

Т. А. Алиев<sup>1, 2</sup>, д-р техн. наук, академик, telmancyber@gmail.com,

Н. Ф. Мусаева<sup>1, 2</sup>, д-р техн. наук, musanaila@gmail.com,

М. Т. Сулейманова<sup>1</sup>, диссертант, metanet\_suli@yahoo.com,

<sup>1</sup> Институт систем управления НАН Азербайджана, г. Баку,

<sup>2</sup> Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку

## Алгоритмы определения вероятности рисков аварий в туннелях по характеристикам помехи зашумленных сигналов

*Обсуждается разработка алгоритмов вычисления вероятности возникновения в туннелях различного рода дефектов, развитие которых может привести к авариям. Отмечено, что туннели являются важной и сложной частью транспортно-коммуникационной системы, по которой осуществляется интенсивное движение. Поэтому определение вероятности возникновения дефектов в скрытом периоде зарождения на отдельных участках туннелей является важной задачей.*

*Отмечено, что образование дефектов сопровождается появлением помех, которые искажают полезные сигналы, поступающие от датчиков и измерительных приборов, установленных для контроля устойчивости туннеля и надежности его конструкций. Традиционно в таких случаях измерительные приборы регистрируют зашумленные сигналы, и по значениям их характеристик оценивают техническое состояние туннелей. Однако в работе показано, что более надежными индикаторами фиксации начала опасных изменений в скрытом периоде зарождения являются характеристики помехи, которую невозможно выделить из зашумленного сигнала. При этом отмечено, что вероятности, с которой помеха принимает допустимые и критические значения, являются показателем изменения технического состояния туннелей. Поэтому разработаны алгоритмы вычисления вероятностей попадания значений помехи в заданные интервалы. Показано, что эти вероятности хранятся как эталонные множества начала зарождения дефектов туннелей. После проведенного обучения значениям вероятностей, с которыми помеха принимает заданные значения в различные моменты времени, ставится в соответствие вид дефекта и одно из возможных технических состояний: исправное, работоспособное, частично работоспособное, неработоспособное; предаварийное; аварийное и т. п.*

*Кроме того, показано, что разности вероятностей, с которыми помеха принимает одни и те же значения в различные моменты, являются показателями динамики изменения возникшей неисправности в туннели. В работе также создана база информативных признаков интенсивности развития неисправностей. Для данной базы определены такие показатели динамики развития дефекта, как незначительное, медленное, существенное, интенсивное.*

**Ключевые слова:** полезный сигнал, помеха, зашумленный сигнал, вероятность попадания помехи в заданный интервал, вероятности допустимых и критических значений помехи, туннель, вид неисправности туннеля

### Введение

Известно, что туннели представляют собой сложные сооружения, которые служат для транспортных целей. При этом с точки зрения риска аварий железнодорожные и автодорожные туннели являются наиболее опасными. Это связано с тем, что туннели чаще всего проходят через горные массивы или под водой [1–4]. Поэтому на туннели оказывают давление горные породы, грунтовые и подземные воды. В результате возникают коррозионные процессы, которые приводят к уменьшению прочности железобетонных конструкций и, как итог, являются причиной их разрушения. Причинами разрушений туннелей также являются вибрационные процессы, возникающие от движения транспорта. Сотрясения, которым подвергаются туннели, приводят к деформациям, трещинам, износам, поломкам основных конструкций [1–4].

Традиционно для контроля технического состояния туннеля создаются системы мониторинга и контроля напряженно-деформационных со-

стояний основных конструкций, что позволяет избежать как риска разрушений самих туннелей, так и аварий транспортных средств [1–4]. Для этого выполняется геодезический мониторинг, в процессе которого проводятся наблюдения за состоянием грунтового массива, проверяется наличие деформации породы, определяются вертикальные или горизонтальные смещения, выявляются трещины и т. д. С этой целью устанавливается система датчиков давления, перемещения, нагрузки на арматуру и анкера, датчики раскрытия трещин, инклинометры и др. С помощью этих датчиков проводятся замеры, которые затем обрабатываются и анализируются традиционными методами статистической обработки данных [5–14]. На основании полученных результатов делается заключение о техническом состоянии туннеля, наличии дефектов и степени их опасности для эксплуатации транспортных средств, а также выдаются рекомендации по устранению возникших неисправностей [1–14].

Однако существующие системы мониторинга и контроля туннелей не обеспечивают

контроль скрытого периода изменения технического состояния тоннелей [1–14]. Это особенно важно для стран сейсмоактивных регионов и регионов, подверженных воздействию опасных геологических процессов, так как после маломощных, но частых землетрясений или незначительных, но многократных оползней появляются невидимые и не поддающиеся обнаружению микроскопические трещины, деформации, изгибы и т. д., которые впоследствии могут привести к серьезным повреждениям, требующим больших затрат [1–14].

В работах [1, 15–18] показано, что образование даже самых незначительных повреждений сопровождается появлением аддитивных помех в сигналах, которые поступают от соответствующих датчиков. При этом применение технологии обработки помехи зашумленных сигналов в системах noise-мониторинга и noise-контроля позволяет выявлять ранний скрытый период образования дефекта и определить динамику его развития, а также вычислять вероятность риска возникновения аварий в тоннелях.

### Постановка задачи

Известно [1–14], что для определения технического состояния тоннелей вычисляются статистические характеристики сигналов, которые поступают от датчиков давления, перемещения, нагрузки, раскрытия трещин, инклинометров и др. При нормальном состоянии тоннелей эти сигналы могут быть искажены помехами только под влиянием внешних факторов  $\varepsilon_1(t)$ , происхождение которых обычно известно. При появлении дефектов, износов, коррозии, трещин, поломок и др. неисправностей возникает дополнительная помеха  $\varepsilon_2(t)$ . Таким образом, суммарная помеха  $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$  состоит из двух составляющих, и от датчиков вместо полезного сигнала  $x(t)$  поступает зашумленный сигнал  $g(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ . При этом помеха  $\varepsilon_2(t)$  отражает процессы, приводящие к зарождению дефектов в тоннелях, и по значениям ее характеристик можно выявить ранний период возникновения неисправности. Кроме того, зная вероятность, с которой помеха может принимать заданные критические значения, можно определить динамику развития неисправности за определенный промежуток времени [1, 15–18].

В то же время сигналы  $x(t)$ ,  $\varepsilon(t)$ ,  $g(t)$  обычно являются случайными стационарными эргодическими процессами, и помеху  $\varepsilon(t)$  невозможно выделить из зашумленного сигнала  $g(t)$ .

Поэтому возникает задача определения ранней стадии возрождения дефекта в тоннеле и динамики его развития в результате вычисления вероятности достижения помехой критического порогового значения. Это позволит уменьшить риск аварий в тоннелях с тяжелыми катастрофическими последствиями.

Предположим, что от датчика поступает случайный зашумленный сигнал  $g(t)$ , для которого можно вычислить математическое ожидание  $m_g$ , дисперсию  $D_g$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_g$ , корреляционную функцию  $R_{gg}(\tau)$  по следующим формулам [1, 15–19]:

$$m_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t); \quad (1)$$

$$D_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - m_g]^2; \quad (2)$$

$$\sigma_g = \sqrt{D_g}; \quad (3)$$

$$R_g(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+\mu)\Delta t), \quad (4)$$

где  $g(t) = g(t) - m_g$ ;  $\Delta t$  — шаг дискретизации;  $\mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ , — временной сдвиг.

Известно, что вероятность  $P(\alpha \leq \varepsilon(t) \leq \beta)$  попадания помехи  $\varepsilon(t)$  в некоторый интервал  $[\alpha, \beta]$  можно вычислить по формуле

$$P(\alpha \leq \varepsilon(t) \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (5)$$

где  $f(\varepsilon)$  — функция плотности распределения помехи  $\varepsilon(t)$ .

В то же время в большинстве случаев помеха подчиняется нормальному закону распределения  $N(\varepsilon, m_\varepsilon, \sigma_\varepsilon)$ , и ее математическое ожидание  $m_\varepsilon = 0$ . Так как помеха является стационарной эргодической [1, 15–18], то

$$N(\varepsilon, m_\varepsilon, \sigma_\varepsilon) = N(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^A, \quad (6)$$

и вероятность  $P(\alpha \leq \varepsilon(t) \leq \beta)$  можно вычислить по формуле

$$P(\alpha \leq \varepsilon(t) \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} N(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (7)$$

где  $A = -\frac{(\varepsilon - m_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}$ .

Ниже предлагается технология определения ранней стадии зарождения дефекта в тоннеле и динамики его развития в результате вычисления вероятности попадания значений помехи в некоторый критический интервал  $[\alpha, \beta]$ .

**Разработка алгоритмов вычисления вероятности попадания помехи в заданный интервал**

Из формулы (7) следует, что для вычисления вероятности попадания помехи в заданный интервал необходимо определить функцию плотности распределения  $N(\varepsilon)$ . Очевидно, что для этого, прежде всего, следует вычислить среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon}$  помехи  $\varepsilon(t)$ . В работах [1, 15–18] показано, что оценку среднего квадратического отклонения  $\sigma_\varepsilon^*$  помехи  $\varepsilon(t)$  зашумленного сигнала  $g(t)$  для реальных технических объектов можно вычислить по выражению

$$\sigma_\varepsilon^* = \sqrt{R_g(0) - 2R_g(\Delta t) + R_g(2\Delta t)}, \quad (8)$$

или

$$\sigma_\varepsilon^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g(i\Delta t) - 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+2)\Delta t)}.$$

Кроме того, в работах [1, 15–18] выведена формула вычисления среднего квадратического отклонения помехи для частного случая, когда помеха является белым шумом:

$$\sigma_\varepsilon^* = \sqrt{R_g(0) - R_g(\Delta t)}. \quad (9)$$

Тогда функция плотности распределения помехи  $\varepsilon(t)$  с учетом того, что математическое ожидание помехи  $m_\varepsilon = 0$ , будет определяться следующим образом:

$$N^*(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon^* \sqrt{2\pi}} e^{A_1}, \quad (10)$$

где  $A_1 = -\frac{\varepsilon^2}{2(\sigma_\varepsilon^*)^2}$ , причем для общего случая

$\sigma_\varepsilon^*$  определяется по выражению (8), а для частного случая – по выражению (9).

Очевидно, что вероятность попадания помехи  $\varepsilon(t)$  в некоторый интервал  $[\alpha, \beta]$  можно вычислить по формуле

$$P(\alpha \leq \varepsilon(t) \leq \beta) = \int_\alpha^\beta N^*(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (11)$$

Таким образом, зная вероятность, с которой помеха  $\varepsilon(t)$  принимает критические значения в различные моменты времени, можно определить ранний скрытый период возникновения дефектов тоннелей, а также динамику их развития, что позволит своевременно предотвратить аварийные ситуации.

**Алгоритмы определения вероятности рисков аварий в тоннелях по характеристикам помехи зашумленных сигналов**

Известно, что для предотвращения риска аварий в тоннелях необходимо проводить контроль случайных сигналов, которые поступают от датчиков давления, перемещения, нагрузки на арматуру и анкера, датчиков раскрытия трещин, инклинометров и др., в реальном масштабе времени. При этом основной задачей существующих систем мониторинга является обнаружение раннего, скрытого периода зарождения неисправностей, чтобы не доводить ситуацию до аварий и разрушений с катастрофическими последствиями. Кроме того, необходимо определить динамику развития неисправности в скрытом периоде зарождения [1, 15–18, 20].

Проведенные исследования показали, что, вычислив динамику изменения вероятности,

с которой помеха принимает допустимые значения, можно определить степень развития неисправности во времени. Поэтому ниже предлагается алгоритм вычисления вероятности возникновения и развития дефектов тоннелей, позволяющий значительно уменьшить риск возможных аварий. Данный алгоритм сводится к следующему.

1. В начальный период времени  $t_0$ , когда тоннель находится в исправном состоянии, вычисляются дисперсии  $D_{\varepsilon, t_0}^*$ ,  $D_{x, t_0}^*$  помехи  $\varepsilon(t)$  и полезного сигнала  $x(t)$  по выражениям

$$D_{\varepsilon, t_0}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g(i\Delta t) - 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+2)\Delta t);$$

$$D_{x, t_0}^* = D_{g, t_0} - D_{\varepsilon, t_0}^*,$$

где  $D_{g, t_0}$  вычисляется по выражению (2).

2. Вычисляется соотношение полезный сигнал/помеха в момент времени  $t_0$ , когда тоннель находится в исправном состоянии:

$$SP_{t_0} = D_{x, t_0}^* / D_{\varepsilon, t_0}^*.$$

Значение  $SP_{t_0}$  фиксируется и заносится в базу информативных признаков как эталонное значение исправного состояния тоннеля.

Затем для момента времени  $t_0$  вычисляются вероятности допустимых значений помехи  $\varepsilon(t)$ ,

т. е. тех значений помехи, в пределах которых считается, что повреждения отсутствуют. Учитывая, что для нормально распределенного случайного параметра отклонение от математического ожидания по абсолютной величине не превышает утроенного среднего квадратического отклонения, в начальный период времени  $t_0$  дискретные значения функции плотности распределения  $N^*(\varepsilon)_{t_0}$  помехи  $\varepsilon(t)$  следовало бы вычислять в интервале  $m_\varepsilon \pm 3\sigma_{\varepsilon,t_0}^*$ . Однако, принимая во внимание, что в последующие моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_m$  этот интервал может быть шире, заранее выбирается достаточно большой интервал возможных значений помехи исходя из условия

$$m_\varepsilon - k\sigma_{\varepsilon,t_0}^* \leq \varepsilon(t) \leq m_\varepsilon + k\sigma_{\varepsilon,t_0}^*,$$

где  $k$  — выбранный коэффициент.

Затем в этом интервале:

— с учетом условия  $m_\varepsilon = 0$  вычисляются минимальное и максимальное значения помехи  $\varepsilon(t)$ :  $\varepsilon_{\min} = -k\sigma_{\varepsilon,t_0}^*$ ;  $\varepsilon_{\max} = k\sigma_{\varepsilon,t_0}^*$ ;

— с определенным шагом  $\Delta\varepsilon$  задаются значения помехи  $\varepsilon(t)$  в порядке возрастания от  $\varepsilon_{\min}$  до  $\varepsilon_{\max}$ :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\min}, \varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \Delta\varepsilon, \varepsilon_{i+2} = \varepsilon_{i+1} + \Delta\varepsilon, \dots, \varepsilon_n = \varepsilon_{\max}, \quad (12)$$

и формируется последовательность допустимых значений помехи  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ , для которой выполняется условие  $\varepsilon_{i-1} < \varepsilon_i$ .

Затем для момента времени  $t_0$  в точках  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  для помехи  $\varepsilon(t)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon,t_0}^* = \sqrt{D_{\varepsilon,t_0}^*}$  вычисляется функция плотности нормального распределения:

$$N^*(\varepsilon_i)_{t_0} = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon,t_0}^* \sqrt{2\pi}} e^{A_{t_0}},$$

$$\text{где } A_{t_0} = -\frac{(\varepsilon_i)^2}{2(\sigma_{\varepsilon,t_0}^*)^2}.$$

После этого для момента времени  $t_0$  вычисляются вероятности попадания значений помехи  $\varepsilon(t)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon,t_0}^*$  в допустимые интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$ :

$$\begin{aligned} P_{1,t_0}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) &= \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} N^*(\varepsilon)_{t_0} d\varepsilon, \\ P_{2,t_0}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) &= \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} N^*(\varepsilon)_{t_0} d\varepsilon, \dots, \\ P_{(n-1),t_0}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) &= \int_{\varepsilon_{n-1}}^{\varepsilon_n} N^*(\varepsilon)_{t_0} d\varepsilon. \end{aligned} \quad (13)$$

Значения этих вероятностей заносятся в базу информативных признаков как эталонные значения, соответствующие исправному состоянию тоннелей.

Через некоторый промежуток времени в момент  $t_1$  заново вычисляется соотношение полезный сигнал/помеха  $SP_{t_1} = D_{x,t_1}^*/D_{\varepsilon,t_1}^*$ .

Если  $SP_{t_1} = SP_{t_0}$ , то в техническом состоянии тоннеля нет изменения. Если

$$SP_{t_1} \neq SP_{t_0}, \quad (14)$$

то это означает, что в техническом состоянии тоннеля произошли изменения.

Неравенство (14) может выполняться при возникновении двух видов изменений в техническом состоянии тоннелей:

1) в текущем состоянии тоннеля есть изменения, которые обусловлены изменениями внешней среды, например, заменой вентиляционных комплексов и др. В то же время в техническом состоянии несущих конструкций, подземных и надземных вестибюлей и т. д. дефекты и неисправности не наблюдаются. Эти изменения влияют только на характеристики полезного сигнала  $x(t)$ , но не отражаются на характеристиках помехи  $\varepsilon(t)$ . В таком случае для дисперсии полезного сигнала выполняется неравенство  $D_{x,t_0}^* \neq D_{x,t_1}^*$ , а для дисперсии помехи выполняется равенство  $D_{\varepsilon,t_0}^* = D_{\varepsilon,t_1}^*$ . Подобного рода изменения и реконструкции бывают известны заранее, и для этих случаев заново вычисляется и заносится в базу эталонных множеств новое значение  $SP_{t_0}$  для нормального состояния тоннеля;

2) в техническом состоянии колонн, пилонов, прогонов, перекрытий, стен и др. появились износы, коррозии, трещины, поломки, деформации, повреждения, дефекты и другие неисправности, что является предвестником возможности возникновения аварий. В этом случае для дисперсий полезного сигнала выполняется условие  $D_{x,t_0}^* = D_{x,t_1}^*$ , а для дисперсии помехи выполняется условие  $D_{\varepsilon,t_0}^* \neq D_{\varepsilon,t_1}^*$ , причем  $D_{\varepsilon,t_1}^* > D_{\varepsilon,t_0}^*$ .

В подобных случаях необходимо за промежуток времени  $t_1 - t_0$  определить вероятность, с которой изменилось техническое состояние тоннеля, и с какой вероятностью можно оценить его как исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, аварийное и т. п. Поэтому необходимо опять вычислить вероятности для возможных значений помехи  $\varepsilon(t)$ .

Для этого сначала для момента времени  $t_1$  в точках  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  для помехи  $\varepsilon(t)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon,t_1}^* = \sqrt{D_{\varepsilon,t_1}^*}$  вы-

числяется функция плотности нормального распределения  $N^*(\varepsilon)_{t_1}$ :

$$N^*(\varepsilon_i)_{t_1} = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon,t_1}^* \sqrt{2\pi}} e^{A_{t_1}},$$

где  $A_{t_1} = -\frac{(\varepsilon_i)^2}{2(\sigma_{\varepsilon,t_1}^*)^2}$ .

Затем для момента времени  $t_1$  вычисляются вероятности попадания значений помехи  $\varepsilon(t)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon,t_1}^*$  в допустимые интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$ :

$$\begin{aligned} P_{1,t_1}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) &= \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} N^*(\varepsilon)_{t_1} d\varepsilon, \\ P_{2,t_1}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) &= \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} N^*(\varepsilon)_{t_1} d\varepsilon, \dots, \\ P_{(n-1),t_1}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) &= \int_{\varepsilon_{n-1}}^{\varepsilon_n} N^*(\varepsilon)_{t_1} d\varepsilon. \end{aligned} \quad (15)$$

После этого вычисляется разность вероятностей, с которыми помеха  $\varepsilon(t)$  попадает в интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_0$ :

$$\begin{aligned} &P_{1,t_1-t_0}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) = \\ &= P_{1,t_1}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) - P_{1,t_0}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2); \\ &P_{2,t_1-t_0}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) = \\ &= P_{2,t_1}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) - P_{2,t_0}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3); \\ &\dots \\ &P_{(n-1),t_1-t_0}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) = \\ &= P_{(n-1),t_1}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) - \\ &- P_{(n-1),t_0}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n). \end{aligned} \quad (16)$$

Превышение разностями этих вероятностей допустимых значений

$$\begin{aligned} P_{1,t_1-t_0}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) &\geq \Delta_1, \\ P_{2,t_1-t_0}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) &\geq \Delta_2, \dots, \\ P_{(n-1),t_1-t_0}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) &\geq \Delta_{n-1} \end{aligned}$$

является информативным признаком возникновения дефектов в тоннелях.

Тогда проводятся работы по обнаружению дефекта, а значения вероятностей (15) и разности вероятностей (16) запоминаются как эталонные множества возникновения данного вида дефекта.

Затем аналогичные вычисления выполняются в момент времени  $t_2$ . Для момента времени  $t_2$  вычисляется среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\varepsilon,t_2}^*$  помехи, и в точках  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  определяется функция плотности нормального распределения  $N^*(\varepsilon)_{t_2}$

$$N^*(\varepsilon_i)_{t_2} = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon,t_2}^* \sqrt{2\pi}} e^{A_{t_2}},$$

где  $A_{t_2} = -\frac{(\varepsilon_i)^2}{2(\sigma_{\varepsilon,t_2}^*)^2}$ .

Далее для момента времени  $t_2$  вычисляются вероятности попадания значений помехи  $\varepsilon(t)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon,t_2}^*$  в допустимые интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$ :

$$\begin{aligned} P_{1,t_2}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) &= \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} N^*(\varepsilon)_{t_2} d\varepsilon, \\ P_{2,t_2}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) &= \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} N^*(\varepsilon)_{t_2} d\varepsilon, \dots, \\ P_{(n-1),t_2}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) &= \int_{\varepsilon_{n-1}}^{\varepsilon_n} N^*(\varepsilon)_{t_2} d\varepsilon. \end{aligned}$$

После этого вычисляются разности вероятностей, с которыми помеха  $\varepsilon(t)$  попадает в интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$  в моменты времени  $t_2$  и  $t_1$ :

$$\begin{aligned} &P_{1,t_2-t_1}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) = \\ &= P_{1,t_2}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) - P_{1,t_1}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2); \\ &P_{2,t_2-t_1}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) = \\ &= P_{2,t_2}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) - P_{2,t_1}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3); \\ &\dots \\ &P_{(n-1),t_2-t_1}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) = \\ &= P_{(n-1),t_2}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) - \\ &- P_{(n-1),t_1}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n). \end{aligned}$$

Превышение разностями этих вероятностей допустимых значений

$$\begin{aligned} P_{1,t_2-t_1}(\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2) &\geq \Delta_1, \\ P_{2,t_2-t_1}(\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3) &\geq \Delta_2, \dots, \\ P_{(n-1),t_2-t_1}(\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_n) &\geq \Delta_{n-1} \end{aligned}$$

является информативным признаком динамики развития повреждений в тоннелях. Значения этих вероятностей также заносятся в базу информативных признаков.

После того, как получены значения вероятностей также в моменты времени  $t_3, t_4, \dots, t_k$ , база информативных признаков, которую можно представить в виде матрицы, приобретает следующий вид:

$$TS = \begin{bmatrix} SP_{t_0} & \sigma_{\varepsilon, t_0}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_0} & P_{1, t_0} & P_{2, t_0} & \dots & P_{(n-1), t_0} \\ SP_{t_1} & \sigma_{\varepsilon, t_1}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_1} & P_{1, t_1} & P_{2, t_1} & \dots & P_{(n-1), t_1} \\ SP_{t_2} & \sigma_{\varepsilon, t_2}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_2} & P_{1, t_2} & P_{2, t_2} & \dots & P_{(n-1), t_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ SP_{t_k} & \sigma_{\varepsilon, t_k}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_k} & P_{1, t_k} & P_{2, t_k} & \dots & P_{(n-1), t_k} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

После проведения соответствующего обучения каждой строке матрицы ставится в соответствие одно из возможных технических состояний тоннеля. В таком случае к матрице (17) добавляется новый столбец со значениями, соответствующими техническому состоянию тоннеля:

$$TS = \begin{bmatrix} SP_{t_0} & \sigma_{\varepsilon, t_0}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_0} & P_{1, t_0} & P_{2, t_0} & \dots & P_{(n-1), t_0} & 0 \\ SP_{t_1} & \sigma_{\varepsilon, t_1}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_1} & P_{1, t_1} & P_{2, t_1} & \dots & P_{(n-1), t_1} & 1 \\ SP_{t_2} & \sigma_{\varepsilon, t_2}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_2} & P_{1, t_2} & P_{2, t_2} & \dots & P_{(n-1), t_2} & 2 \\ \dots & \dots \\ SP_{t_k} & \sigma_{\varepsilon, t_k}^* & N^*(\varepsilon_i)_{t_k} & P_{1, t_k} & P_{2, t_k} & \dots & P_{(n-1), t_k} & k \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где 0 — исправное; 1 — работоспособное без повреждений; 2 — ограниченно работоспособное и имеется незначительное повреждение; 3 — ограниченно работоспособное, но возникшее незначительное повреждение развивается интенсивно; 4 — неработоспособное; 5 — предаварийное; 6 — аварийное и т. п. в зависимости от значений вероятностей в данный момент времени.

Кроме матрицы технического состояния (18) также составляется матрица динамики развития повреждений, которая состоит из разностей вероятностей попадания значений помехи  $\varepsilon(t)$  в допустимые интервалы  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon(t) < \varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_{n-1} \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_n$  в моменты времени  $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ . После обучения каждому значению разности вероятностей ставится в соответствие определенная степень динамики развития неисправности: 0 — повреждение отсутствует; 1 — повреждение существует, но находится в неизменном состоянии; 2 — повреждение развивается незначительно; 3 — повреждение развивается неинтенсивно; 4 — повреждение развивается интенсивно; 5 — повреждение бы-

стро приводит к катастрофической ситуации и т. д. В результате получается следующая матрица динамики развития повреждения:

$$DR = \begin{bmatrix} P_{1, t_1 - t_0} & P_{2, t_1 - t_0} & \dots & P_{(n-1), t_1 - t_0} & 0 \\ P_{1, t_2 - t_1} & P_{2, t_2 - t_1} & \dots & P_{(n-1), t_2 - t_1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1, t_k - t_{k-1}} & P_{2, t_k - t_{k-1}} & \dots & P_{(n-1), t_k - t_{k-1}} & k \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Таким образом, используя матрицы (18), (19), можно определить вероятность зарождения дефектов в тоннелях, а также определить вероятность развития этих дефектов с течением времени, что является предпосылкой для определения вероятности риска аварий.

### Заключение

Известно, что в традиционных системах мониторинга технического состояния тоннелей проводится проверка соответствия текущих значений параметров значениям, установленным технической документацией [3—7, 19]. В случае отклонения значений этих параметров от установленных норм информируются соответствующие службы. Однако таким образом не удастся выявить начальный скрытый период возникновения повреждений и дефектов и определить динамику их развития.

Проведенные исследования показали, что одной из возможностей решения этой задачи является вычисление и анализ характеристик помехи, которая появляется при зарождении неисправностей и добавляется к полезному сигналу, поступающему от датчиков перемещения, давления, нагрузки, инклинометров и др. В то же время для определения риска возникновения аварий в тоннелях по характеристикам помехи зашумленных сигналов необходимо знать вероятности, с которыми помеха принимает критические значения, за пределами которых техническое состояние тоннелей считается опасным или же аварийным. Кроме того, для безопасной эксплуатации тоннелей необходимо знать вероятность развития дефектов, так как порой самые незначительные повреждения при определенных природных или техногенных условиях могут интенсивно развиваться и привести к аварийному состоянию достаточно большой участок тоннеля.

Предложенные в работе алгоритмы и технологии позволяют решить обе эти задачи

в результате вычисления вероятностей, с которыми помеха принимает значения, превышающие допустимые нормы в различные моменты времени. Вычисление же разностей этих вероятностей в те же самые моменты времени позволяет определить динамику развития неисправностей. Применение предложенных технологий в системах мониторинга и контроля позволит выявлять поврежденные участки тоннелей на ранней стадии, что предотвращает вероятность риска возникновения аварий.

#### Список литературы

1. **Aliev T.** Noise Control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents. Springer, 2019. 201 p.
2. **Швидкий В. Я., Гресь А. А.** Контролирование деформаций при проходе тоннелей под действующими ВПП аэропорта Шереметьево // *Транспортное строительство*. 2019. № 3. С. 23–25.
3. **Маковский Л. В., Кравченко В. В.** Перспективы создания системы подземных автомагистралей в крупнейших городах и мегаполисах // *Транспортное строительство*. 2018. № 1. С. 11–14.
4. **Шевченко А. А., Кобецкий А. Д., Боев А. О.** Опыт применения автоматизированных систем мониторинга для тоннелей метрополитенов // *Транспортное строительство*. 2019. № 2. С. 26–28.
5. **Noorossana R., Saghaei A., Amiri A.** Statistical Analysis of Profile Monitoring, Wiley, New York, 2012, 332 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Statistical+Analysis+of+Profile+Monitoring-p-9781118071977>.
6. **Алилуев С. В., Большаков А. А., Попов А. Н., Тетерин Д. П.** Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 4. С. 264–269.
7. **Бошляков А. А., Ковалев В. В., Рубцов В. И.** Автоматизация диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Ч. 1 // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 3. С. 180–185.
8. **Weihong (Grace) Guo, Jionghua (Judy) Jin, S. Jack Hu.** Profile Monitoring and Fault Diagnosis Via Sensor Fusion for Ultrasonic Welding // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019. Vol. 141, Iss. 8. P. 081001-1-81001-13. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4043731>.
9. **Yaser Zerehsaz, Chenhui Shao, Jionghua Jin.** Tool wear monitoring in ultrasonic welding using high-order decomposition // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019. Vol. 30, N. 2. P. 657–669. URL: <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1272-4>.
10. **Kim J., Huang Q., Shi J., Chang T.-S.** Online Multichannel Forging Tonnage Monitoring and Fault Pattern Discrimination Using Principal Curve // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2006. Vol. 128, N. 4. P. 944–950. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2193552>.
11. **Amiri A., Zou C., Doroudyan M. H.** Monitoring Correlated Profile and Multivariate Quality Characteristics // *Quality and Reliability Engineering International*. 2013. Vol. 30, N. 1. P. 133–142. URL: <https://doi.org/10.1002/qre.1483>.
12. **Xiaoli Li, Shen Dong, Zhejun Yuan.** Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1999. Vol. 39, N.12. P. 1935–1944. URL: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00021-8).
13. **Jian Guo, Zhaojun Li, Jionghua Jin.** System Reliability Assessment with Multilevel Information Using the Bayesian Melding Method // *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 170. P. 1–268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.020>.
14. **Weihong Guo, Chenhui Shao, Tae Hyung Kim, S. Jack Hu, Jionghua Jin, J. Patrick Spicer, Hui Wang.** Online process monitoring with near-zero misdetection for ultrasonic welding of lithium-ion batteries: An integration of univariate and multivariate methods // *Journal of Manufacturing Systems*. 2016. Vol. 38, N. 1. P. 141–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.01.001>.
15. **Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Газызаде Б. И.** Технологии мониторинга динамики развития повреждений на буровых установках с использованием моментов высоких порядков помехи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21, № 4. С. 213–223.
16. **Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т.** Алгоритмы построения доверительного интервала для математического ожидания помехи и их применение для контроля динамики развития аварий // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21, № 9. С. 521–529.
17. **Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф.** Technologies for Early Monitoring of Technical Objects Using the Estimates of Noise Distribution Density // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2019. Vol. 51, N. 9. P. 12–23.
18. **Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т., Газызаде Б. И.** Analytic representation of the density function of normal distribution of noise // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. Vol. 47(8), N. 4. P. 24–40.
19. **Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: КНОРУС, 2013. 448 с.
20. **Руководство** по техническому диагностированию автотодорожных тоннелей. URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/7UE.html>.

## Algorithms for Determining the Probability of Risks of Accidents in Tunnels Based on the Characteristics of the Noise of Noisy Signals

T. A. Aliev<sup>1,2</sup>, [telmancyber@gmail.com](mailto:telmancyber@gmail.com), N. F. Musaeva<sup>1,2</sup>, [musanaila@gmail.com](mailto:musanaila@gmail.com),  
M. T. Suleymanova<sup>1</sup>, [metanet\\_suli@yahoo.com](mailto:metanet_suli@yahoo.com),

<sup>1</sup>Institute of Control Systems (Azerbaijan National Academy of Sciences), Baku, AZ1141, Republic of Azerbaijan;

<sup>2</sup>Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1073, Republic of Azerbaijan

Corresponding author: **Musaeva Naila F.**, Doctor of Engineering,  
Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1073, Republic of Azerbaijan,  
e-mail: [musanaila@gmail.com](mailto:musanaila@gmail.com)

Accepted on March 12, 2021

## Abstract

The paper covers creating the algorithms for calculating the probability of various types of defects in tunnels, the development of which can lead to accidents. Tunnels are an important and complex part of the transport and communication system, through which heavy traffic is carried out. Determining the probability of defects in the latent period of their initiation in individual sections of tunnels is an important problem. The formation of defects is accompanied by the appearance of noise that distorts the useful signals coming from sensors and measuring instruments installed to control the stability of the tunnel and the reliability of its structures. Traditionally measuring instruments register noisy signals, and the technical condition of the tunnels is assessed on the basis of the values of their characteristics. It is shown in the paper that the more reliable indicators of fixing the onset of dangerous changes in the latent period of initiation are the characteristics of the noise, which cannot be extracted from the noisy signal. It is noted that the probability with which the noise takes on admissible and critical values is an indicator of changes in the technical condition of tunnels. Algorithms have been developed for calculating the probabilities of the noise values getting in the given intervals. These probabilities are stored as reference sets for the initiation of tunnel defects. After the training has been carried out, the values of the probabilities with which the noise takes on the given values at different time instants are matched to the type of defect and one of the possible technical states: serviceable, operational, partially operational, inoperable; pre-emergency; emergency, etc. It is also shown that the differences in the probabilities with which the noise takes on the same values at different times are indicators of the dynamics of changes in the malfunction in the tunnels. A database of informative attributes of the intensity of the development of failures is also created in the paper. For this database, the indicators of the dynamics of the development of a defect are determined, such as insignificant, slow, significant, intensive.

**Keywords:** useful signal, noise, noisy signal, probability of the noise getting in a given interval, probabilities of admissible and critical values of the noise, tunnel, type of tunnel failure

For citation:

**Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T.** Algorithms for Determining the Probability of Risks of Accidents in Tunnels Based on the Characteristics of the Noise of Noisy Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 7, pp. 357–364.

DOI: 10.17587/mau.22.357-364

## References

1. **Aliev T.** Noise Control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents. Springer, 2019, 201 p.
2. **Shvidkiy V. Ya., Gres A. A.** Checkup of deformations when tunneling under the runways-in-use of Sheremetyevo airport, *Transport construction*, 2019, no. 3, pp. 23–25 (in Russian).
3. **Makovskij L. V., Kravchenko V. V.** Prospects for creation of the underground expressway system in the largest cities and megalopolises, *Transport construction*, 2018, no. 1, pp. 11–14 (in Russian).
4. **Shevchenko A. A., Kobetskiy A. D., Boev A. O.** Experience in application of automated systems for monitoring of metro tunnels, *Transport construction*, 2019, no. 2, pp. 26–28 (in Russian).
5. **Noorossana R., Saghaei A., Amiri A.** Statistical Analysis of Profile Monitoring, Wiley, New York, 2012, 332 p., available at: <https://www.wiley.com/en-us/Statistical+Analysis+of+Profile+Monitoring-p-9781118071977>.
6. **Aliluev S. V., Bolshakov A. A., Popov A. N., Teterin D. P.** Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 264–269 (in Russian).
7. **Boshlyakov A. A., Kovalev V. V., Rubtsov V. I.** Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 180–185 (in Russian).
8. **Weihong (Grace) Guo, Jionghua (Judy) Jin, S. Jack Hu.** Profile Monitoring and Fault Diagnosis Via Sensor Fusion for Ultrasonic Welding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, vol. 141, issue 8, pp. 081001-1-81001-13, available at: <https://doi.org/10.1115/1.4043731>.
9. **Yaser Zerehsaz, Chenhui Shao, Jionghua Jin.** Tool wear monitoring in ultrasonic welding using high-order decomposition, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 657–669, available at: <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1272-4>.
10. **Kim J., Huang Q., Shi J., Chang T.-S.** Online Multichannel Forging Tonnage Monitoring and Fault Pattern Discrimination Using Principal Curve, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, vol. 128, no. 4, pp. 944–950, available at: <https://doi.org/10.1115/1.2193552>.
11. **Amiri A., Zou C., Doroudyan M. H.** Monitoring Correlated Profile and Multivariate Quality Characteristics, *Quality and Reliability Engineering International*, 2013, vol. 30, no. 1, pp. 133–142, available at: <https://doi.org/10.1002/qre.1483>.
12. **Xiaoli Li, Shen Dong, Zhejun Yuan.** Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39, no. 12, pp. 1935–1944, available at: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00021-8).
13. **Jian Guo, Zhaojun Li, Jionghua Jin.** System Reliability Assessment with Multilevel Information Using the Bayesian Melding Method, *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, vol. 170, pp. 1–268, available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.09.020>.
14. **Weihong Guo, Chenhui Shao, Tae Hyung Kim, S. Jack Hu, Jionghua Jin, J. Patrick Spicer, Hui Wang.** Online process monitoring with near-zero misdetection for ultrasonic welding of lithium-ion batteries: An integration of univariate and multivariate methods, *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, vol. 38, no. 1, pp. 141–150, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.01.001>.
15. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I.** Technologies for Monitoring the Dynamics of Damage Development in Drilling Rigs Using High-Order Moments of the Noise, *Mechatronics, automation, control*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 213–223 (in Russian).
16. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T.** Algorithms for constructing the confidence interval for the mathematical expectation of the noise and their application in the control of the dynamics of accident development. *Mechatronics, automation, control*, 2020, vol. 21, no. 9, pp. 521–529 (in Russian).
17. **Aliev T. A., Musaeva N. F.** Technologies for Early Monitoring of Technical Objects Using the Estimates of Noise Distribution Density, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2019, vol. 51, no. 9, pp. 12–23.
18. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I.** Analytic representation of the density function of normal distribution of noise, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, vol. 47(8), no. 4, pp. 24–40.
19. **Ventsel Y. S., Ovcharov L. A.** The Theory of Random Processes and Its Engineering Applications, Moscow, KNORUS, 2013, 448 p. (in Russian).
20. **Guidelines** for the technical diagnosis of road tunnels, available at: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/7UE.html>.