

©Кузьмин Е. В., Горбунов О. Е., Плотников П. О., Тюкин В. А., 2017

DOI: 10.18255/1818-1015-2017-6-760-771

УДК 519.248.6

## Об определении уровня полезных сигналов при расшифровке магнитных и вихретоковых дефектограмм

Кузьмин Е. В.<sup>1</sup>, Горбунов О. Е., Плотников П. О., Тюкин В. А.

*получена 16 октября 2017*

**Аннотация.** Для обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте регулярно проводится неразрушающий контроль рельсов с применением различных подходов и методов, включая методы магнитной и вихретоковой дефектоскопии. Статья посвящена задаче автоматического определения порогового уровня амплитуд полезных сигналов (от дефектов и конструктивных элементов рельсового пути) при расшифровке дефектограмм магнитных и вихретоковых дефектоскопов. Сигнал считается полезным (и подлежит дальнейшему анализу), если отклонение его значения от среднего значения всех сигналов как минимум в два раза превосходит пороговый уровень шума рельсов. Вероятность появления сигнала с некоторой амплитудой в бездефектных рельсах на участке без конструктивных элементов, т. е. являющегося рельсовым шумом, характеризуется законом нормального распределения. Таким образом, для вычисления порогового уровня шума может быть задействовано правило трех сигм. А удвоение порога шума дает уровень, превышение которого по амплитудному отклонению от выборочного среднего означает, что сигнал является полезным. В статье предлагается алгоритм нахождения порогового уровня шума рельсов и дается его теоретическое обоснование, а также рассматриваются примеры его работы на нескольких фрагментах реальных магнитных и вихретоковых дефектограмм.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль рельсов, магнитная и вихретоковая дефектоскопия, обнаружение дефектов, автоматический анализ магнитных и вихретоковых дефектограмм

**Для цитирования:** Кузьмин Е. В., Горбунов О. Е., Плотников П. О., Тюкин В. А., "Об определении уровня полезных сигналов при расшифровке магнитных и вихретоковых дефектограмм", *Моделирование и анализ информационных систем*, 24:6 (2017), 760–771.

### Об авторах:

Кузьмин Егор Владимирович, [orcid.org/0000-0003-0500-306X](https://orcid.org/0000-0003-0500-306X), д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической информатики, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150003 Россия, e-mail: [kuzmin@uniyar.ac.ru](mailto:kuzmin@uniyar.ac.ru), [kuzminev@nddlab.com](mailto:kuzminev@nddlab.com)

Горбунов Олег Евгеньевич, [orcid.org/0000-0001-6274-9971](https://orcid.org/0000-0001-6274-9971), канд. физ.-мат. наук, генеральный директор, ООО «Центр инновационного программирования», NDDLlab, ул. Союзная, 144, г. Ярославль, 150008 Россия, e-mail: [gorbunovoe@nddlab.com](mailto:gorbunovoe@nddlab.com)

Плотников Петр Олегович, [orcid.org/0000-0001-5687-7969](https://orcid.org/0000-0001-5687-7969), инженер-технолог, ООО «Центр инновационного программирования», NDDLlab, ул. Союзная, 144, г. Ярославль, 150008 Россия, e-mail: [plotnikovpo@nddlab.com](mailto:plotnikovpo@nddlab.com)

Тюкин Вадим Александрович, [orcid.org/0000-0001-9149-7435](https://orcid.org/0000-0001-9149-7435), руков. сектора разработки, ООО «Центр инновационного программирования», NDDLlab, ул. Союзная, 144, г. Ярославль, 150008 Россия, e-mail: [tyukinva@nddlab.com](mailto:tyukinva@nddlab.com)

### Благодарности:

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития ЯрГУ на период 2017–2021 гг. как опорного вуза Ярославской области. Мероприятие «Развитие инновационно активных подразделений университета в приоритетных сферах экономики региона». Направление «Модернизация научно-исследовательской и инновационной деятельности, включая развитие инновационной экосистемы университета».

## Введение

Для обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте регулярно проводится неразрушающий контроль рельсов с применением различных подходов и методов, включая методы магнитной и вихретоковой дефектоскопии. При неразрушающем контроле рельсов с использованием магнитных и вихретоковых дефектоскопов проверяется каждый миллиметр участка пути. Это приводит к необходимости автоматического анализа большого массива данных (дефектограмм), которые поступают от соответствующего оборудования. Под анализом понимается процесс определения по дефектограммам наличия дефектных участков наряду с выявлением конструктивных элементов рельсового пути. При этом в условиях значительных объемов поступающей на обработку информации наибольший интерес представляют быстрые алгоритмы анализа данных.

Эта статья посвящена задаче автоматического определения порогового уровня амплитуд полезных сигналов при расшифровке дефектограмм магнитных и вихретоковых дефектоскопов. Результаты работы предполагается использовать при построении аппаратно-программных комплексов рельсовой дефектоскопии [1–4].

В статье рассматриваются обобщения реальных устройств, которые активно применяются на практике, в виде абстрактных 8-разрядного магнитного и 10-разрядного вихретокового дефектоскопов. Сигналы, регистрируемые этими дефектоскопами, можно разделить на два типа — 1) рельсовый шум и 2) сигналы от конструктивных элементов и дефектов.

Сигналы, являющиеся шумом от рельсов, обычно составляют более 90% всех сигналов дефектограммы. Полезными являются сигналы второго типа, т. е. сигналы от дефектов и конструктивных элементов рельсового пути.

При автоматическом анализе удобно разбивать дефектограммы на фрагменты, которые соответствуют 50-метровым участкам пути. Это означает, что при снятии показаний дефектоскопа с каждого миллиметра пути блок анализа представляет собой массив из 50000 элементов, где элемент массива — это значение амплитуды сигнала. В случае 8-разрядного дефектоскопа имеем не более 256 значений амплитуд, а от 10-разрядного вихретокового дефектоскопа может поступать не более 1024 различных значений сигналов.

Будем полагать, что значения амплитуд сигналов регистрируются дефектоскопами в виде натуральных чисел от 1 до 1024 в 10-разрядном случае и от 1 до 256 в случае 8-разрядного дефектоскопа.

Небольшое отклонение значения амплитуды от выборочного среднего значения соответствует слабому сигналу, а большое — сильному. Сильные сигналы означают наличие дефектов или конструктивных элементов и по амплитудному отклонению значительно превосходят рельсовый шум.

Практический опыт работы с данными магнитных и вихретоковых дефектоскопов показал, что вероятность появления сигнала с некоторой амплитудой в бездефектных рельсах на участке без конструктивных элементов подчиняется (в приближении) закону нормального распределения.

Сигнал считается полезным (и подлежит дальнейшему анализу), если отклонение его значения от среднего значения всех сигналов как минимум в два раза превосходит пороговый уровень шума рельсов.

Под пороговым уровнем шума будем понимать отклонение  $Level$  от среднего значения  $\mu$  сигналов рассматриваемого фрагмента дефектограммы (данные с 50-метрового участка), при котором сигналы со значениями амплитуд из диапазона  $[\mu - Level; \mu + Level]$  являются шумом рельсов.

Таким образом, поскольку рельсовый шум имеет нормальный закон распределения, для вычисления его порогового уровня может быть задействовано правило трех сигм. А удвоение порога шума дает уровень, превышение которого по амплитудному отклонению от выборочного среднего означает, что сигнал является полезным.

Отметим, что если пороговый уровень шума меньше 10 единиц, запись считается плохой (например, по причине неправильной калибровки оборудования) и не подлежит анализу. Вопрос автоматической оценки качества записи дефектограмм в данной статье не рассматривается. Далее будем полагать, что все магнитные и вихретоковые дефектограммы, которые передаются на анализ, записаны качественно.

В следующих разделах предлагается алгоритм нахождения порогового уровня шума рельсов и дается его теоретическое обоснование, а также рассматриваются примеры его работы на нескольких фрагментах реальных магнитных и вихретоковых дефектограмм.

## 1. Алгоритм

Несмотря на то, что шум рельсов характеризуется нормальным законом распределения вероятностей, из-за наличия сильных сигналов (от дефектов и конструктивных элементов) не представляется возможным применение в чистом виде правила трех сигм, согласно которому около 99,73% сигналов шума лежит в интервале  $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$ , где  $\mu$  — это выборочное среднее, а  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение. Другими словами, сильные сигналы оказывают значительное влияние на результат вычисления среднего квадратического отклонения по всей выборке.

Для построения приемлемого уровня шума  $Level \approx 3\sigma$  необходимо при вычислении приближенного значения  $\sigma$  исключить из рассмотрения (сильные) сигналы анализируемой выборки, которые не укладываются в рамки закона нормального распределения. Таким образом, для нахождения порога  $Level$  предлагается использовать следующий итерационный алгоритм, реализующий эту идею.

Основные этапы алгоритма нахождения порогового уровня шума рельсов  $Level$ :

1. Получить массив значений амплитуд сигналов  $X[1..50000]$  (данные от дефектоскопа с 50-метрового участка рельсового пути).
2. Вычислить среднее арифметическое значение  $\mu$  элементов массива  $X$ .
3. По элементам массива  $X$ , значения которых лежат в диапазоне  $[\mu - i; \mu + i]$ , где  $i \in \mathbb{N}$  изначально равно 1, построить среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  от значения  $\mu$ . Увеличить  $i$  на 1.
4. Повторять пункт 3 до тех пор, пока не будет выполнено условие  $3 \cdot \sigma > 1,3 \cdot i$  при числе элементов со значением из  $[\mu - i; \mu + i]$  более 30% от общего числа.
5. Присвоить переменной  $Level$  значение  $3 \cdot \sigma$ , а  $OldLevel$  — значение 0.

6. Повторять следующую процедуру до тех пор, пока  $\text{Level} - \text{OldLevel} > 0$ .

- (a) По элементам массива  $X$ , значения которых лежат в измененном диапазоне  $[\mu - \text{Level}; \mu + \text{Level}]$ , построить новое среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  от значения  $\mu$ .
- (b) Присвоить переменной  $\text{OldLevel}$  значение  $\text{Level}$ , а  $\text{Level}$  — значение  $3 \cdot \sigma$ .

7. Выдать значение  $\text{Level}$  в качестве искомого порогового уровня шума.

Ниже представлена реализация описанного алгоритма в псевдокоде.

```
PROGRAM NoiseLevel
CONST N=1024; L=50000;
VAR X: array [1..L] of integer; /* массив значений амплитуд сигналов */
    A: array [1..N] of integer = 0; /* A[k] -- количество сигналов с амплитудой k */
    h, i, k, s, f, cnt, cntall: word;
    mu, sig, sum, Level, OldLevel: double;
BEGIN_PROGRAM
load(X); h=size(X); cntall=0;
for i=1:h
    A[X[i]]=A[X[i]]+1; cntall=cntall+1;
end;
s=1; f=N; cnt=0; sum=0;
for k=s:f
    cnt=cnt+A[k]; sum=sum+A[k]*k;
end;
mu=sum/cnt; k=round(mu); /* round() -- округление до ближайшего целого */
sum=(k-mu)*(k-mu)*A[k]; cnt=A[k];
for i=1:N
    s=round(mu-i); f=round(mu+i);
    if s>=1 cnt=cnt+A[s]; sum=sum+(s-mu)*(s-mu)*A[s]; end;
    if f<=N cnt=cnt+A[f]; sum=sum+(f-mu)*(f-mu)*A[f]; end;
    sig=sqrt(sum/cnt);
    if cnt>0.3*cntall & 3*sig>1.3*i break; end;
end;
Level=3*sig; OldLevel=0;
while (Level-OldLevel)>0
    s=round(mu-Level); s=max(s,1); f=round(mu+Level); f=min(f,N); cnt=0; sum=0;
    for k=s:f
        cnt=cnt+A[k]; sum=sum+(k-mu)*(k-mu)*A[k];
    end;
    sig=sqrt(sum/cnt); OldLevel=Level; Level=3*sig;
end;
END_PROGRAM.
```

## 2. Обоснование алгоритма

Пусть непрерывная случайная величина  $X$  имеет нормальное распределение вероятностей. Для простоты вычислений будем полагать, что математическое ожидание  $M[X]$  равно 0. Тогда функция плотности распределения вероятности имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Построим дисперсию  $\sigma'^2(z)$  случайной величины  $X$  на участке  $[-z; +z]$ :

$$\begin{aligned} \sigma'^2(z) &= \int_{-z}^{+z} x^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 2 \int_0^z x^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \left[ \begin{array}{l} x = \sigma\sqrt{2}t \\ dx = \sigma\sqrt{2}dt \end{array} \right] = \\ &= 2 \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} 2\sigma^2 t^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{2\sigma^2 t^2}{2\sigma^2}} \sigma\sqrt{2} dt = 2 \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} \frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} t^2 e^{-t^2} dt = \\ &= \frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} t 2t e^{-t^2} dt = -\frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} t de^{-t^2} = \left[ \begin{array}{l} dv = de^{-t^2} \\ du = dt \end{array} \right] = \\ &= \frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} \left( \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt - t e^{-t^2} \Big|_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt &= \int_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} \left( 1 + \frac{(-t^2)}{1!} + \frac{(-t^2)^2}{2!} + \frac{(-t^2)^3}{3!} + \frac{(-t^2)^4}{4!} + \frac{(-t^2)^5}{5!} + \frac{(-t^2)^6}{6!} + \dots \right) dt = \\ &= \left( t - \frac{t^3}{3(1!)} + \frac{t^5}{5(2!)} - \frac{t^7}{7(3!)} + \frac{t^9}{9(4!)} - \frac{t^{11}}{11(5!)} + \frac{t^{13}}{13(6!)} - \dots \right) \Big|_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}} = \\ &= \left( t - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{4n-1}}{(4n-1)(2n-1)!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{4n+1}}{(4n+1)(2n)!} \right) \Big|_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}}; \end{aligned}$$

$$\sigma'^2(z) = \frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} \left( t - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{4n-1}}{(4n-1)(2n-1)!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{4n+1}}{(4n+1)(2n)!} - t e^{-t^2} \right) \Big|_0^{\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}}.$$

Известно, что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma^2,$$

т. е. при  $z \rightarrow \infty$  имеем  $\sigma'^2(z) \rightarrow \sigma^2$ .

Рассмотрим следующую функцию  $\varphi$  на участке  $(0; 3]$ :

$$\varphi(x) = \frac{3\sqrt{\sigma'^2(x\sigma)}}{x\sigma} \approx \frac{3\sqrt{\sigma''^2(x)}}{x}, \text{ где}$$

$$\sigma''^2(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( t - \sum_{n=1}^9 \frac{t^{4n-1}}{(4n-1)(2n-1)!} + \sum_{n=1}^9 \frac{t^{4n+1}}{(4n+1)(2n)!} - t e^{-t^2} \right) \Big|_0^{\frac{x}{\sqrt{2}}}.$$

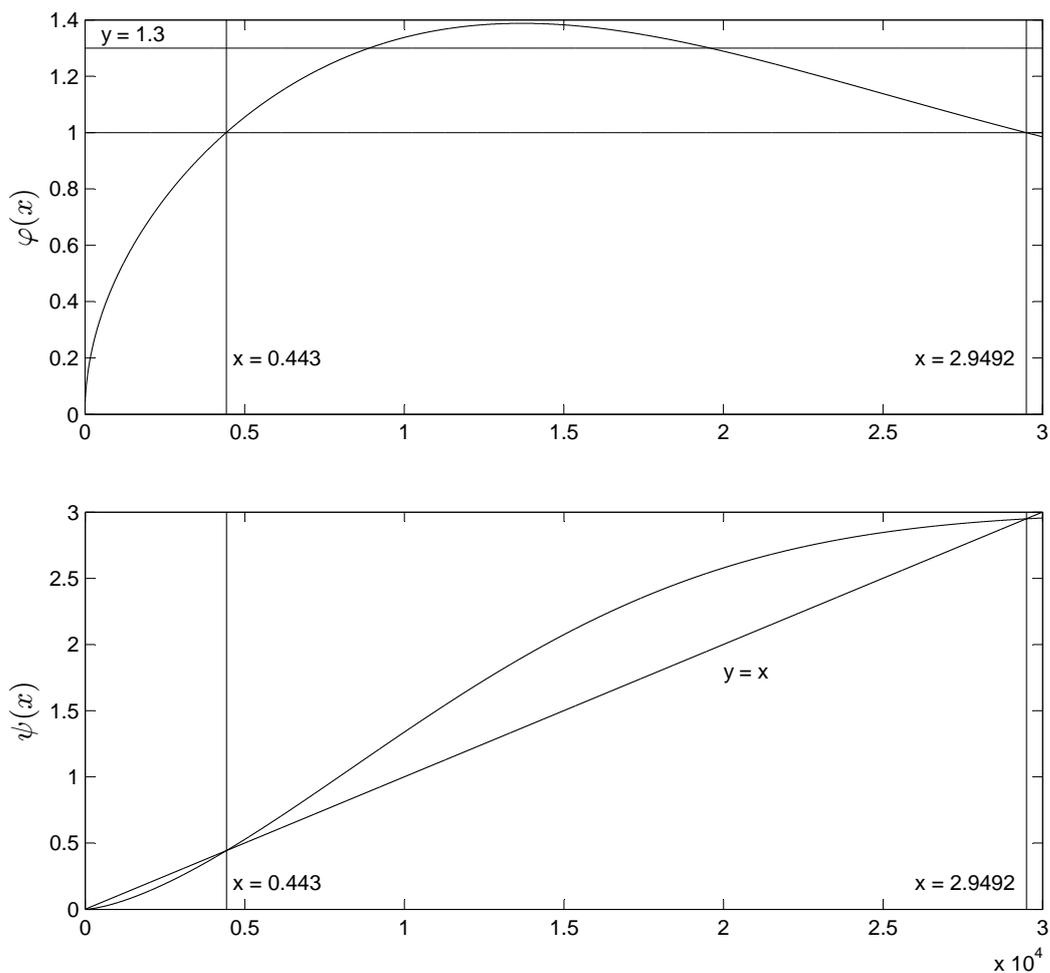


Рис. 1. Графики функций  $\varphi(x)$  и  $\psi(x)$  на участке  $(0; 3]$  при  $\Delta x = 0,0001$   
 Fig. 1. Graphs of functions  $\varphi(x)$  and  $\psi(x)$  on the section  $(0; 3]$  with  $\Delta x = 0,0001$

Вычислим приближенные значения функции  $\varphi(x)$  для всех  $x = k \cdot \Delta x$ , где шаг  $\Delta x = 0,0001$ , а  $k = 1 \dots 30000$ . График функции  $\varphi(x)$ , построенный по вычисленным значениям, представлен на рис. 1 (верхний график).

Функция  $\varphi(x)$  позволяет оценить, во сколько раз три значения среднего квадратического отклонения, построенного по элементам выборки со значениями из диапазона  $[-x\sigma; +x\sigma]$ , больше значения  $x\sigma$ , где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение, построенное только по тем элементам выборки, которые являются шумом (соответствуют нормальному закону распределения вероятностей).

Факт, что  $\varphi(x) \geq 1,3$  только при  $x \in [0,8911; 1,9584]$ , обеспечивает обоснование шагов с 3 по 5 алгоритма определения уровня шума, которые находят стартовую точку для следующей итеративной части этого алгоритма. Таким образом, выполнив пятый шаг, алгоритм (в идеальном случае) в качестве стартового Level будет иметь значение приближенно равное  $1,16\sigma$ .

На практике, очевидно, и это будет показано далее на примерах, реальное стартовое значение Level будет отклоняться от указанного. Но целью первых шагов алгоритма является выход на коэффициент 1,3, позволяющий поначалу увеличивать почти на треть диапазон амплитуд для рассматриваемых элементов выборки.

Для оценки погрешности вычисления значений рассматриваемой функции  $\varphi(x)$  отметим, что при  $x = 3$  и  $n = 9$

$$\frac{t^{35}}{35(17!)} \Big|_0^{\frac{3}{\sqrt{2}}} \approx 0,00002; \quad \frac{t^{37}}{37(18!)} \Big|_0^{\frac{3}{\sqrt{2}}} \approx 0,000005.$$

Отметим также, что выбранной дискретности с шагом  $\Delta x = 0,0001$  вполне достаточно, так как 10-разрядный дефектоскоп выдает значения из интервала  $[1; 1024]$ , т. е. среднее квадратическое отклонение не может быть более 512, а по условию корректной записи дефектограмм оно не должно быть менее 3.

Рассмотрим еще одну новую функцию  $\psi(x) = x \cdot \varphi(x)$  для  $x = k \cdot \Delta x$ ,  $x \in (0; 3]$ . Эта функция соответствует шагу 6 алгоритма определения порогового уровня шума рельсов Level. На нижнем графике рис. 1 видно, что для всех рассматриваемых  $x$  значение  $\psi(x)$  меньше 3. Поскольку  $\psi(x) > 1$  на промежутке  $(0,443; 2,9492)$ , то, стартовав из любой точки этого промежутка, в идеальном случае алгоритм сходится в точке  $x = 2,9492$ . Заметим, что для  $x \in (2,9492; 3]$  выполняется условие  $x < \psi(x)$ .

Запустим алгоритм с шестого шага в стартовой точке  $x_0 = 1,16$ . Получим следующую последовательность (с точностью вычислений до 0,0001):  $x_1 = \psi(x_0) = 1,5922$ ;  $x_2 = \psi(x_1) = 2,1861$ ;  $x_3 = \psi(x_2) = 2,7021$ ;  $x_4 = \psi(x_3) = 2,9041$ ;  $x_5 = \psi(x_4) = 2,9427$ ;  $x_6 = \psi(x_5) = 2,9483$ ;  $x_7 = \psi(x_6) = 2,9491$ ;  $x_8 = \psi(x_7) = 2,9492$ ;  $x_9 = \psi(x_8) = 2,9492$ ; где  $x_8 = x_9$ . Таким образом, эта последовательность дает примерное представление о количестве повторений наиболее трудоемкого шестого шага алгоритма.

В заключение отметим, что вероятность  $P(|X| < x\sigma)$  попадания нормально распределенной случайной величины  $X$  на участок  $(-x\sigma; +x\sigma)$ , где  $x \in (0,443; 0,8911]$ , принадлежит промежутку от 0,34 до 0,63. Этот участок соответствует значениям функции  $\varphi(x)$  из интервала  $(1; 1,3]$ . Таким образом, одно из условий выхода из цикла на шаге 4 алгоритма, требующее обработки более 30% всех сигналов, ориентировано на дефектограммы, которые содержат от 90% до 50% сигналов шума.

### 3. Примеры

**Пример 1.** На верхнем графике рис. 2 представлена дефектограмма, записанная 8-разрядным магнитным дефектоскопом на 50-метровом участке рельсового пути. Средний график — фрагмент записи, который соответствует сварному стыку (соединению) рельсов. Регистрация данных проводилась каждый миллиметр пути (ось X). Амплитудное значение сигнала, полученное на одном шаге сканирования, откладывается по оси Y. Нижний график рис. 2 представляет собой оценку плотности распределения вероятности появления некоторой амплитуды на рассматриваемом участке рельсов. На всех графиках рис. 2 показаны результаты алгоритма в виде линий отсечки шума рельсов и уровня начала полезных сигналов. Для вычисления порогового уровня шума рельсов Level потребовалось 6 основных итераций алгоритма:  $Level_0 = 9,5706$ ,  $Level_1 = 17,1632$ ,  $Level_2 = 26,1227$ ,  $Level_3 = 29,6068$ ,  $Level_4 = 29,9479$ ,  $Level_5 = 29,9726$ ,  $Level_6 = 29,9726 = Level$ .

**Пример 2.** На верхнем графике рис. 3 представлена дефектограмма 8-разрядного магнитного дефектоскопа (запись данных с 50-метрового участка пути). Средний график — фрагмент записи, соответствующий болтовому стыку рельсов с боковыми соединительными накладками. Нижний график рис. 3 — оценка плотности

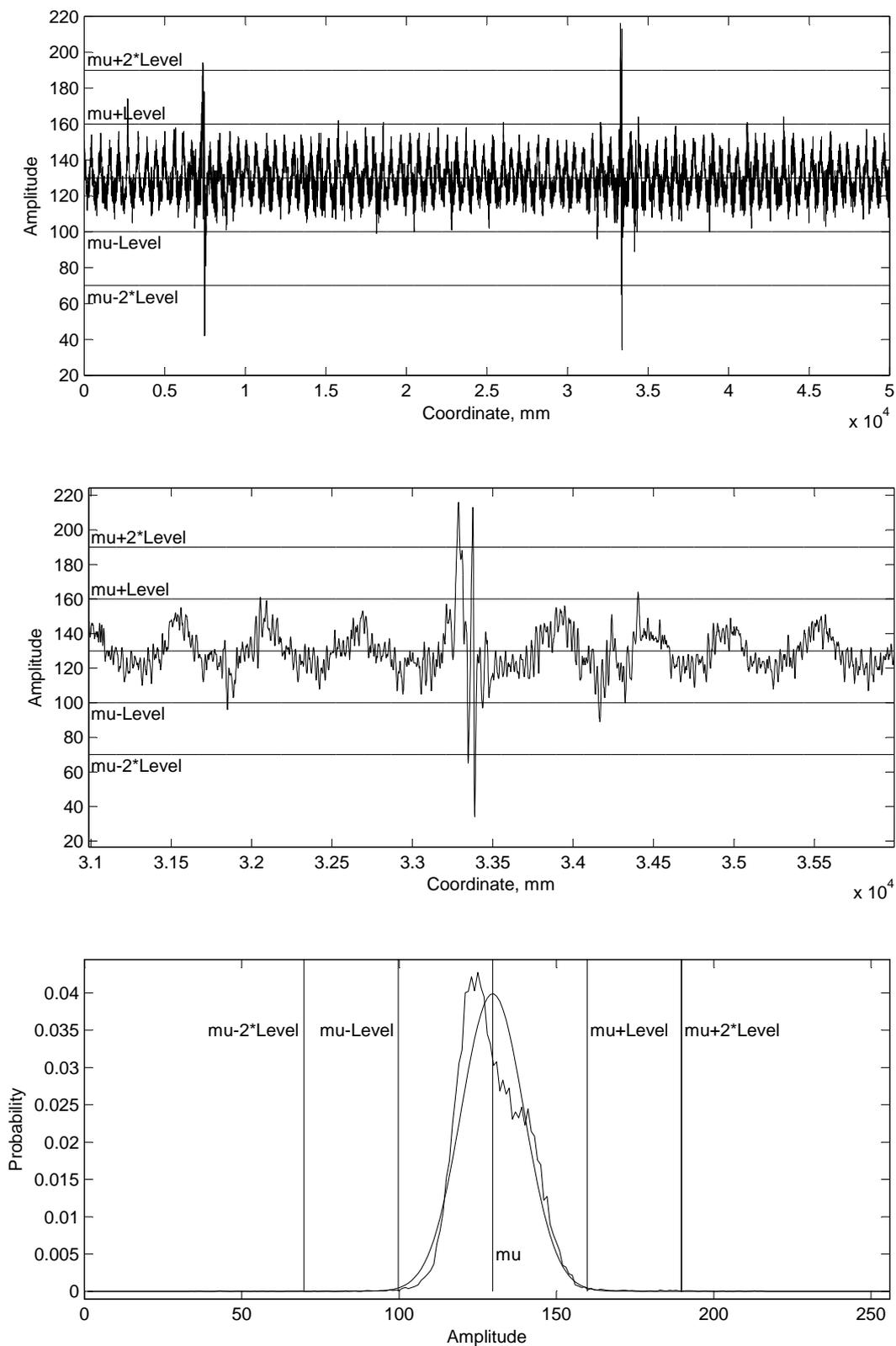


Рис. 2. Представления данных дефектограмм с результатами работы алгоритма  
 Fig. 2. Representations of flaw detector data and algorithm work results

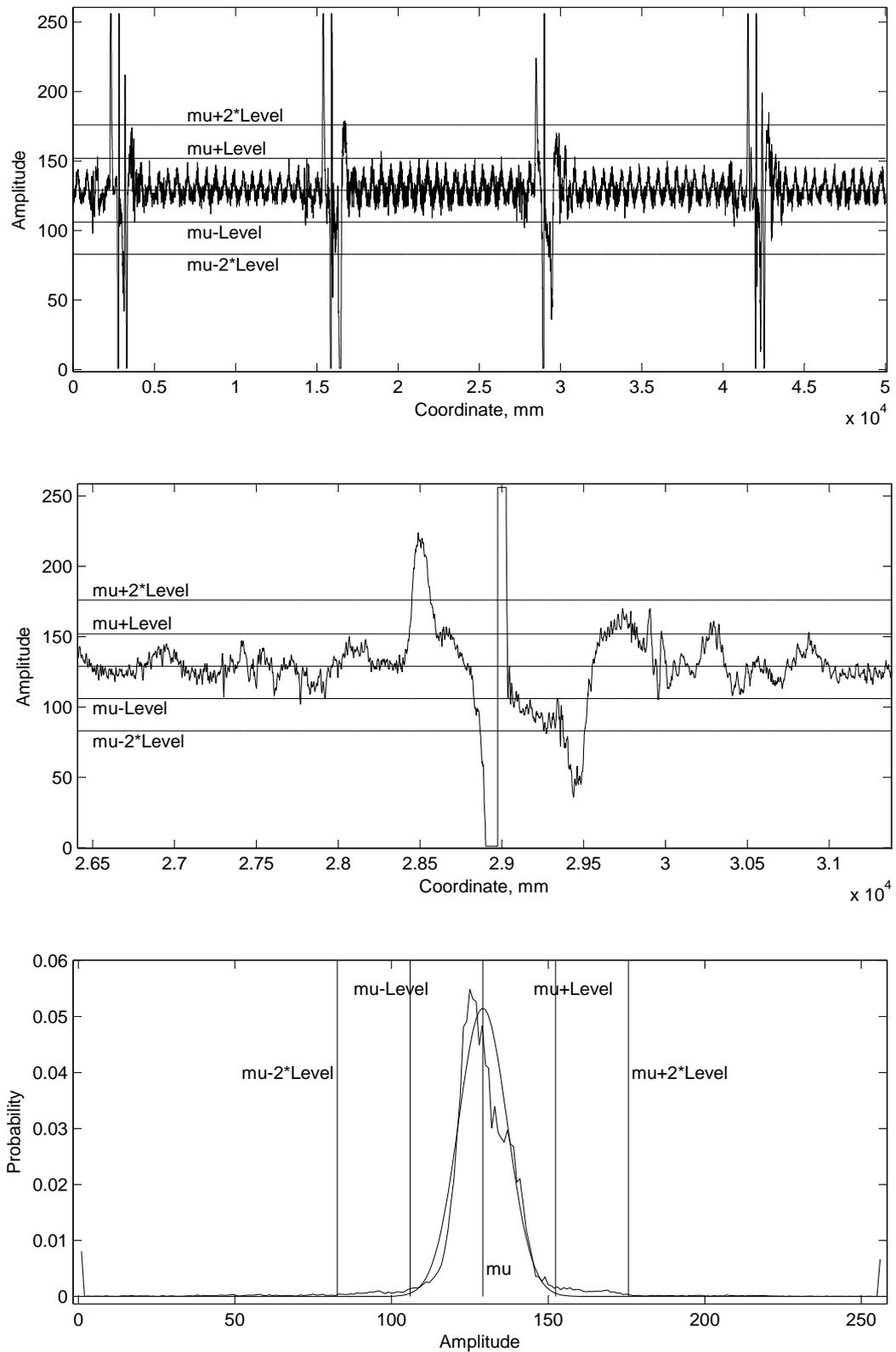


Рис. 3. Представления данных дефектограмм с результатами работы алгоритма  
Fig. 3. Representations of flaw detector data and algorithm work results

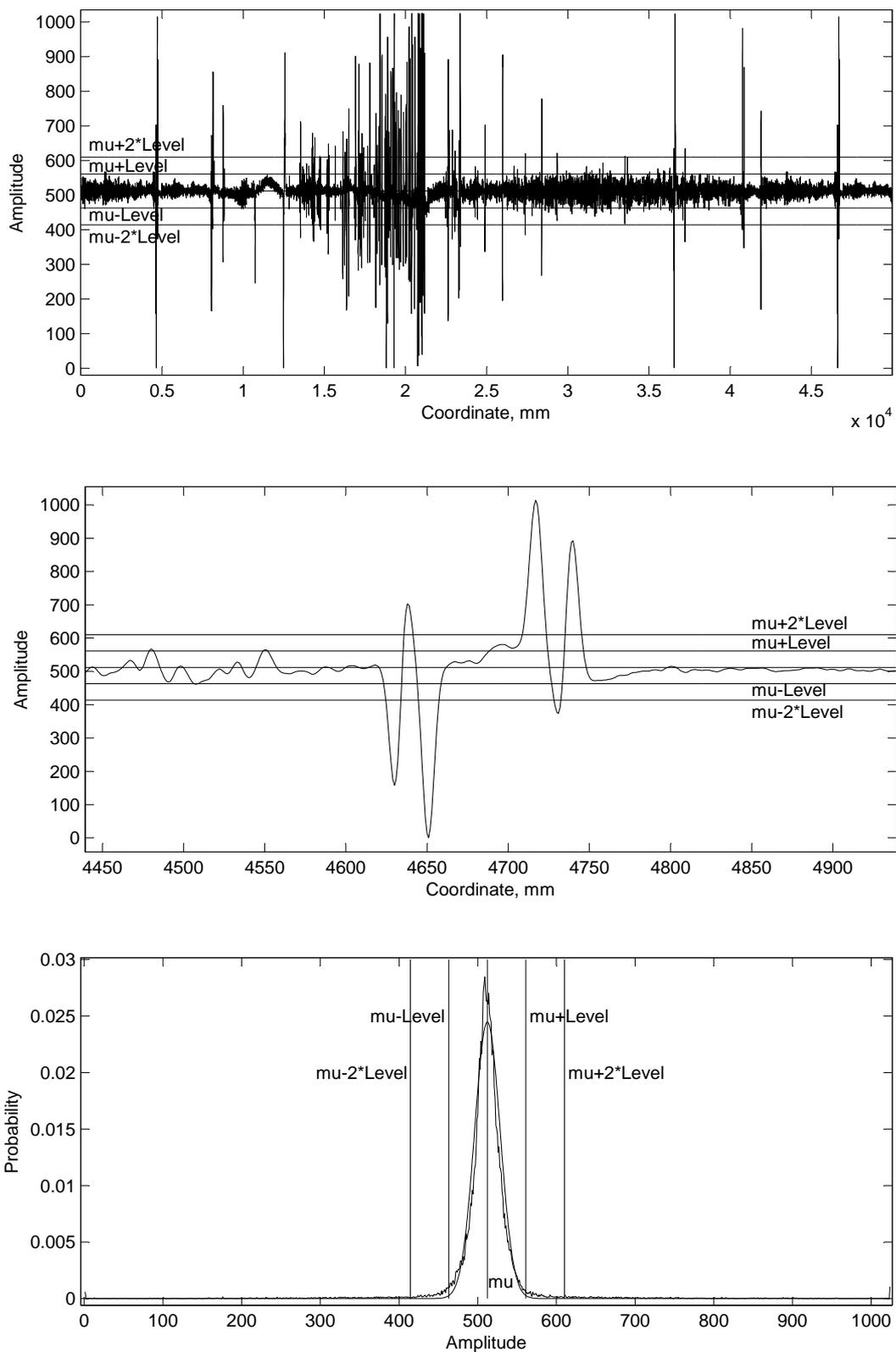


Рис. 4. Представления данных дефектограмм с результатами работы алгоритма  
 Fig. 4. Representations of flaw detector data and algorithm work results

распределения вероятности появления некоторой амплитуды на рассматриваемом участке рельсов. На всех графиках рис. 3 показаны результаты алгоритма в виде линий отсечки шума рельсов и уровня начала полезных сигналов. Для вычисления порогового уровня шума рельсов Level потребовалось 7 основных итераций алгоритма:  $Level_0 = 6,0095$ ,  $Level_1 = 11,0208$ ,  $Level_2 = 17,2490$ ,  $Level_3 = 21,1645$ ,  $Level_4 = 22,5926$ ,  $Level_5 = 23,0529$ ,  $Level_6 = 23,1936$ ,  $Level_7 = 23,1936 = Level$ .

**Пример 3.** На верхнем графике рис. 4 представлена дефектограмма, которая была записана 10-разрядным вихретоковым дефектоскопом на 50-метровом участке рельсового пути. Средний график — фрагмент записи, соответствующий сварному стыку рельсов. Шаг сканирования — 1 мм. Нижний график рис. 4 — оценка плотности распределения вероятности появления некоторой амплитуды на рассматриваемом участке рельсов. На всех графиках рис. 4 показаны результаты алгоритма в виде линий отсечки шума рельсов и уровня начала полезных сигналов. Для вычисления порогового уровня шума рельсов Level потребовалось 8 основных итераций алгоритма:  $Level_0 = 11,0542$ ,  $Level_1 = 18,6767$ ,  $Level_2 = 28,0950$ ,  $Level_3 = 37,2262$ ,  $Level_4 = 43,4621$ ,  $Level_5 = 46,7912$ ,  $Level_6 = 48,2453$ ,  $Level_7 = 48,7251$ ,  $Level_8 = 48,7251 = Level$ .

На рассмотренных примерах видно, что шум рельсов (в приближении) подчиняется закону нормального распределения вероятностей. График оценки плотности распределения шума близок к графику плотности нормального распределения с параметрами  $\mu$  и Level, где  $\mu$  — математическое ожидание, а Level — среднее квадратическое отклонение.

## Список литературы / References

- [1] Марков А. А., Кузнецова Е. А., *Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 1. Основы*, КультИнформПресс, СПб., 2010; [Markov A. A., Kuznetsova E. A., *Rails flaw detection. Formation and analysis of signals. Book 1. Principles*, KultInformPress, St. Petersburg, 2010, (in Russian).]
- [2] Марков А. А., Кузнецова Е. А., *Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 2. Расшифровка дефектограмм*, Ультра Принт, СПб., 2014; [Markov A. A., Kuznetsova E. A., *Rails flaw detection. Formation and analysis of signals. Book 2. Data interpretation*, Ultra Print, St. Petersburg, 2014, (in Russian).]
- [3] Тарабрин В. Ф., Зверев А. В., Горбунов О. Е., Кузьмин Е. В., “О фильтрации данных при автоматической расшифровке дефектограмм АПК «АСТРА»”, *В мире неразрушающего контроля*, **64**:2 (2014), 5–9; [Tarabrin V. F., Zverev A. V., Gorbunov O. E., Kuzmin E. V., “About Data Filtration of the Defectogram Automatic Interpretation by Hardware and Software Complex “ASTRA””, *NDT World*, **64**:2 (2014), 5–9, (in Russian).]
- [4] Тарабрин В. Ф., Кузьмин Е. В., Горбунов О. Е., Зверев А. В., “Об определении динамического порога уровня сигналов при автоматической расшифровке дефектограмм АПК «АСТРА»”, *Сборник тезисов научных докладов XX Всероссийской научно-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике*, ИД «Спектр», М., 2014, 145–147; [Tarabrin V. F., Kuzmin E. V., Gorbunov O. E., Zverev A. V., “Ob opredelenii dinamicheskogo poroga urovnya signalov pri avtomaticheskoy rasshifrovke defektogramm APK “ASTRA””, *Sbornik tezisov nauchnykh докладов XX vserossiyskoy nauchno-technicheskoy konferentsii po nerazrushayuschemu kontrolyu I tekhnicheskoy diagnostike*, Izdatlskiy dom “Spektr”, Moscow, 2014, 145–147, (in Russian).]
- [5] Вентцель Е. С., Овчаров Л. А., *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*, Высшая школа, М., 2000; [Ventcel E. S., Ovcharov L. A., *Probability Theory and Its Engineering Applications*, Vysshaya Shkola Publishers, Moscow, 2000, (in Russian).]

- [6] Гмурман В. Е., *Теория вероятностей и математическая статистика*, Высшая школа, М., 2004; [Gmurman V. E., *Probability Theory and Mathematical Statistics*, Vysshaya Shkola Publishers, Moscow, 2004, (in Russian).]
- [7] Феллер В., *Введение в теорию вероятностей и ее приложения*, Пер. с англ. Т. 1–2, Мир, М., 1984; [Feller W., *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*. V. I–II, John Wiley & Sons, 1970–1971.]

---

**Kuzmin E. V., Gorbunov O. E., Plotnikov P. O., Tyukin V. A.**, "On Finding a Threshold of Useful Signals in the Analysis of Magnetic and Eddy Current Defectograms", *Modeling and Analysis of Information Systems*, **24:6** (2017), 760–771.

DOI: 10.18255/1818-1015-2017-6-760-771

**Abstract.** To ensure traffic safety of railway transport, non-destructive testing of rails is regularly carried out by using various approaches and methods, including magnetic and eddy current flaw detection methods. The paper is devoted to the problem of automatic determination of a threshold level of amplitudes of useful signals (from defects and structural elements of a railway track) during the analysis of defectograms (records) of magnetic and eddy current flaw detectors. A signal is considered useful (and is subject to further analysis) if a deviation of its value from an average of all signals is at least twice the threshold noise level of rails. The probability of obtaining a signal from a section without structural elements (a rail noise signal) is characterized by the normal distribution law. Thus, the rule of three sigma can be used to calculate the threshold noise level. And a signal is useful if its amplitude deviation from a sample mean exceeds twice the threshold noise level. The paper proposes an algorithm for finding the threshold level of a rail noise and gives its theoretical justification, and it also examines examples of its operation on several fragments of real magnetic and eddy current defectograms.

**Keywords:** nondestructive testing, magnetic and eddy current testing, rail flaw detection, automated analysis of magnetic and eddy current defectograms

**On the authors:**

Egor V. Kuzmin, [orcid.org/0000-0003-0500-306X](https://orcid.org/0000-0003-0500-306X), doctor of science, associate professor, P.G. Demidov Yaroslavl State University, 14 Sovetskaya str., Yaroslavl, 150003 Russia, e-mail: [kuzmin@uniyar.ac.ru](mailto:kuzmin@uniyar.ac.ru), [kuzminev@nddlab.com](mailto:kuzminev@nddlab.com)

Oleg E. Gorbunov, [orcid.org/0000-0001-6274-9971](https://orcid.org/0000-0001-6274-9971), PhD, general director, Center of Innovative Programming, NDDLlab, 144 Soyuznaya str., Yaroslavl, 150008 Russia, e-mail: [gorbunovoe@nddlab.com](mailto:gorbunovoe@nddlab.com)

Petr O. Plotnikov, [orcid.org/0000-0001-5687-7969](https://orcid.org/0000-0001-5687-7969), production engineer, Center of Innovative Programming, NDDLlab, 144 Soyuznaya str., Yaroslavl, 150008 Russia, e-mail: [plotnikovpo@nddlab.com](mailto:plotnikovpo@nddlab.com)

Vadim A. Tyukin, [orcid.org/0000-0001-9149-7435](https://orcid.org/0000-0001-9149-7435), head of software development, Center of Innovative Programming, NDDLlab, 144 Soyuznaya str., Yaroslavl, 150008 Russia, e-mail: [tyukinva@nddlab.com](mailto:tyukinva@nddlab.com)

**Acknowledgments:**

<sup>1</sup> This work was supported by the Program of YSU development for the period 2017-2021 as a basic university of the Yaroslavl region. The event "Development of Innovative Active Divisions of the University in Priority Areas of the Region's Economy". Direction "Modernization of Research and Innovation Activities, Including the Development of the University's Innovative Ecosystem".