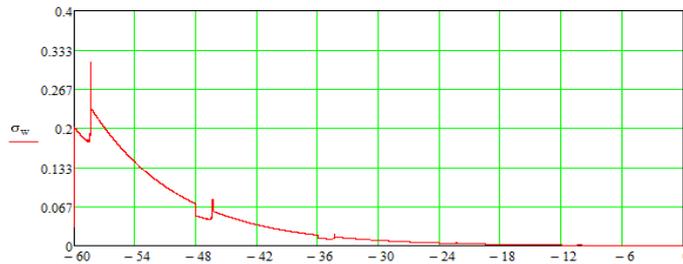


Рис. 4. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=12$  дБ для измерителя 1

Из рис. 3 и 4 видно, что максимальное значение случайной (шумовой) ошибки (ШО) измерения длительности измерителем 1 импульса с осцилляциями на вершине составляет 24 % при минимальном уровне сигнала и ступенчато спадает до нуля при увеличении амплитуды сигнала. При этом ШО имеет выбросы до 30%, при минимальном уровне сигнала.

Формирование выбросов на шумовой ошибке в зоне амплитуд до минус 42 дБ на рис. 3 и 4 обусловлены попаданием момента срабатывания верхнего порога измерителя на первый выброс осцилляции на вершине импульса – зону с минимальной крутизной, рис. 5.

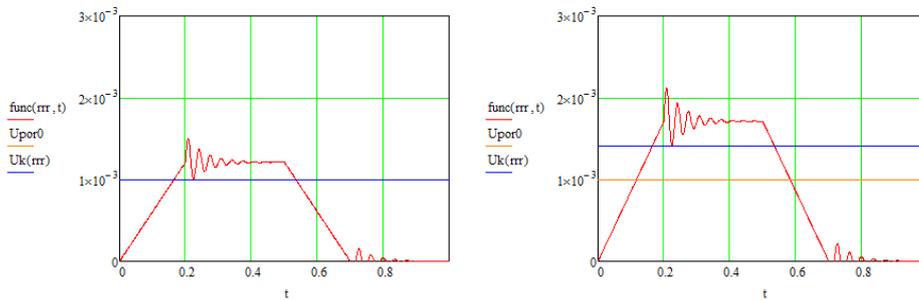


Рис. 5. Попадание максимального порога на осцилляции с минимальным наклоном при различных амплитудах сигнала

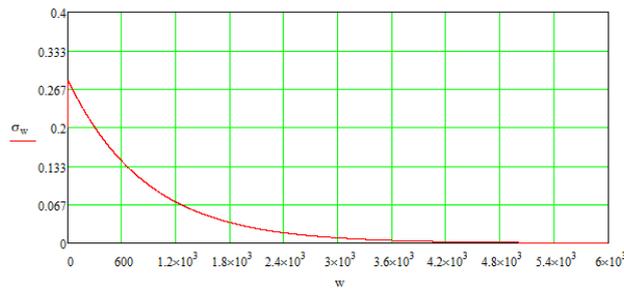


Рис. 6. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=3$  дБ и 12 дБ для измерителя 2

Максимальное значение случайной (шумовой) ошибки (ШО) измерения длительности измерителем 2 импульса с осцилляциями на вершине составляет не зависит от шага квантования и составляет 29 % при малых сигналах и монотонно уменьшается до нуля при увеличении амплитуды сигнала.

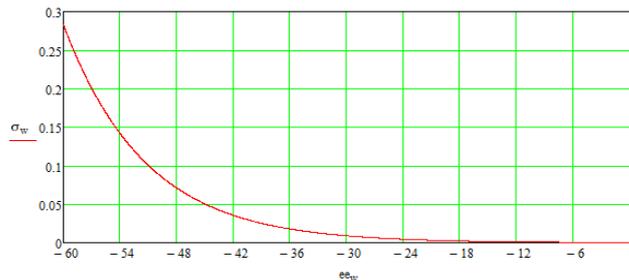


Рис. 7. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=3$  дБ и 12 дБ для измерителя 3

Случайная (шумовая) ошибка (ШО) измерения длительности измерителем 3 аналогична измерителю 2 и составляет около 27 % при минимальных уровнях сигнала и монотонно уменьшается при увеличении амплитуд сигнала. Отсутствие выбросов на графиках 6 и 7 объясняется не попаданием моментов срабатывания порогов на осцилляции на вершине.

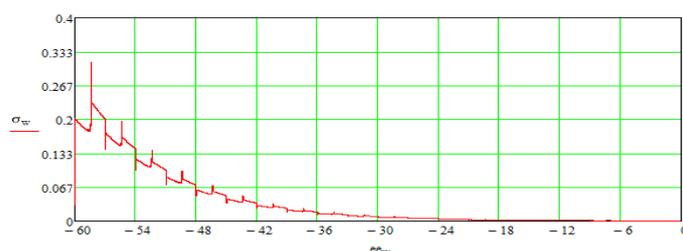


Рис. 9. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=3$  дБ для измерителя 4

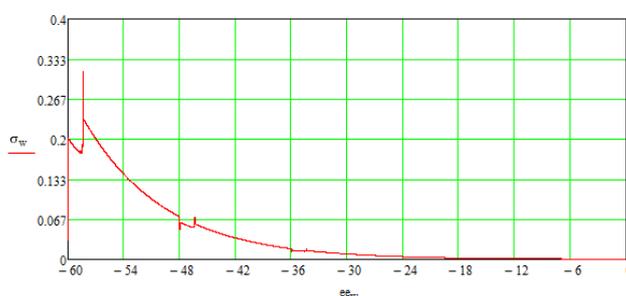


Рис. 10. Зависимость случайной ошибки измерения длительности импульса с осцилляциями на вершине от амплитуды входного сигнала при шаге квантования  $N=12$  дБ для измерителя 4

Случайная (шумовая) ошибка (ШО) измерения длительности измерителем 4 составляет от 24 % и ступенчато уменьшается до 0 %. Принцип формирования выбросов в зоне малых амплитуд аналогичен первому измерителю. При проведении данного исследования были использованы источники [16–25].

**Заключение.** Случайная (шумовая) ошибка (ШО) при измерении длительности четырьмя многопороговыми измерителями монотонно уменьшается от 24 % до 0% при увеличении амплитуды сигнала. Выбросы ШО обусловлены попаданием моментов срабатывания порогов на зоны сигнала с малой крутизной, а их положение определяется принципом формирования нормированного импульса конкретным измерителем. Максимальные значения выбросов появляются при работе по сигналу с малой амплитудой соизмеримой с величиной шума.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов И.Е., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов.радио, 1978. – 296 с.
2. Памазанов А.В., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Дикарев Б.Д. Оценка параметров сигналов: учеб. пособие. Ч. 1. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 57 с.
3. Зорин Р.Л. Анализ шумовых ошибок многопорогового усилителя-формирователя длительности импульсов: Сб. трудов СКНЦВШ, г. Ростов-на-Дону, 2000 г.
4. Памазанов А.В., Зорин Р.Л. Оценка временных параметров радиосигнала акустооптическим измерителем // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2002. – Т. 45, № 3. – С. 63-67.
5. Дикарев Б.Д., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Памазанов А.В. Исследование шумовых ошибок усилителя-формирователя импульсов // В сб. «Радиоэлектронные технологии информационной безопасности» / под ред. К.Е. Румянцев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – С. 78-81.

6. Патент РФ №2.399. 922. Устройство измерения длительности импульсов по двум уровням / *Беляев Д.В., Зикий А.Н., Зорин Р.Л., Румянцев К.Е., Черкасов В.И.* Оpubл. 20.09.2010, Б.И. №26.
7. *Tsui J.V.Y.* Microwave Receivers with Electronic Warfare Application. – Wiley-Interscience Publication, 1986. – 460 p.
8. *Розенберг В.Я.* Введение в теорию точности измерительных систем. – М.: Сов. радио, 1975. – 304 с.
9. *Иццоки Я.С., Овчинников Н.И.* Импульсные и цифровые устройства. – М.: Сов. радио, 1973. – 592 с.
10. Аппаратура для частотных и временных измерений. – М.: Сов. радио, 1971. – 336 с.
11. *Никитенко Ю.И., Орловская С.Э.* Прохождение экспоненциально-степенных импульсов через резонансный усилитель с одиночными контурами // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. XII. – 1963. – Вып. № 29.
12. *Поляков П.Ф.* Широкополосные аналоговые системы связи со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1981. – 153 с.
13. *Тузов И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.* Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
14. *Зенькович А.В.* Искажения частотно-модулированных колебаний. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
15. *Дятлов А.П., Дятлов П.А.* Анализ и моделирование обнаружителей сигналов: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 82 с.
16. *Дятлов А.П.* Обнаружители и измерители параметров сигналов в радиоконтроле: учеб. пособие. 4.1. – Таганрог: ТРТИ, 1993. – 85 с.
17. *Дятлов А.П., Дятлов П.А., Кульбикаян Б.Х.* Многофункциональное автокорреляционное устройство с квадратурной обработкой информации // Радиосистемы. – 2002. – Вып. 62. – С. 3-9.
18. *Дятлов А.П., Дятлов П.А., Мамонтов К.А.* Радиомониторинг слабых широкополосных частотно-модулированных сигналов // Телекоммуникации. – 2004. – № 8. – С. 45-49.
19. *Мамонтов К.А.* Алгоритмы и структуры автокорреляционных частотных дискриминаторов // Сб. научных статей "Современные проблемы теории радиотехнических сигналов, цепей и систем". – Таганрог: ТРТУ, 2004.
20. *Broderick P.* Effect of Distortion on the Bessel-Zero Method of Frequency Modulation Measurements // "Proc. IEE", Electronics Record. – 1966. – Vol. 113, No. 5. – P. 740.
21. *Alongi A.V.* Short-pulse and wide-bandwidth high-resolution radars // In: Atmospheric effects on radar target identification and imaging. – Dordrecht - Boston, 1976. – P. 83-156.
22. Аппаратура для частотных и временных измерений / под ред. А.П. Горшкова. – М.: Сов. радио, 1971. – 336 с.
23. *Кантор Л.Я., Дорофеев В.М.* Помехоустойчивость приема ЧМ сигналов. – М.: Связь, 1977. – 335 с.
24. Многофункциональные комплексы радиоконтроля и выявления каналов утечки информации (перевод). – М.: Иностранная печать. Серия "ТСР служб зарубежных государств", ВИНТИ. – 2001. – № 12. – С. 35-37.
25. Приемники предупреждения о радиолокационном облучении (перевод). – М.: Иностранная печать. Серия "ТСР служб зарубежных государств", ВИНТИ. – 2001. – № 2. – С. 14-20.

#### REFERENCES

1. *Kulikov I.E., Trifonov A.P.* Otsenka parametrov signalov na fone pomekh [Estimation of parameters of signals against the background of interference]. Moscow: Sov.radio, 1978, 296 p.
2. *Patazanov A.V., Zikiy A.N., Zorin R.L., Dikarev B.D.* Otsenka parametrov signalov: ucheb. posobie [Estimation of signal parameters: tutorial. Part 1]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 57 p.
3. *Zorin R.L.* Analiz shumovykh oshibok mnogoporogovogo usilitelya-formirovatelya dli-tel'nosti impul'sov: Sb. trudov SKNTSVSh, g. Rostov-na-Donu, 2000 g. [Analysis of noise errors of a multi-threshold amplifier-pulse duration shaper. Collection of works of SKNTSVSh. Rostov-on-Don, 2000].

4. Pomazanov A.V., Zorin R.L. Otsenka vremennykh parametrov radiosignala akustoopticheskim izmeritelem [Estimation of the time parameters of the radio signal with an acousto-optic meter], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika* [Proceedings of higher educational institutions. Radioelectronics], 2002, Vol. 45, No. 3, pp. 63-67.
5. Dikarev B.D., Zikiy A.N., Zorin R.L., Pomazanov A.V. Issledovanie shumovykh oshibok usilitelya-formirovatelya impul'sov [Investigation of noise errors of the amplifier-shaper of impulses], *V sb. «Radioelektronnyye tekhnologii informatsionnoy bezopasnosti»* [In the collection "Radio-electronic technologies of information security"], ed. by K.E. Rumyantsev. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, pp. 78-81.
6. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Zorin R.L., Rumyantsev K.E., Cherkasov V.I. Patent RF No. 2.399.922. Ustroystvo izmereniya dlitel'nosti impul'sov po dvum urovnyam [Device for measuring pulse duration at two levels], Publ. 09/20/2010, B.I. No. 26.
7. Tsui J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Application. Wiley-Interscience Publication, 1986, 460 p.
8. Rozenberg V.Ya. Vvedenie v teoriyu tochnosti izmeritel'nykh system [Introduction to the theory of accuracy of measuring systems]. Moscow: Sov. radio, 1975, 304 p.
9. Itskhoki Ya.S., Ovchinnikov N.I. Impul'snye i tsifrovye ustroystva [Pulse and digital devices]. Moscow: Sov. radio, 1973, 592 p.
10. Apparatura dlya chastotnykh i vremennykh izmereniy [Equipment for frequency and time measurements]. Moscow: Sov. radio, 1971, 336 p.
11. Nikitenko Yu.I., Orlovskaya S.E. Prokhozhdenie eksponentsial'no-stepennykh impul'sov cherez rezonansnyy usilitel' s odinochnymi konturami [Passage of exponential-power-law pulses through a resonant amplifier with single circuits], *Voprosy radioelektroniki* [Problems of Radioelectronics]. Ser. XII, 1963, Issue No. 29.
12. Polyakov P.F. SHirokopolosnye analogovye sistemy svyazi so slozhnymi signalami [Broadband analog communication systems with complex signals]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 153 p.
13. Tuzov I., Sivov V.A., Prytkov V.I. i dr. Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami [Interference immunity of radio systems with complex signals], ed. by G.I. Tuzova. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 264 p.
14. Zen'kovich A.V. Iskazheniya chastotno-modulirovannykh kolebaniy [Distortion of frequency modulated oscillations]. Moscow: Sov. radio, 1974, 296 p.
15. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A. Analiz i modelirovanie obnaruzhiteley signalov: Metodicheskie ukazaniya k laboratorno-prakticheskim zanyatiyam [Analysis and modeling of signal detectors: Methodical instructions for laboratory and practical exercises]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, 82 p.
16. Dyatlov A.P. Obnaruzhiteli i izmeriteli parametrov signalov v radiokontrole: ucheb. posobie. 4.1 [Detectors and Meters of Signal Parameters in Radio Monitoring: Tutorial. 4.1.]. Taganrog: TRTI, 1993, 85 p.
17. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Kul'bikayan B.Kh. Mnogofunktsional'noe avtokorrelatsionnoe ustroystvo s kvadratnoy obrabotkoy informatsii [Radio monitoring of weak broadband frequency-modulated signals], *Radiosistemy* [Radio systems], 2002, Issue 62, pp. 3-9.
18. Dyatlov A.P., Dyatlov P.A., Mamontov K.A. Radiomonitoring slabykh shirokopolosnykh chastotno-modulirovannykh signalov [Radio monitoring of weak broadband frequency-modulated signals], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2004, No. 8, pp. 45-49.
19. Mamontov K.A. Algoritmy i struktury avtokorrelatsionnykh chastotnykh diskriminatorov [Algorithms and structures of autocorrelation frequency discriminators], *Sb. nauchnykh statey "Sovremennye problemy teorii radiotekhnicheskikh signalov, tsepey i sistem"* [Collection of scientific articles "Modern problems of the theory of radio-technical signals, circuits and systems"]. Taganrog: TRTU, 2004.
20. Broderick P. Effect of Distortion on the Bessel-Zero Method of Frequency Modulation Measurements, *"Proc. IEE", Electronics Record*, 1966, Vol. 113, No. 5, pp. 740.
21. Alongi A.V. Short-pulse and wide-bandwidth high-resolution radars, *In: Atmospheric effects on radar target identification and imaging*. Dordrecht - Boston, 1976, pp. 83-156.
22. Apparatura dlya chastotnykh i vremennykh izmereniy [Equipment for frequency and time measurements], ed. by A.P. Gorshkova. Moscow: Sov. radio, 1971, 336 p.

23. Kantor L.Ya., Dorofeev V.M. Pomekhoustoychivost' priema ChM signalov [Immunity of receiving FM signals. Moscow: Svyaz', 1977, 335 p.
24. Mnogofunktional'nye komplekсы radiokontrolya i vyyavleniya kanalov utechki informatsii (perevod) [Multifunctional complexes for radio monitoring and detection of information leakage channels (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 12, pp. 35-37.
25. Priemniki preduprezhdeniya o radiolokatsionnom obluchenii (perevod) [Receivers of warning about radar exposure (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 2, pp. 14-20.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

**Беляев Денис Владимирович** – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник подразделения.

**Губарев Дмитрий Егорович** – Южный федеральный университет; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра АиРПУ. аспирант.

**Румянцев Константин Евгеньевич** – e-mail: rke2004@mail.ru; зав. кафедрой ИБКТС; д.т.н.; профессор.

**Belyaev Denis Vladimirovich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of department.

**Gubarev Dmitriy Egorovich** – Southern Federal University; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; Taganrog, Russia; postgraduate student.

**Rumyantsev Konstantin Evgenevich** – e-mail: rke2004@mail.ru; head of the department of IBKTS; dr. of eng.sc.; professor.

УДК 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-39-49

**А.И. Комиссаров, К.Е. Бяков, В.Б. Холоденко, О.А. Корниенко**

### **РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФИЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ДВУХЗВЕННОГО ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА**

*Способность многозвенного внутритрубного робота преодолевать изогнутые участки трубопроводов является важным показателем его профильной проходимости. Оценка данного показателя на этапе проектирования невозможна без проведения математического моделирования процесса пространственного движения робота с учетом силового взаимодействия движителей робота с трубопроводом. Целью данной работы является создание динамической модели для оценки профильной проходимости двухзвенного внутритрубного робота с колесными движителями. Разработка модели проводилась в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» с использованием стандартных элементов описания механических систем и специально разработанной модели контактного взаимодействия колесных движителей робота с внутренней поверхностью трубопровода. Модель контактного взаимодействия колес с трубопроводом была создана в среде MATLAB и скомпилирована в динамически подключаемую библиотеку. Полученная динамическая модель верифицировалась по качественному поведению робота при движении через изогнутый участок трубопровода и графикам индикаторов профильной проходимости. Рассматривалось два варианта направления изгиба трубопровода. В качестве индикатора профильной проходимости было предложено использование минимального расстояния от выступающих электродвигателей актуаторов робота до внутренней поверхности трубопровода. Анализ результатов математиче-*