

УДК 004.942:519.876.5

А.В. Мартынюк, Л.Н. Щербак

Национальный авиационный университет, Киев

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВЫХ ПРОЦЕССОВ

*Предложен метод метрологической аттестации виртуальных систем измерения характеристик шумовых процессов. Для виртуальных систем рассмотрено информационное обеспечение при проведении компьютерных измерительных экспериментов. Обоснована модель шумового сигнала в качестве «образцовой меры» для метрологической аттестации виртуальных систем для статистического оценивания характеристик шумовых процессов. В качестве образцовой меры предложено использовать цифровую реализацию стационарного белого шума, формируемого программными генераторами псевдослучайных чисел.*

**Ключевые слова:** мониторинг, метрологическая аттестация, виртуальная система измерения, шумовые процессы, белый шум, образцовая мера.

### Введение

**Постановка проблемы.** Шумовые процессы, проходящие в средах различной природы, технических системах машиностроения, энергетики, транспорта и других отраслях, в последнее время стали актуальным и важным объектом исследований. Среди направлений исследований шумовых процессов можно условно выделить два основных:

а) шумовые процессы порождают сигналы, которые по постановке задач исследований являются помеховыми в комбинациях с полезными сигналами, характеристики (параметры) последних являются основными результатами решения поставленных задач;

б) шумовые процессы порождают сигналы, которые несут информацию о состоянии, режимах и динамике функционирования объектов, в том числе технических систем, что обеспечивает основную роль шумового процесса, как объекта исследования, статистическое оценивание характеристик шумовых сигналов и формирование соответствующих задач.

Данная работа посвящена задачам второго направления исследований шумовых процессов и более конкретно задачам метрологического обеспечения при измерении характеристик сигналов, порождаемых шумовыми процессами.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Результаты решения задач рассматриваемого направления исследований шумовых процессов относятся в большинстве случаев к задачам измерения характеристик случайных процессов и полей. Математический аппарат решения задач основан на использовании методов теории случайных функций, математической статистики, теории измерений, теории систем и теорию цифровой обработки сигналов.

Применение современных информационных технологий существенно увеличили потенциальные возможности эффективного практического решения

задач измерений характеристик шумовых процессов, а использование научно-технических основ технических систем способствует созданию современных систем измерений. К последним публикациям по результатам научно-технических проблем измерения характеристик шумовых процессов следует отнести, например, [1-6].

Несколько слов о терминологии, используемой в работе. *Понятие метрологического мониторинга средств измерения, является интегральным понятием совокупности операций и действий, результаты которых определяют текущие и прогнозируемые метрологические характеристики, а в совокупности и метрологическую надежность функционирования систем измерений.* Современные системы измерений являются аппаратно-программными средствами. Поэтому метрологический мониторинг систем измерений, в основном реализуется в виде разработки и применения алгоритмически-программного обеспечения при обработке данных измерений.

Известно, что современные системы измерения могут быть реализованы как:

- реальные аппаратно-программные системы;
- виртуальные системы с использованием современных информационно-измерительных технологий моделирования различных видов систем и сигналов, включая математическое, физическое, с широким использованием средств вычислительной техники для проведения моделирующего измерительного эксперимента.

Известно [7], что виртуальные средства измерений по сравнению с реальными имеют преимущества. К ним относят значительный диапазон исследований различных вариантов структур, режимов функционирования, разработки моделей шумовых сигналов, алгоритмически-программного обеспечения, что в итоге дает возможность обосновать эффективность, оптимальность по заданным критериям варианта ре-

лизации реальной системы измерений. При этом, с одной стороны, происходит значительное уменьшение временных, производственных, финансовых, других затрат и ресурсов, а с другой – увеличение интеллектуального объема исследований.

Естественно, что в рамках одной публикации трудно отобразить всю многоплановость и разнообразие задач метрологического обеспечения систем измерения. Поэтому в данной работе рассматривается основная специфика работы систем измерения шумовых сигналов, которая существенно определяет их метрологическое обеспечение.

**Формулирование цели.** Обосновать модель шумового сигнала в качестве «образцовой меры» для метрологической аттестации виртуальной системы измерений для статистического оценивания характеристик шумовых процессов с последующим использованием и адаптацией полученных результатов исследований в реальных системах измерения.

### Изложение основного материала

**1. Информационное обеспечение.** Для формирования последовательности задач метрологического мониторинга системы измерения характеристик шумовых процессов необходимо учитывать, что в «жизненном цикле» виртуальной системы измерения шумовых сигналов можно условно выделить такие этапы, как :разработка соответствующего информационного обеспечения (модели, методы, алгоритмы, программы); проведение широкого круга моделирующих компьютерных, вычислительных, измерительных экспериментов; анализ результатов измерений и принятие решений. Во время каждого из этих этапов производятся вычисления, в основном статистическое оценивание метрологических характеристик систем. При работе с виртуальными системами можно использовать следующую схему информационного обеспечения для проведения компьютерных измерительных экспериментов, которая приведена на рис. 1.

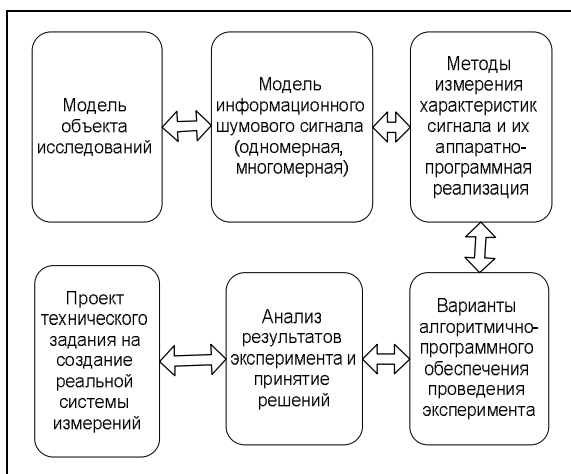


Рис. 1. Схема информационного обеспечения при проведении компьютерных измерительных экспериментов

Несмотря на тот факт, что физические и математические модели объектов исследований не в полной мере отображают реальные объекты, их роль в проведении компьютерных измерительных экспериментах фундаментальна. В большей степени используется математическая модель, которая гомоморфно отображает основные свойства объектов исследований.

Перспективной моделью шумовых процессов являются случайные функции – линейные случайные процессы и поля [3, 5, 8]. Так, линейный стационарный случайный процесс  $\xi(\omega, t)$  имеет стохастическое интегральное представление вида [8]

$$\xi(\omega, t) = \int_0^{\infty} \phi(t - \tau) \eta'(\omega, \tau) d\tau, \quad \omega \in \Omega, t \in T, \quad (1)$$

где детерминированная функция  $\phi(t)$  имеет физическую интерпретацию импульсной переходной функции линейного «формирующего» фильтра, а  $\eta(\omega, t)$  - однородный случайный процесс с независимыми приращениями и безгранично-делимыми законами распределения и соответственно его обобщенная производная  $\eta'(\omega, t)$  как стационарный белый шум. Многомерная характеристическая функция процесса (1) в форме Колмогорова описывается выражением [5, 8]

$$f(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) = \exp \left\{ i m_1 \sum_{k=1}^n u_k \int_0^{\infty} \phi(t_k - \tau) d\tau - i x \sum_{k=1}^n u_k \phi(t_k - \tau) + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left[ \exp \left( i x \sum_{k=1}^n u_k \phi(t_k - \tau) \right) - 1 \right] d\tau \frac{dK(x)}{x^2} \right\},$$

где  $m_1 = M[\eta(1)]$  – математическое ожидание процесса  $\eta(1)$  в точке  $\tau = 1$ , а  $K(x)$  – пуассоновская спектральная функция процесса  $\eta(\tau)$ .

По сути, представление (1) является обобщением известных методов: формирующего фильтра; порождающего или обновляющего процессов типа белого шума. На сегодня модели шумовых процессов вида (1) для задач метрологического мониторинга систем измерения характеристик шумовых сигналов дают возможность:

- описывать, как одномерные, так и многомерные шумовые сигналы, включая линейные процессы, векторные линейные процессы и линейные поля;
- проводить анализ моделей, как в рамках корреляционной теории, так и в рамках высших моментов;
- использовать результаты исследований случайных процессов и полей с независимыми приращениями, которые наиболее исследованы в теории случайных функций, например, использование обобщенной производной от таких процессов дает

возможность формировать целый класс белых шумов с различными законами распределения, в том числе гауссов, Пуассона и другие;

- представление (1) используется при компьютерном моделировании реализаций шумовых сигналов в качестве алгоритма;
- на основе проведения компьютерного измерительного эксперимента можно статистически оценить потенциальные возможности метрологического обеспечения измерения характеристик шумовых сигналов различными вариантами систем измерений;
- по результатам компьютерных измерительных экспериментов выработать практические рекомендации тестового метрологического мониторинга при эксплуатации систем измерений.

Модели функционирования аппаратно-программных систем измерений реализуют методы измерения характеристик шумовых процессов и являются основой алгоритмически-программного обеспечения при проведении моделирующих экспериментов. Здесь в полной мере используется математический аппарат методов статистического моделирования и статистической обработки данных измерений характеристик шумовых процессов. Многократное проведение статистических экспериментов дает возможность определить потенциальные возможности характеристик точности статистического оценивания результатов измерения. При определении метрологического обеспечения виртуальных систем измерений и их последующей адаптации реальными системами, необходимо учитывать характеристики точности применения двух мер: физической меры (единицы или шкалы) при экспериментальном ее сравнении со значением измеряемой физической величины, а также нормированной вероятностной меры при статистическом оценивании результатов измерения.

**2. Метод метрологической аттестации.** Для статистического оценивания метрологических характеристик как виртуальных, так и реальных средств измерения характеристик шумовых сигналов в рамках концепции неопределенности измерений, целесообразно использовать метод «образцовой меры» как основной метод метрологической аттестации. В качестве образцовой меры предложено использовать цифровую реализацию стационарного белого шума, формируемого программными генераторами псевдослучайных чисел.

Моделью случайного процесса типа стационарного белого шума в общем случае является обобщенная производная случайного процесса с независимыми приращениями и безгранично делимыми законами распределения, которые, как отмечалось выше, наиболее исследованы в теории случайных процессов и нашли широкое практическое применение в различных предметных областях [3, 5, 8].

Случайный процесс типа стационарного белого шума в узком смысле является стационарным процессом с независимыми значениями, а в широком

смысле - процессом с некоррелированными (ортогональными) значениями в рамках корреляционной теории. При этом рассматриваются как гауссовы, так и негауссовы стационарные белые шумы.

Отметим следующие преимущества предложенного метода метрологической аттестации систем измерения характеристик шумовых сигналов:

- применение предложенной образцовой меры обеспечивает взаимосвязь использования меры единиц или шкалы единиц физических величин и вероятностной меры при статистическом оценивании результатов измерений, что является, по сути, основной отличительной характеристикой функционирования систем измерений от других технических систем и тем самым отображает специфику методов теоретических, имитационных и экспериментальных исследований шумовых процессов;

- цифровая реализация стационарного белого шума является универсальной образцовой мерой, статистические характеристики и закон распределения которой могут быть адаптированы к конкретному виду исследуемого шумового процесса;

- характеристики такой образцовой меры не изменяются во времени для проведения многочисленных сеансов метрологической аттестации, что обеспечивает различные режимы метрологического мониторинга как виртуальных, так и реальных систем измерений;

- линейный процесс вида (1) описывает отклик первичного преобразователя (датчика, сенсора) измерительного канала системы при воздействии образцовой меры, что дает возможность использовать развитый аппарат исследований линейных процессов, как гауссовых в рамках корреляционной теории, так и с учетом высших моментов для негауссовых шумовых процессов;

- по мере развития и усовершенствования программируемых средств вычислительной техники – генераторов псевдослучайных чисел - статистические характеристики образцовой меры будут более полно отображать теоретические (вероятностные) характеристики случайного процесса типа стационарного белого шума;

- в случае необходимости цифровая реализация процесса типа стационарного белого шума может быть преобразована в непрерывную реализацию стационарного белого шума путем использования соответствующих цифро-аналоговых преобразователей для обеспечения метрологического мониторинга систем измерения шумовых сигналов с аналоговым входом.

В заключение приведем пример обоснования выбора генератора псевдослучайных чисел по метрологическим характеристикам.

Для исследования реализации стационарного белого шума с равномерным законом распределения использовались выборки объемом 100, 1000 и 10000 для каждой из выборок генерировались последовательности псевдослучайных чисел методами Мар-

тина, конгруэнтным и с помощью встроенного генератора. В качестве критериев для проверки гипотез о равномерности эмпирического распределения исследуемой реализации использовались критерий Колмогорова-Смирнова и  $\chi^2$ -критерий. При проведении метрологической аттестации были найдены статистические оценки среднего, дисперсии, автокорреляционной функции и закона распределения.

Так, согласно статистическим данным, приведенным в [4], для выборок объемом 100 и 1000 элементов наиболее весомой по метрологическим характеристикам является степень соответствия реализаций шумового сигнала, полученного с помощью встроенного в программное обеспечение Matlab генератора (функция `unifrnd`).

Но для выборок большего объема результаты уже отличаются. Так, при сравнении метрологических характеристик генераторов псевдослучайной последовательности чисел объемом выборки 10000 элементов можно сделать вывод, что наиболее весомой по метрологическим характеристикам является степень соответствия реализаций шумового сигнала, полученного с помощью конгруэнтного метода.

Полученные предварительные результаты статистического оценивания реализаций белого шума по метрологическим характеристикам показали, что обоснование выбора программного генератора псевдослучайных чисел необходимо проверять, в первую очередь, исходя из объема генерированной выборки.

## Выводы

1. Предложен метод метрологической аттестации систем измерения характеристик шумовых сигналов на основе использования образцовой меры цифровой реализации случайного процесса типа белого шума и указаны его преимущества. Результаты дают возможность обеспечить взаимосвязь использования меры единиц или шкалы единиц физических величин и вероятностные меры при статистическом оценивании характеристик шумовых сигналов.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВИХ ПРОЦЕСІВ

Г.В. Мартинюк, Л.М. Щербак

*Запропонований метод метрологічної аттестації віртуальних систем вимірювання характеристик шумових процесів. Для віртуальних систем розглянуто інформаційне забезпечення при проведенні комп'ютерних вимірювальних експериментів. Обґрунтована модель шумового сигналу як «зразкова міра» для метрологічної аттестації віртуальних систем для статистичного оцінювання характеристик шумових процесів. Як зразкова міра запропоновано використовувати цифрову реалізацію стаціонарного білого шуму, що формується програмними генераторами псевдовипадкових чисел.*

**Ключові слова:** моніторинг, метрологічна аттестація, віртуальна система вимірювання, шумові процеси, білий шум, зразкова міра.

## METROLOGICAL MONITORING OF MEASUREMENT SYSTEMS OF CHARACTERISTICS OF NOISE PROCESSES

G.V. Martyniuk, L.M. Scherbak

*The method of metrological certification of virtual measurement systems of noise process characteristics. For virtual systems considered informational support during experiments measuring computer. The model of the noise signal is proposed based on "exemplary measures" for metrological certification of virtual systems for statistical estimation of the noise characteristics of processes was considered. As an exemplary measures to use a digital realization of a stationary white noise generated software random number generator was proposed.*

**Keywords:** monitoring, metrological certification, the virtual measurement system noise processes, white noise, an exemplary measure.

2. Теоретическим аппаратом измерения характеристик шумовых сигналов, как одномерных, так и многомерных, является аппарат исследования линейных случайных процессов и полей как дальнейшее развитие известных методов формирующего фильтра, порождающего или обновляющего процессов типа белого шума.

3. В качестве примера приведены результаты выбора программируемого генератора псевдослучайных чисел для формирования реализации процесса типа белого шума.

## Список литературы

1. Российская метрологическая энциклопедия. – М.: Лики России, 2001. – 840 с.
2. Теоретические основы информационно-измерительных систем: учебник / В.П. Бабак и др. – К.: Софія-А, 2014. – 832 с.
3. Красильников А.И. Модели шумовых сигналов в системах диагностики теплоэнергетического оборудования / А.И. Красильников. – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2014. – 112 с.
4. Мартинюк Г.В. Аналіз генераторів псевдовипадкових чисел за метрологічними характеристиками / Г.В. Мартинюк, Ю.Ю. Оникієнко, Л.М. Щербак // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2016. – Т. 1/9 (79) – С. 25-30.
5. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: монографія / В.П. Бабак та ін. – К.: Софія-А, 2015. – 512 с.
6. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В.П. Ипатов. – М.: Техносфера, 2007. – 487 с.
7. Алексеев В.В. Виртуальные средства измерений / В.В. Алексеев // *Приборы*. – 2009. – №. 6. – С. 1-7.
8. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике / Б.Г. Марченко. – К.: Наукова думка, 1973. – 192 с.

Поступила в редколлегию 14.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслович, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.