

УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ РАДИОСИГНАЛА

А. П. Абрамов^а, канд. техн. наук, доцент

П. Н. Петров^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при решении задач идентификации сложных радиосигналов в реальном масштабе времени требуется большой ассортимент устройств, позволяющих определять их тонкую структуру как во временной, так и в частотной области. Целью работы является разработка и техническая реализация алгоритма обработки радиосигналов, позволяющего в реальном масштабе времени однозначно в широком диапазоне фазовых углов определять их фазовую структуру. **Результаты:** сформирован алгоритм обработки радиосигналов, на основе которого разработана структурная схема устройства и определены характеристики его основных функциональных узлов. Для снижения энергозависимости устройства использовались современные достижения акустоэлектроники и ее элементной базы. Разработана новая топология элементов на поверхностных акустических волнах, обеспечивающих дифференцирование, интегрирование и преобразование по Гильберту входных радиосигналов во временной области. Реализовано устройство с относительной полосой пропускания 30 % и представлены результаты экспериментальных исследований, убедительно подтвердившие теоретические выводы. **Практическая значимость:** разработанное устройство позволяет однозначно в широком диапазоне фазовых углов определять фазовую структуру радиосигналов с произвольным видом функции внутриимпульсной угловой модуляции. При этом результат обработки не зависит от случайной начальной фазы исследуемого радиосигнала.

Ключевые слова — радиосигнал, фазовая структура, дифференцирование, интегрирование, преобразование Гильберта, поверхностные акустические волны.

Введение

Одной из важнейших задач, решаемых современными радиолокационными системами, является однозначное определение в широком диапазоне фазовых углов фазовой структуры сложных радиосигналов в реальном масштабе времени [1–3]. Под фазовой структурой радиосигнала понимается его полная фаза, но без учета случайной начальной фазы. Другими словами, это функция времени, определяющая изменения линейной составляющей текущей фазы и функции угловой модуляции внутри исследуемого радиосигнала. Так как несущие частоты используемых в настоящее время сложных радиосигналов лежат в гигагерцовом диапазоне частот, то решение поставленной задачи возможно лишь с помощью гибридных аналого-цифровых радиолокационных станций, в которых первичная обработка радиосигналов осуществляется аналоговыми устройствами, а вторичная — цифровыми.

Алгоритм обработки и характеристики основных функциональных узлов

С математической точки зрения для определения фазовой структуры сложного радиосигнала, представленного в виде

$$s(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0] \text{ при } |t| \leq \frac{T_c}{2}, \quad (1)$$

где $A_0 = \text{const}$ — амплитуда; ω_0 — частота несущего колебания; $\omega_0 t$ — линейная составляющая

текущей фазы; $\theta(t)$ — функция угловой модуляции; φ_0 — начальная фаза; T_c — длительность радиосигнала $s(t)$, его необходимо обработать по алгоритму

$$\psi(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s'(t) \hat{s}(t) dt. \quad (2)$$

Здесь $s'(t) = A_0 [\omega_0 + \theta'(t)] \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0]$ — производная по t радиосигнала $s(t)$; $\hat{s}(t) = A_0 \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0]$ — сигнал, сопряженный по Гильберту с обрабатываемым радиосигналом при выполнении условия $(\Delta\omega/\omega_0) \ll 1$, где $\Delta\omega$ — ширина спектра обрабатываемого радиосигнала, а время интегрирования $T > T_c$.

Для практической реализации алгоритма (2) необходимо наличие трех аналоговых устройств: преобразователя Гильберта, дифференциатора и интегратора.

Устройство, реализующее в конечной полосе частот преобразование Гильберта входного радиосигнала $s(t)$, должно иметь амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) вида

$$K_1(\omega) = \begin{cases} B_0/\Delta\omega & \text{при } (\omega_0 - \Delta\omega/2) \leq \omega \leq (\omega_0 + \Delta\omega/2); \\ 0 & \text{при } \omega < (\omega_0 - \Delta\omega/2); \omega > (\omega_0 + \Delta\omega/2) \end{cases} \quad (3)$$

и фазочастотную характеристику (ФЧХ)

$$\Phi_1(\omega) = \begin{cases} \pi/2 & \text{при } (\omega_0 - \Delta\omega/2) \leq \omega \leq (\omega_0 + \Delta\omega/2); \\ 0 & \text{при } \omega < (\omega_0 - \Delta\omega/2); \omega > (\omega_0 + \Delta\omega/2). \end{cases} \quad (4)$$

С учетом АЧХ (3) и ФЧХ (4) импульсная характеристика преобразователя Гильберта имеет вид

$$h_1(t) = \frac{B_0 \Delta \omega}{2\pi} \left[\frac{\sin(\Delta \omega t / 2)}{(\Delta \omega t / 2)} \right] \sin \omega_0 t \text{ при } |t| < \infty. \quad (5)$$

Выполнив свертку радиосигнала (1) с импульсной характеристикой (5), нетрудно показать, что на выходе данного устройства формируется сигнал

$$\hat{s}(t) = A_0 \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0] \text{ при } |t| \leq \frac{T_c}{2}, \quad (6)$$

сопряженный по Гильберту с радиосигналом $s(t)$.

Устройство, реализующее в конечной полосе частот дифференцирование по t входного радиосигнала $s(t)$, должно иметь АЧХ вида

$$K_2(\omega) = \begin{cases} |B_0 \omega / 2| & \text{при} \\ 0 & \text{при} \end{cases} \begin{cases} (\omega_0 - \Delta \omega / 2) \leq \omega \leq (\omega_0 + \Delta \omega / 2); \\ \omega < (\omega_0 - \Delta \omega / 2); \omega > (\omega_0 + \Delta \omega / 2) \end{cases} \quad (7)$$

и ФЧХ

$$\Phi_2(\omega) = \begin{cases} \pi/2 & \text{при} \\ 0 & \text{при} \end{cases} \begin{cases} (\omega_0 - \Delta \omega / 2) \leq \omega \leq (\omega_0 + \Delta \omega / 2); \\ \omega < (\omega_0 - \Delta \omega / 2); \omega > (\omega_0 + \Delta \omega / 2). \end{cases} \quad (8)$$

С учетом АЧХ (7) и ФЧХ (8) импульсная характеристика дифференциатора радиосигналов имеет вид

$$h_2(t) = \frac{B_0 \Delta \omega}{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\sin(\Delta \omega t / 2)}{(\Delta \omega t / 2)} \right]' \cos \omega_0 t - \\ - \omega_0 \frac{\sin(\Delta \omega t / 2)}{(\Delta \omega t / 2)} \sin \omega_0 t \end{array} \right\} \text{ при } |t| < \infty. \quad (9)$$

Выполнив свертку радиосигнала (1) с импульсной характеристикой (9), нетрудно показать, что на выходе данного устройства формируется сигнал

$$s'(t) = \frac{A_0 B_0 \Delta \omega}{2\pi} [\omega_0 + \theta'(t)] \sin[\omega_0 t + \theta(t) + \varphi_0] \text{ при } |t| \leq \frac{T_c}{2}, \quad (10)$$

комплексная огибающая которого пропорциональна мгновенной угловой частоте $\omega(t) = \omega_0 + \theta'(t)$ входного радиосигнала $s(t)$.

Устройство, реализующее в конечной полосе частот интегрирование входного радиосигнала, должно иметь АЧХ вида модуля функции $|\sin x/x|$ и импульсную характеристику, близкую к прямоугольному радиоимпульсу [4].

В этом случае при воздействии на вход интегратора продукта перемножения сигнала (10)

с предварительно преобразованным по частоте сигналом (6) на выходе интегратора формируется сигнал вида

$$s_1(t) = \frac{A_0 B_0 \Delta \omega}{8\pi T} [\omega_0 t + \theta(t)] \cos \omega_1 t \text{ при } 0 \leq t \leq T, \quad (11)$$

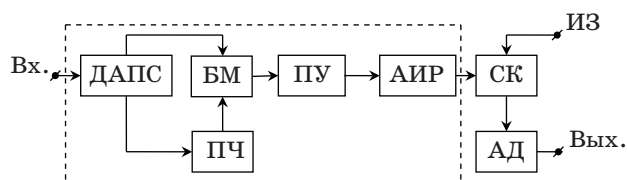
где T — длительность, а ω_1 — частота несущего колебания импульсной характеристики интегратора.

Практически реализовать упомянутые устройства на основе полупроводниковой элементной базы можно, однако при этом устройства получаются весьма сложными. Используя современные достижения акустоэлектроники на поверхностных акустических волнах и ее пассивной элементной базы, можно создать быстродействующее компактное энергосберегающее устройство определения фазовой структуры сложных радиосигналов.

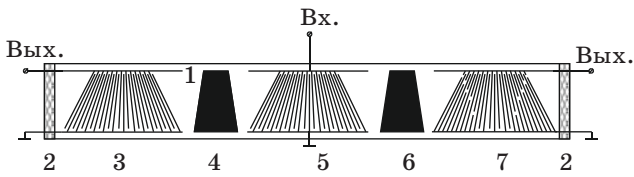
Структурная схема устройства, осуществляющего в реальном масштабе времени обработку входных радиосигналов по алгоритму (2), представлена на рис. 1. Основные функциональные узлы устройства определения фазовой структуры радиосигналов, к которым относятся двухканальный акустоэлектронный преобразователь сигналов ДАПС и акустоэлектронный интегратор радиосигналов АИР, реализованы с помощью элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Топология ДАПС на ПАВ представлена на рис. 2. На полированную поверхность подложки 1 из пьезоэлектрического материала нанесены три абсолютно одинаковых встречно-штыревых преобразователя (ВШП) ПАВ, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, два фазосдвигающих металлизированных слоя, расположенных между ними, и два звукопоглощающих покрытия 2.

Входной 5 и аподизованный выходной 7 встречный ВШП ПАВ, а также расположенный между ними металлизированный слой 6 образуют диф-

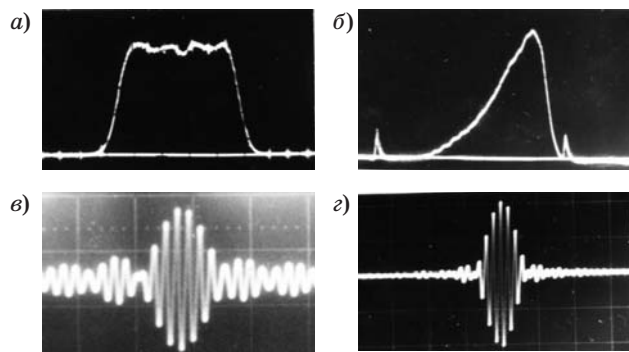


■ Рис. 1. Структурная схема устройства определения фазовой структуры радиосигналов: ДАПС — двухканальный акустоэлектронный преобразователь сигналов; ПЧ — преобразователь частоты; БМ — балансный модулятор; ПУ — полосовой усилитель; АИР — акустоэлектронный интегратор радиосигналов; СК — строб каскад; АД — амплитудный детектор; ИЗ — импульс запуска



■ Рис. 2. Топология ДАПС на ПАВ

ференцирующий канал ДАПС. Для формирования АЧХ (7) электроды в выходном ВШП 7 аподизованы по длине V -образной функцией, расположенной симметрично относительно акустического центра верхнего основания ВШП 7. Для формирования ФЧХ (8) между ВШП 5 и ВШП 7 введен металлизированный слой 6 трапециевидальной формы, обеспечивающий для каждой частотной составляющей полосы пропускания ДАПС фазовый сдвиг на величину $\pi/2$. В результате этого обратное преобразование акустического сигнала в электрический сигнал осуществляется в ВШП 7 с учетом как весовых коэффициентов, приходящихся на i -е сечения его апертуры вдоль направления распространения ПАВ так и фазового сдвига на $\pi/2$. Встречно-штыревые преобразователи ПАВ 3 и 5, а также расположенный между ними металлизированный слой 4, аналогичный слою 6, образуют опорный канал ДАПС, который предназначен для формирования выходного сигнала, сопряженного по Гильберту с входным радиосигналом. Экспериментально снятые АЧХ обо-



■ Рис. 3. АЧХ ДАПС: а — опорного канала; б — дифференцирующего канала; импульсная характеристика ДАПС: в — опорного канала; г — дифференцирующего канала

их каналов ДАПС представлены на рис. 3, а и б, а их импульсные характеристики — на рис. 3, в и г. Топология АИР на ПАВ и его характеристики детально рассмотрены в работе [4].

Результаты эксперимента

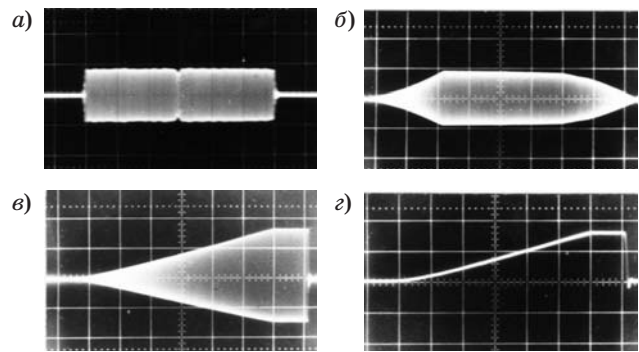
В целях экспериментального подтверждения вышеизложенного реализовано устройство определения фазовой структуры радиосигналов (см. рис. 1) с относительной полосой пропускания 30 %. В качестве сложных радиосигналов, подаваемых на его вход, использовались:

— сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) — сигнал с постоянной амплитудой, средняя частота которого совпадает с центральной частотой, а максимальная девиация частоты не превышает полосы пропускания ДАПС;

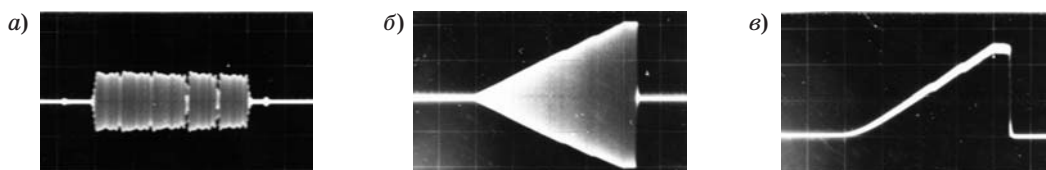
— фазомодулированный (ФМ) сигнал, состоящий из пяти элементов одинаковой амплитуды и длительности, с частотой несущего колебания, совпадающей с центральной частотой полосы пропускания ДАПС, и со скачками фазы на величину π между элементами 3–4 и 4–5.

Результаты обработки ЛЧМ-сигнала представлены на рис. 4, а–г, а результаты обработки ФМ-сигнала — на рис. 5, а–в.

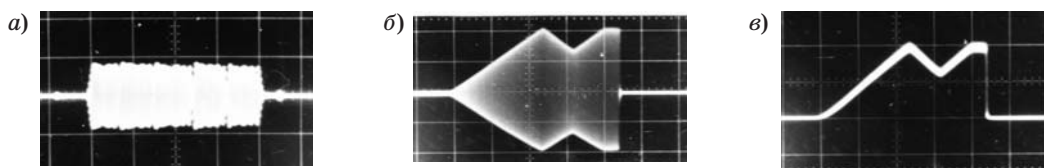
Детальный анализ экспериментальных данных показал, что рассмотренное устройство позволяет с точностью, достаточной для большинства практических применений, осуществлять



■ Рис. 4. Обработка ЛЧМ-сигнала устройством определения фазовой структуры: а — на входе ДАПС; б — на выходе АИР; в — на выходе СК; г — на выходе АД



■ Рис. 5. Обработка ФМ-сигнала устройством определения фазовой структуры: а — на входе ДАПС; б — на выходе СК; в — на выходе АД



■ Рис. 6. Обработка ФМ-сигнала АИР: а — на входе АИР; б — на выходе СК; в — на выходе АД

в конечной полосе частот фазовую демодуляцию радиосигналов с произвольным видом функции угловой модуляции, обеспечивая при этом однозначное определение их фазовой структуры в широком диапазоне фазовых углов. При этом результат обработки не зависит от начальной фазы исследуемого радиосигнала.

Следует отметить, что АИР может быть успешно использован как самостоятельное устройство преобразования радиосигналов в радиотехнических системах, работающих с сигналами в виде кодов Баркера. В этом случае из устройства (см. рис. 1) исключается ДАПС и БМ, а исследуемый ФМ-сигнал подается через ПЧ и ПУ непосредственно на вход АИР. Для экспериментального подтверждения данного обстоятельства на рис. 6, а–в представлен результат обработки с помощью АИР ФМ-сигнала в виде пятизначного кода Баркера, предварительно преобразованного по частоте на среднюю частоту полосы пропускания АИР.

На осциллограмме выходного сигнала АД (см. рис. 6, в) скачки фазы на величину π между элементами исследуемого ФМ-сигнала выражены более отчетливо, чем на рис. 5, в.

Заключение

Рассмотренное устройство определения фазовой структуры радиосигналов может быть успешно использовано как при разработке и технической реализации различных систем фазовой автопод-

стройки частоты, так и при создании более сложных систем обработки сигналов. К ним относятся анализаторы группового времени запаздывания дисперсионных линий задержки, дисперсионные анализаторы фазового спектра радиосигналов, системы идентификации сложных радиосигналов и т. д.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-07-04720.

Литература

1. **Акустоэлектронные** устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О. Л. Балышева, В. И. Григорьевский, Ю. В. Гуляев, В. Ф. Дмитриев, Г. Д. Мансфельд: монография / под ред. академика РАН Ю. В. Гуляева. — М.: Радиотехника, 2012. — 576 с.
2. **Кайно Г.** Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов: пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 656 с.
3. **Абрамов А. П., Опарин В. В.** Акустоэлектронный частотный дискриминатор // Радиотехника интеллектуальных транспортных систем: науч.-техн. сб. 2009. Вып. 1. С. 86–90.
4. **Абрамов А. П., Петров П. Н.** Акустоэлектронный фазовый демодулятор // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6(43). С. 55–58.

UDC 534.232.8:534.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.87

Device to Determine the Phase Structure of a Radio Signal

Abramov A. P.^a, PhD, Tech., Associate Professor, alex2045@mail.ru

Petrov P. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, pnp2847@mail.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Identifying complex radio signals in real time requires a large assortment of devices which allow you to determine their fine structure both in time and frequency domains. The aim of this work is the development and technical implementation of a real-time algorithm for signal processing which would allow you to unambiguously determine the phase structure of the signals in a wide range of phase angles. **Results:** On the base of a new signal processing algorithm, a block diagram of the device was developed, and the characteristics of its main functional units have been determined. To reduce the energy dependence of the device, some modern achievements of acoustoelectronics were used. A new topology is developed for elements on surface acoustic waves, providing differentiation, integration, and Hilbert conversion of the input signals in the time domain. A device has been implemented with a relative bandwidth of 30%. Results of the experimental studies are presented, convincingly confirming the theoretical conclusions.

Practical relevance: The designed device can uniquely determine the phase structure of radio signals with an arbitrary function of impulsive angular modulation in a wide range of phase angles. The result of the processing does not depend on the random initial phase of the analyzed signal.

Keywords — Radio Signal, Phase Structure, Differentiation, Integration, Hilbert Transformation, Surface Acoustic Wave.

References

1. Balysheva O. L., Grigoryevsky V. I., Gulyaev Yu. V., Dmitriyev V. F., Mansfeld G. D. *Akustoelektronnye ustroystva obrabotki i generatsii signalov. Printsipy raboty, rascheta i proektirovaniia* [Akustoelektronny Processing Devices and Generation of Signals. Principles of Work, Calculation and Design]. Ed. Yu. V. Gulyaev. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 576 p. (In Russian).
2. Gordon S. Kino. *Acoustic Wave: Devices, Imaging and Analog Signal Processing*. Prentice-Hall, 1987. 626 p.
3. Abramov A. P., Oparin V. V. *Akustoelektronny Frequency Discriminator. Radioelektronika intellektual'nykh transportnykh system*, Saint-Petersburg, Severo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet Publ., 2009, iss. 1, pp. 86–90 (In Russian).
4. Abramov A. P., Petrov P. N. *An Acoustoelectronic Phase Demodulator. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 6(43), pp. 55–58 (In Russian).

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылку на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуются публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не завершаются и предоставляются отдельными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru