

Научная статья

УДК 677.022 : 519.876.5

EDN JPLZYS

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-11-15>

**Петр Алексеевич Севостьянов**<sup>1</sup>

**Татьяна Алексеевна Самойлова**<sup>2</sup>

**Любовь Михайловна Городенцева**<sup>3</sup>

**Илья Максимович Бурдин**<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

<sup>1</sup> petrsev46@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

<sup>2</sup> tasamo89@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

<sup>3</sup> gorodentseva-lm@rguk.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3211-7718>

<sup>4</sup> burd20@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0063-6952>

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НИТЕЙ, ВОЛОКОН И ПРЯЖИ

**Аннотация.** Предложены методика и алгоритм повышения надежности принятия решения в задаче обнаружения дефекта в протяженных изделиях – нитях, проводах, кабелях, волокнах, пряже и т. п., основанные на следующих принципах: использование одновременно не одного, а нескольких статистических критериев, выработка правила согласованного принятия решения по результатам проверки с применением нескольких статистических критериев, реализация процедуры проверки в режиме онлайн по мере поступления данных и их проверки. Алгоритм представляет собой последовательную проверку гипотезы о нарушении стационарности по среднему уровню и вариабельности потока данных от сканирующего устройства по одновременно используемым критериям Стьюдента, Уилкоксона, Фишера и Ансари – Брэдли с учетом накопленной информации о потоке на предыдущих этапах проверки.

**Ключевые слова:** протяженные изделия, обнаружение дефектов, последовательная процедура, статистические критерии, робастность, последовательный многокритериальный анализ данных, надежность

**Для цитирования.** Повышение надежности обнаружения дефектов нитей, волокон и пряжи / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, Л. М. Городенцева, И. М. Бурдин // Технологии и качество. 2024. № 3(65). С. 11–15. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-11-15>.

**Petr A. Sevostyanov**<sup>1</sup>

**Tatiana A. Samoilova**<sup>2</sup>

**Lubov M. Gorodentseva**<sup>3</sup>

**Ilya M. Burdin**<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

## INCREASING THE RELIABILITY OF DEFECT DETECTION THREAD, FIBRE AND YARN

**Abstract.** A method and algorithm for increasing the reliability of decision-making in the problem of detecting defects in extended products – threads, wires, cables, fibres, yarn, etc., based on the following principles are proposed: using several statistical criteria at the same time rather than one, developing a rule for coordinated decision-making based on the results of testing using several statistical criteria, implementing the testing procedure in the online mode as data are received and checked. The algorithm is a sequential test of the hypothesis about the violation of stationarity by the average level and variability of the data flow from the scanning device using simultaneously used Student, Wilcoxon, Fisher and Ansari – Bradley tests, taking into account the information already accumulated about the flow at the previous stages of testing.

**Keywords:** extended products, defect detection, sequential procedure, statistical criteria, robustness, sequential multicriterion data analysis, reliability

**For citation:** Sevostyanov P. A., Samoilova T. A., Gorodentseva L. M., Burdin I. M. Increasing the reliability of defect detection thread, fibre and yarn. *Technologies & Quality*. 2024. No 3(65). P. 11–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-11-15>.

Задача обнаружения дефектов вдоль длины одномерных изделий: проводов, кабелей, нитей, волокон, пряжи и т. п. – является актуальной и важнейшей задачей в производстве этих изделий. Для некоторых изделий, например оптоволоконных кабелей, задача настолько важна, что контроль ведется непрерывно по всей длине изделия. Для определенности далее будем говорить о нити.

Контроль проводится методами неразрушающего контроля и затруднен тем, что в сигнале от устройств контроля присутствует не

только полезная информационная составляющая, но и помехи. Источниками помех являются неравномерность материала, формы поперечных сечений нити и внешние источники. Обычно контроль в автоматическом режиме выполняют методом сканирования. Нить облучают и регистрируют отраженный или проходящий сквозь нее сигнал. Для облучения используют ультразвук, электромагнитное излучение в широком диапазоне частот: от инфракрасного до рентгеновского и гамма-излучения – потоки частиц: электронов, нейтронов и др. (рис. 1).

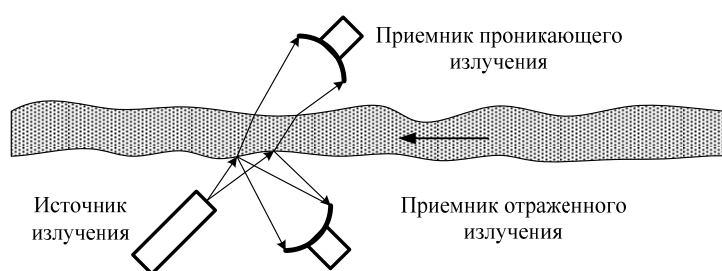


Рис. 1. Схема процесса обнаружения дефекта

В отличие от неравномерности дефект в нити проявляется в нарушении стационарности принимаемого сигнала. Таким образом, задача обнаружения дефекта есть частный случай задачи обнаружения «полезного» сигнала на фоне стационарных помех [1–3]. Для ее решения выдвигают некоторые априорные предположения о свойствах стационарного сигнала, например, стационарности по среднему уровню сигнала, по его вариабельности, по стабильности корреляционных и спектрально-частотных свойств.

Затем используют статистические критерии для проверки гипотезы о наблюдаемом отклонении: можно ли его отнести к дефекту нити или оно лежит в пределах стационарной вариабельности контролируемой величины. Как известно [4], такая процедура проверки сопряжена с ошибками 1-го и 2-го рода, и надежность статистического вывода может оказаться недостаточно высокой вследствие как недостатка информации, так и недостаточной мощности применяемого критерия.

Для повышения надежности обнаружения дефекта при отсутствии или максимально «слабых» предположениях о статистических свойствах потока измеряемых данных предлагается использовать автоматизированную процедуру проверки, основанную на следующих принципах:

1) использование одновременно не одного, а нескольких статистических критериев. Каждый из критериев основан и может, строго говоря, применяться лишь при выполнении определенных для него условий. Одновременное применение нескольких критериев может приводить к рассогласованным выводам, однако дает основу для уточнения принимаемого решения;

2) выработка правила согласованного принятия решения по результатам проверки с применением нескольких статистических критериев;

3) реализация процедуры проверки в режиме онлайн по мере поступления данных и их проверки. При этом проверенные данные накапливаются и используются для проверки на последующих этапах. Тем самым обеспечивается адаптация процедуры проверки к специфическим статистическим свойствам конкретного, получаемого при исследовании нити потока данных, и повышается надежность решения.

Для отработки описанного подхода и подтверждения его эффективности был использован метод статистического моделирования посредством имитации на компьютере потоков данных с различными статистическими свойствами и с включением элементов, имитирующих наличие локальных нарушений однородности потока и вызванных дефектом нити.

Имитация выполнена в программной системе Matlab.

Стационарный поток  $x(t)$ ,  $t = 0, \dots, T$  получен с помощью генератора псевдослучайных чисел. Были использованы нормальный  $N(m; s)$ , равномерный  $Un(a; b)$  и экспоненциальный  $Ex(m)$  законы распределения. Параметры распределений выбраны так, что средний уровень потока был равен  $xSr = 2,5$ , т. е.  $m = (a + b)/2 = 2,5$ . Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $Sx$  для нормального и равномерного распределений равно, соответственно,  $s$  и  $(b - a)/(2\sqrt{3})$ . Для экспоненциального распределения  $Sx = m$ .

Для моделирования стационарных корреляционных свойств поток подвергался фильтрации с помощью рекуррентной формулы

$$g(t) = x(t) + a_1g(t-1) + a_2g(t-2) + b_1x(t-1) + bx(t-2),$$

$$t = 0, \dots, T. \quad (1)$$

$$g(t) = x(t) + a_1g(t-1) + a_2g(t-2) + b_1x(t-1) + b_2x(t-2),$$

$$t = 2, \dots, T.$$

Формула (1) преобразует некоррелированный поток  $x(t)$  в коррелированный поток авторегрессии – скользящего среднего, для которого выбором параметров  $a_1, a_2, b_1, b_2$  можно получить различные « типовые » варианты автокорреляционных функций (АКФ) [5].

Имитация дефектов выполнялась локальным изменением параметров распределения генерируемого потока данных. Общая продолжи-

тельность потока была  $T_0$  отсчетов. Имитируемый дефект располагался в потоке в пределах от  $(n_1 + 1)$ -го отсчета и имел продолжительность  $n_d$  отсчетов. Ширина области получаемых данных составляла  $n_0$  отсчетов. Сравнению подвергались выборки значений от 1-го до  $j$ -го отсчета и от  $(j + 1)$ -го до  $(j + n_0)$ -го отсчетов для всех  $j = 1, \dots, T_0 - n_0$ , т. е. имитировалось сравнение уже полученных данных с длиной выборки  $j$  и вновь полученной порцией данных длиной  $n_0$ .

Обнаружение дефекта осуществлялось сравнением средних и вариаций. Сравнение средних выполнялось по двухстороннему двухвыборочному критерию Стьюдента, оптимальному в случае нормально распределенных выборочных значений [6], и робастному критерию Уилкоксона – Манна – Уитни. На рис. 2, 3 и 4 приведены примеры имитации сканирования и обнаружения дефекта.

На верхних графиках рисунков показаны реализации (временные диаграммы) потоков данных, получаемых от сканирующего устройства, всего  $T_0 = 10\,000$  значений. Видно различие в выборочных данных при разных законах распределения: нормальном, равномерном и экспоненциальном, – для этих значений.

Во всех трех потоках на участке значений от  $n_1 = 2000$  до  $n_1 + n_d = 2500$  были изменены параметры распределения: у нормального распределения увеличено среднее значение, у равномерного и экспоненциального распределений – среднее и дисперсия, связанная со средним через параметры  $a, b$  и  $m$ .

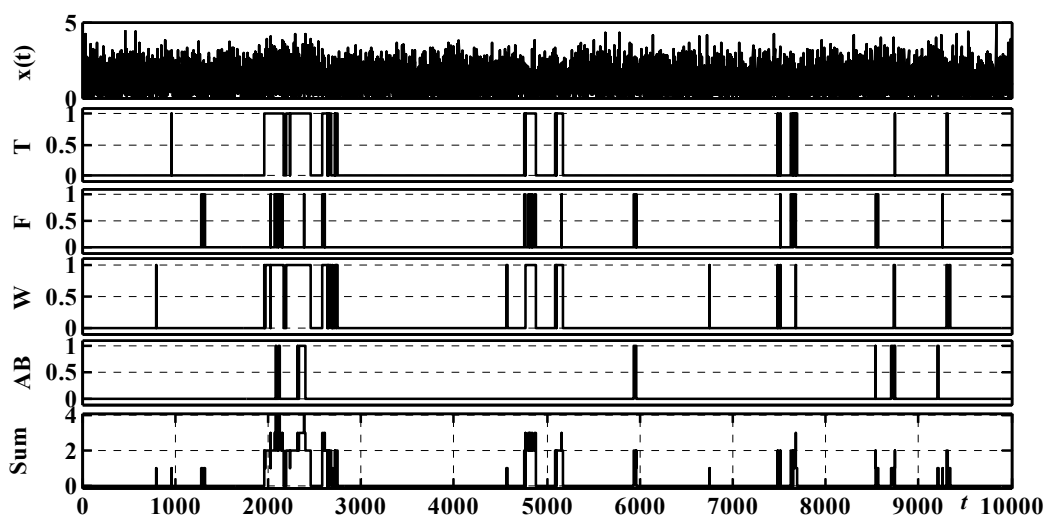


Рис. 2. Поток данных с нормальным распределением значений

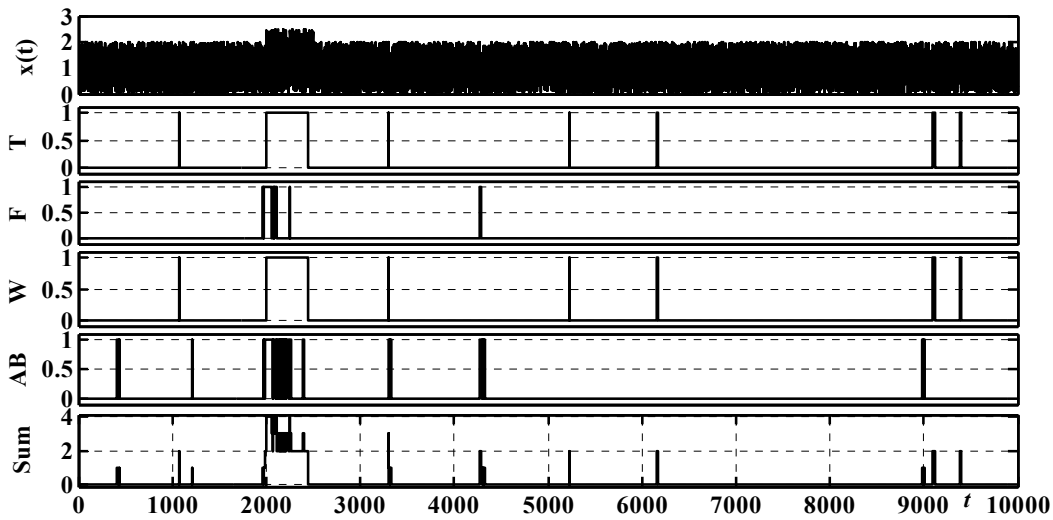


Рис. 3. Поток данных с равномерным распределением значений

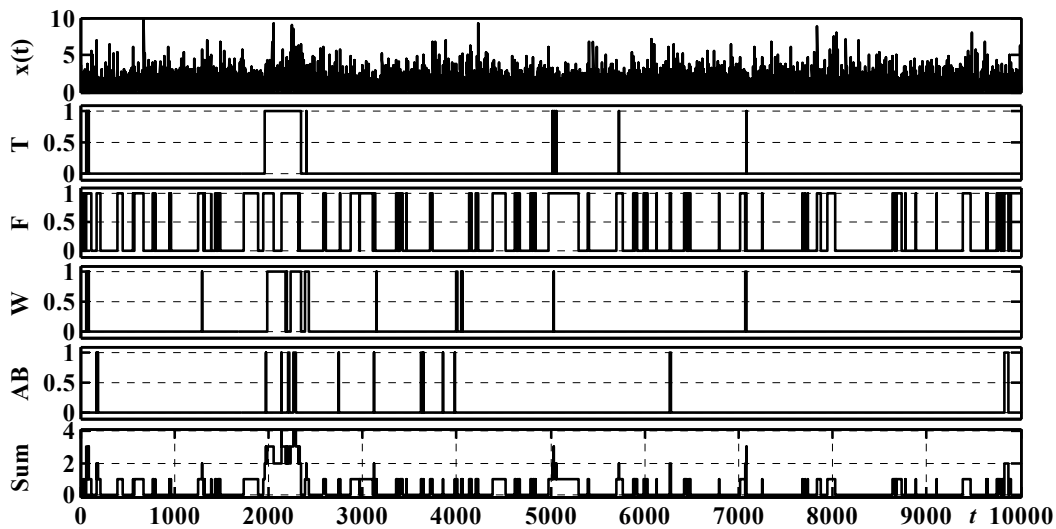


Рис. 4. Поток данных с экспоненциальным распределением значений

Для равномерного распределения область дефекта видна непосредственно по временной диаграмме потока. При нормальном и экспоненциальном распределениях на временных диаграммах область дефекта практически не видна.

На рисунках 2-я, 3-я, 4-я и 5-я временные диаграммы показывают значения индикаторов для критериев, соответственно, Стьюдента ( $T$ ), Фишера ( $F$ ), Уилкоксона ( $W$ ), Ансари – Брэдли ( $AB$ ) по результатам сравнения очередной порции из  $n_0$  отсчетов и ранее полученных данных. Значение соответствующего индикатора равно нулю, если гипотеза об отсутствии различия не противоречит сравниваемым выборкам на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , и равно единице, если гипотеза противоречит сравниваемым выборкам, т. е. по данному критерию существует подозрение на присутствие дефекта.

Нижние временные диаграммы на рис. 2, 3 и 4 показывают результат сложения ( $Sum$ ) ин-

дикаторов всех четырех критериев. Очевидно, что значение  $Sum$  достигнет значения 4 только при одновременной индикации дефекта по всем критериям. Рисунки показывают, что при всех трех распределениях этот суммарный индикатор указывает на наличие дефекта именно в области смоделированного дефекта. Отметим, что наиболее сложной является идентификация области дефекта для экспоненциального распределения. Это объясняется большой вариабельностью значений (коэффициент вариации 100%) в области стационарности потока данных.

Описанный процесс моделирования обнаружения дефекта был повторен для коррелированных потоков с различными видами АКФ с применением фильтрации (1). При этом не обнаружилось существенного влияния автокорреляции в потоках данных на результаты обнаружения области дефекта.

Заметим, что если сканирующее устройство имеет оба приемника – отраженного и про-

никающего потоков (см. рис. 1) или, например, осуществляет сканирование в двух взаимно перпендикулярных направлениях поперечной плоскости протяженного изделия, то применение описанной методики и алгоритма к потокам от каждого из приемников позволяет еще более повысить надежность обнаружения дефекта.

#### ВЫВОДЫ

1. Предложена методика повышения надежности обнаружения дефекта в протяженных изделиях, основанная на использовании одновременно нескольких статистических критериев, выработке правил согласованного принятия решения по результатам проверки с применени-

ем нескольких статистических критериев и реализации процедуры проверки по мере поступления данных и их проверки.

2. Разработан алгоритм для реализации предложенной методики, который позволил выявлять дефекты при нормальном, равномерном и экспоненциальном законах распределения данных в потоках.

3. Применение сканирующего устройства с двумя приемниками сигнала, отраженного и проникающего потоков или расположенного в двух взаимно перпендикулярных направлениях поперечной плоскости протяженного изделия, позволяет еще более повысить надежность обнаружения дефекта.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. М. : Наука, 1970. 392 с.
2. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М. : Советское радио, 1967. 347 с.
3. Городенцева Л. М., Севостьянов П. А., Самойлова Т. А. Обнаружение дефектов в протяженных изделиях по результатам двумерного сканирования // Инженерный вестник Дона. 2024. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8975> (дата обращения: 20.06.2024).
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. 3-е изд., стер. М. : Наука, 1969. 511 с.
5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление / пер. с англ. А. Л. Левшина ; под ред. В. Ф. Писаренко. М. : Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
6. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М. : Физматлит, 2012. 813 с.

#### REFERENCES

1. Tikhonov V. I. Emissions of random processes. Moscow, Nauka Publ., 1970. 392 p. (In Russ.)
2. Shestov N. S. Isolation of optical signals against the background of random noise. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1967. 347 p. (In Russ.)
3. Gorodentseva L. M., Sevostyanov P. A., Samoilova T. A. Detection of defects in extended products based on the results of two-dimensional scanning. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2024;1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8975> (accessed 20.06.2024). (In Russ.)
4. Smirnov N. V., Dunin-Barkovsky I. V. Course on probability theory and mathematical statistics for technical applications. Moscow, Nauka Publ., 1969. 511 p. (In Russ.)
5. Box J., Jenkins G. Time series analysis: forecast and management. Moscow, Mir Publ., 1974. Vol. 1. 406 p. (In Russ.)
6. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 813 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.06.2024  
Принята к публикации 23.09.2024