

Т. А. Алиев, д-р техн. наук, проф., академик, зав. отделом, director@cyber.az,
Т. А. Бабаев, канд. техн. наук, зав. отделом, tbabayev@bk.ru,
Т. А. Ализаде, канд. техн. наук, зав. лаб., tahiralizada@gmail.com,
Институт систем управления НАН Азербайджана, г. Баку,
Н. Э. Рзаева, канд. техн. наук, зав. отделом, nikanel1@gmail.com,
Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку,
Э. Э. Алибейли, менеджер, elnur.alibayli@gmail.com,
СКБ "Кибернетика", г. Баку

Система Noise-контроля технического состояния железнодорожных мостов и туннелей в сейсмоактивных регионах

Проведен анализ технического состояния объектов железнодорожных коммуникаций, включающих современные мосты, туннели, станции, путепроводы, переезды и устройства энергоснабжения. Отмечено, что исходя из специфических особенностей подобных объектов их техническое состояние в большинстве случаев контролируется через определенные промежутки времени. В то же время существующим системам непрерывного контроля не всегда удастся адекватно оценить техническое состояние объектов железнодорожной инфраструктуры из-за наличия дополнительных помех в обрабатываемых сигналах при появлении неисправности. В связи с этим предлагается один из возможных вариантов «непрерывного» мониторинга начала изменения технического состояния железнодорожных путей с помощью Noise-технологий. Отмечено, что при изменении технического состояния железнодорожных инфраструктур вибросигналы, которые возникают от воздействия подвижного состава, содержат помимо полезной составляющей также и помехи. Применение технологий корреляционного и спектрального анализов, а также других традиционных способов из-за влияния помехи на полезные вибросигналы не позволяет обеспечить адекватность результатов контроля. Поэтому предлагаются технологии раздельного анализа полезного сигнала и шума, получаемого от вибрации, а также формирования информативных признаков идентификации технического состояния железнодорожных инфраструктур. При этом оценки характеристик полезного сигнала и помехи используются как основной носитель диагностической информации. Благодаря простоте и надежности разработанных теоретических алгоритмов реализация технических средств и их установка во всех объектах пути не представляет особых трудностей. В то же время внедрение Noise-системы обеспечит контроль начала изменения технического состояния железнодорожных путей в реальном масштабе времени во время передвижения подвижного состава. Это, в свою очередь, позволит своевременно выявлять неисправности и, тем самым, существенно повысит безопасность перевозок пассажиров и грузов железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: объект, вибрация, помеха, сигнал, мониторинг, Noise-контроль, интеллектуальные системы

Введение

Известно, что в настоящее время железнодорожный транспорт является важным видом транспорта как в международном плане, так и внутри страны. Во многих странах и регионах основную нагрузку по перевозкам несет железнодорожный транспорт. Для этого созданы железнодорожные коммуникации с современными мостами, туннелями и станциями. Управление этим огромным и сложным хозяйством осуществляется множеством различных современных и совершенных систем контроля и диагностики [1, 2]. Благодаря этим системам обеспечивается высокий уровень эффективности и безопасности железнодорожного транспорта. Однако несмотря на это в настоящее время нередко происходят крушения как товарных, так и пассажирских поездов. Как показали наши исследования, за счет решения проблемы обеспечения контроля скрытого периода изменения технического состояния железнодорожного по-

лотна, железнодорожных мостов, туннелей, переездов и т. д. можно повысить степень безопасности железнодорожного транспорта [3, 4]. Это особенно важно для железнодорожного транспорта стран сейсмоактивных регионов, поскольку в этих регионах достаточно часто происходят маломощные землетрясения 1...3 балла, которые влияют на техническое состояние железнодорожного полотна, мостов, туннелей и коммуникаций. Они, как правило, не заканчиваются большими разрушениями. Но каждое такое землетрясение является потенциальным фактором, способствующим началу скрытого периода изменения технического состояния объекта. В связи с этим представляет несомненный практический интерес применение технологии и системы Noise-контроля в системе обеспечения безопасности железнодорожного транспорта сейсмоактивных регионов и стран. При этом появляются дополнительные требования к безопасности движения. Анализ литературы [2—12] по технологиям и системам

контроля с учетом особенностей железных дорог сейсмоактивных регионов показал, что применение Noise-технологий благодаря их специфике может позволить повысить безопасность этого вида транспорта. Для этого целесообразно создать подсистему Noise-контроля скрытого периода начала неисправностей на железнодорожном полотне, мостах, туннелях и коммуникациях на протяжении всей трассы.

Эти подсистемы позволят диспетчерской службе получить заблаговременно дополнительную информацию, позволяющую принятием соответствующих мер повысить безопасность движения в целом.

Постановка задачи

С развитием высокоскоростного движения поездов все более ужесточаются требования к объектам и устройствам инфраструктуры железнодорожного транспорта — как к качеству определения занятости пути, так и к состоянию рельсовой линии, мостов, туннелей и т. д., от которых зависят качественные характеристики работы, безопасность и бесперебойность движения поездов. В связи с важностью этой проблемы в настоящее время на железных дорогах контроль технического состояния железнодорожных мостов и туннелей каждого перегона путей сообщения практически осуществляется по плану, т. е. по "очереди", так как считается, что в промежутках времени, когда нет контроля, серьезных изменений не происходит. В то же время в реальной жизни из-за различных факторов, например под влиянием сейсмических процессов, даже через день после контроля могут иметь место определенные изменения. В связи с этим вопрос создания новых альтернативных решений в области совершенствования контроля технического состояния пути является актуальным. Поэтому в дополнение к существующим целесообразно создание простых и недорогих интеллектуальных технических средств мониторинга, которые можно установить в качестве сигнализатора начала изменений технического состояния мостов, туннелей и т. д. на пути следования подвижного состава. При этом информационный центр в реальном масштабе времени может получать сигналы от соответствующих перегонов, которые целесообразно оперативно контролировать вне "очереди" [1–6]. Следовательно, важное практическое значение

имеет создание новых интеллектуальных технологий для мониторинга начала изменений технического состояния пути на железных дорогах в реальном масштабе времени.

При этом следует принять во внимание, что один из эффективных методов диагностики технического состояния элементов инфраструктуры железнодорожных объектов основан на использовании вибрационных процессов, возникающих от воздействия подвижного состава [2–12]. Предпосылка применения вибрационного метода связана с тем, что определенному состоянию эксплуатируемых конструкций соответствует группа диагностических признаков динамического процесса, возникающих во время передвижения поездов на железных дорогах.

Допустим, что во время передвижения подвижного состава на выходе датчика вибраций D_v , установленного на каркасе моста (в туннеле или на других конструкциях железнодорожного пути), получается зашумленный дискретизированный вибросигнал $g(i\Delta t)$, который состоит из полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$ и суммарного шума вибросигнала $\varepsilon(i\Delta t)$:

$$g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t),$$

где i — номер отсчета (выборки) сигнала; Δt — время дискретизации (интервал выборки) сигнала.

Полезный сигнал $X(i\Delta t)$ возникает в результате воздействия на пути огромного веса подвижного состава, зависит от технического состояния пути и представляет собой низкочастотные вибрации. Под влиянием других факторов, связанных с техническим состоянием подвижного состава и моста, в основном формируются высокочастотные составляющие. Следовательно, можно допустить, что на основе высокочастотных составляющих помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, а также полезного сигнала, состоящего из низкочастотных составляющих $X(i\Delta t)$, и коэффициента взаимосвязи между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ можно формировать информативные признаки, которые будут отражать информацию о техническом состоянии конструкции. Следовательно, путем анализа полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$, шума $\varepsilon(i\Delta t)$ вибросигнала и взаимосвязи между ними можно осуществить мониторинг начала изменений технического состояния мостов и туннелей в любом перегоне пути при передвижении вагонов подвижного состава.

Задачей, решению которой посвящена данная статья, является создание новых интеллектуальных технологий и средств мониторинга технического состояния объектов железнодорожного

пути, позволяющих путем анализа вибрационных зашумленных сигналов выявлять его предотказные состояния в режиме реального времени без ограничений по скорости движения поездов.

В связи с вышесказанным для мониторинга начала изменения технического состояния мостов, туннелей и других конструкций железнодорожного пути во время передвижения подвижного состава в реальном масштабе времени требуется создание технологий формирования и анализа эквивалентных полезных вибросигналов $X^e(i\Delta t)$ и эквивалентных помех $\varepsilon^e(i\Delta t)$, позволяющих получить результаты, аналогичные результатам реальных полезных вибросигналов $X(i\Delta t)$ и шумов $\varepsilon(i\Delta t)$, т.е. требуется обеспечение равенств:

$$D_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^{e^2}(i\Delta t) = D_X^e;$$

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e^2}(i\Delta t) = D_\varepsilon^e;$$

$$R_{XX}(\mu\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) X((i+\mu)\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e((i+\mu)\Delta t) \approx R_{X^e X^e}(\mu\Delta t);$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \varepsilon^e((i+\mu)\Delta t) \approx R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t);$$

$$R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) \varepsilon^e((i+\mu)\Delta t) \approx R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t);$$

$$a_{n_X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos n\omega_j X(i\Delta t) \approx$$

$$\approx a_{n_X}^e \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos n\omega_j X^e(i\Delta t) = a_{n_X}^e;$$

$$b_{n_X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin n\omega_j X(i\Delta t) \approx$$

$$\approx b_{n_X}^e \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin n\omega_j X^e(i\Delta t) = b_{n_X}^e;$$

$$a_{n_\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos n\omega_j \varepsilon(i\Delta t) \approx$$

$$\approx a_{n_\varepsilon}^e \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos n\omega_j \varepsilon^e(i\Delta t) = a_{n_\varepsilon}^e;$$

$$b_{n_\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin n\omega_j \varepsilon(i\Delta t) \approx$$

$$\approx b_{n_\varepsilon}^e \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin n\omega_j \varepsilon^e(i\Delta t) = b_{n_\varepsilon}^e,$$

где $X(i\Delta t)$ и $X^e(i\Delta t)$ — полезный вибросигнал и эквивалентный полезный вибросигнал; $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\varepsilon^e(i\Delta t)$ — помеха вибросигнала и эквивалентная помеха; $R_{XX}(\mu\Delta t)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu\Delta t)$, $R_{X^e X^e}(\mu\Delta t)$ и $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t)$ — оценки корреляционных функций полезного сигнала и помехи и эквивалентных корреляционных функций полезных сигналов и эквивалентных помех; a_{n_X} , b_{n_X} , a_{n_ε} и b_{n_ε} — спектральные характеристики полезных сигналов и помех; $a_{n_X}^e$, $b_{n_X}^e$, $a_{n_\varepsilon}^e$ и $b_{n_\varepsilon}^e$ — оценки спектральных характеристик эквивалентных полезных сигналов и эквивалентных помех.

Алгоритмы вычисления оценки дисперсии помехи и корреляционной функции полезного вибросигнала

В работе [1] показано, что дисперсию помехи можно вычислить по формуле

$$D_\varepsilon \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \quad (1)$$

Справедливость этого выражения можно проверить путем разложения ее правой части на соответствующие слагаемые:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - \\ &- 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \times \\ &\times [X((i+1)\Delta t) + \varepsilon((i+1)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \times \\ &\times [X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] = \\ &= R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - \\ &- 2R_{XX}(\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \end{aligned} \quad (2)$$

При этом, если выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов, то можно считать справедливыми условия [1, 13–15]

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{X\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon X}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \approx 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Принимая во внимание соотношения (3), в правой части выражения (2) получим

$$D_\varepsilon = R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx \approx 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0).$$

Таким образом, оценка дисперсии помехи D_ε , которая вычисляется по формуле (1), представляет собой погрешность оценки корреляционной функции вибросигнала $R_{gg}(\mu\Delta t)$ при $\mu = 0$. Следовательно, оценку $R_{XX}(0)$ корреляционной функции полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$, зашумленного помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} R_{XX}(0) &= R_{gg}(0) - D_\varepsilon = \\ &= R_{gg}(0) - [R_{\varepsilon\varepsilon}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0)]. \end{aligned}$$

В работе [1] показано, что погрешность оценки $R_{gg}(\mu\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ представляет собой оценку взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t)$ между полезным вибросигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$. Поэтому для этого случая оценку корреляционной функции $R_{XX}(\mu\Delta t)$ полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ можно представить в виде

$$R_{XX}(\mu\Delta t) = R_{gg}(\mu\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t).$$

Следовательно, для уменьшения погрешности корреляционного анализа зашумленных вибросигналов при $\mu \neq 0$ необходимо вычисление оценки $R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t)$.

При этом формулу вычисления взаимно корреляционной функции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 1$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - \\ &- 2g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)]. \end{aligned}$$

При разложении правой части этого равенства получим:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)] - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \times \\ &\times [X((i+1)\Delta t) + \varepsilon((i+1)\Delta t)] - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \times \\ &\times [X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \times \\ &\times [X((i+3)\Delta t) + \varepsilon((i+3)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + \\ &+ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t) - \\ &- 2R_{\varepsilon X}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) + \\ &+ R_{X\varepsilon}(3\Delta t) + R_{\varepsilon X}(3\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t). \end{aligned}$$

При выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумленных вибросигналов, а также при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon((i+1)\Delta t)$, допуская справедливость отношений [1]

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \neq 0; \\ R_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) \neq 0; \\ R_{XX}(\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(3\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(3\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) \approx 0, \end{array} \right.$$

получим

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(\Delta t).$$

Следовательно, оценку взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 1$ можно вычислить следующим образом:

$$R_{X_\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{R'_{X_\varepsilon}(\Delta t)}{2} \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)].$$

Понятно, что оценки $R_{X_\varepsilon}(2\Delta t)$, $R_{X_\varepsilon}(3\Delta t)$,... при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 2, 3, \dots$ также можно вычислить аналогичным образом. Следовательно, при различных временных сдвигах $\mu\Delta t$, $\mu = 1, 2, 3, \dots$, оценки $R_{X_\varepsilon}(\mu\Delta t)$ можно вычислить с помощью аналогичного выражения, т. е.

$$R_{X_\varepsilon}(\mu\Delta t) \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+(\mu+1))\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+(\mu+1))\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+(\mu+2))\Delta t)]. \quad (4)$$

Таким образом, наличие алгоритмов и технологий вычисления оценок дисперсии помехи D_ε и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой $R_{X_\varepsilon}(\mu\Delta t)$ зашумленных вибросигналов $g(i\Delta t)$ открывает возможность для вычисления оценки корреляционной функции полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$, зашумленного помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, по формуле

$$R_{XX}(\mu\Delta t) \approx \begin{cases} R_{gg}(0) - [2R_{X_\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0)] & \text{при } \mu = 0, \\ R_{gg}(\mu\Delta t) - 2R_{X_\varepsilon}(\mu\Delta t) & \text{при } \mu \neq 0, \end{cases}$$

где оценки $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ и $R_{X_\varepsilon}(\mu\Delta t)$ вычисляются по выражениям (1) и (4).

Алгоритмы анализа зашумленных вибросигналов с помощью эквивалентных отсчетов их помех и полезных сигналов

Проведенные исследования показали, что техническое состояние железнодорожных объектов можно контролировать путем анализа зашумленных вибросигналов с помощью технологии вычисления эквивалентных отсчетов их помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ [1, 13–15]. Для этой цели сначала рассмотрим возможность вычисления приближенных величин, не поддающихся непосредственному измерению отсчетов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ зашумленных вибросигналов $g(i\Delta t)$. Анализ возможных вариантов решения этой задачи показал [1, 13–15], что с использованием технологии вычисления оценки дисперсии помехи D_ε по выражению (1) вместо не поддающихся измерению отсчетов по-

мехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно вычислить их приближенные эквивалентные величины $\varepsilon^e(i\Delta t)$. Для этой цели формулу (1) представим в виде

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)[g(i\Delta t) + g((i+2)\Delta t) - 2g((i+1)\Delta t)].$$

Благодаря этому, используя обозначения

$$\begin{aligned} \varepsilon'(i\Delta t) &= g(i\Delta t)[g(i\Delta t) + g((i+2)\Delta t) - 2g((i+1)\Delta t)]; \\ \text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t) &= \begin{cases} +1, & \text{если } \varepsilon(i\Delta t) > 0, \\ 0, & \text{если } \varepsilon'(i\Delta t) = 0, \\ -1, & \text{если } \varepsilon'(i\Delta t) < 0, \end{cases} \end{aligned}$$

формулу вычисления эквивалентных величин отсчетов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon(i\Delta t) &\approx \varepsilon^e(i\Delta t) = \text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t) \times \\ &\times \sqrt{g(i\Delta t)[g(i\Delta t) + g((i+2)\Delta t) - 2g((i+1)\Delta t)]} = \quad (5) \\ &= \text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}. \end{aligned}$$

При этом, допуская справедливость выражения [1]

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e^2}(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |g(i\Delta t)[g(i\Delta t) + g((i+2)\Delta t) - 2g((i+1)\Delta t)]|, \quad (6)$$

формулу вычисления среднего значения $\bar{\varepsilon}(i\Delta t)$ отсчетов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно свести к вычислению среднего значения эквивалентных отсчетов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$, т.е.

$$\bar{\varepsilon}(i\Delta t) \approx \bar{\varepsilon}^e(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t).$$

Многочисленные вычислительные эксперименты показали, что несмотря на возможные отклонения приближенных величин эквивалентных отсчетов $\varepsilon^e(i\Delta t)$ от их истинных значений $\varepsilon(i\Delta t)$ на величину $\Delta\varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon^e(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t)$, между их оценками имеют место приближенные равенства:

$$\begin{aligned} P \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e^2}(i\Delta t) > \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \right\} &\approx \\ \approx P \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e^2}(i\Delta t) < \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \right\} &= 1; \\ P \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) > \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \right\} &\approx \\ \approx P \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) < \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \right\} &= 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Как равенства (5)–(7), так и проведенные экспериментальные исследования показали, что с помощью эквивалентных отсчетов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ можно получить результаты, идентичные результатам анализа тех же вибросигналов с известными реальными отсчетами помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. Для этого по формуле

$$\begin{aligned} X^e(i\Delta t) &\approx g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t) \approx \\ &\approx g(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t) = X(i\Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

вычисляются эквивалентные отсчеты $X^e(i\Delta t)$ полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$.

При этом также появляется возможность путем выделения эквивалентных отсчетов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ из зашумленного вибросигнала $g(i\Delta t)$ по полученным эквивалентным значениям отсчетов полезного сигнала $X^e(i\Delta t) = g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t)$ вычислить оценки $R_{XX}^e(\mu\Delta t)$ и $R_{XX}^e(0)$, эквивалентные оценкам корреляционных функций полезного вибросигнала $R_{XX}(\mu\Delta t)$, т.е.:

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu\Delta t) &\approx \\ &\approx \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e(i\Delta t) & \text{при } \mu = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e((i + \varepsilon)\Delta t) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Очевидно, что располагая эквивалентными отсчетами помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ и полезного сигнала $X^e(i\Delta t)$, можно вычислить оценки взаимно корреляционной функции между полезным вибросигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ по выражению

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon((i + \mu)\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) \varepsilon^e((i + \mu)\Delta t). \end{aligned}$$

При этом исследования также показали, что несмотря на определенные погрешности отсчетов $X^e(i\Delta t)$ по сравнению с отсчетами полезных сигналов $X(i\Delta t)$, при достаточной длительности времени наблюдения T выполняется равенство (7). Благодаря этому, достигаются приближенные равенства

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu\Delta t) &\approx R_{X^e X^e}(\mu\Delta t), \\ R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t) &\approx R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t), \end{aligned}$$

которые показывают, что по выражениям (5)–(8), используя эквивалентные отсчеты помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$ и полезного сигнала $X^e(i\Delta t)$, можно найти эквивалентные оценки корреляционных функций полезного сигнала $R_{X^e X^e}(\mu\Delta t)$ и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой $R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t)$, позволяющие решить задачу мониторинга начала изменения технического состояния пути.

Как уже было указано выше, начало изменений и динамика развития изменений технического состояния железнодорожного полотна сопровождаются появлением помехи, коррелированной с полезным сигналом $X(i\Delta t)$. В результате формируется суммарная помеха $\varepsilon(i\Delta t)$, которая в скрытом периоде аварийного состояния данного отрезка пути коррелирует с полезным сигналом.

Поэтому при решении задачи контроля начала и динамики развития неисправностей в качестве информативных признаков надлежит также использовать оценки спектральных характеристик суммарной помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. Анализ возможных вариантов решения этой задачи показал [1, 7–9], что при спектральном контроле технического состояния объектов целесообразно заменить неподдающиеся измерению отсчеты помехи их приближенными эквивалентными величинами $\varepsilon^e(i\Delta t)$.

При этом, принимая во внимание выражения (5)–(8), вычисление среднего значения отсчетов помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно свести к вычислению среднего значения эквивалентных отсчетов помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$:

$$\bar{\varepsilon}(i\Delta t) \approx \bar{\varepsilon^e}(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t). \quad (9)$$

Благодаря этому выражение для вычисления оценок спектральных характеристик помехи можно представить в виде

$$\begin{cases} a_{n_\varepsilon} \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \cos n\omega(i\Delta t), \\ b_{n_\varepsilon} \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \sin n\omega(i\Delta t). \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, применение алгоритмов (9) и (10) открывает возможность для регистрации начала скрытого периода неисправностей, так как только в начале аварийного состояния объекта оценки a_{n_ε} и b_{n_ε} будут отличаться от эталонных информативных признаков. Благодаря этому применение данных выражений позволит повысить надежность контроля начала скрытого периода изменения технического состояния железнодорожных объектов.

Исследования показали, что динамика развития изменений технического состояния влияет на изменение степени корреляции между отсчетами помехи и полезного сигнала. Это отражается на степени корреляции между полезным сигналом и помехой. Поэтому по результатам

спектрального анализа эквивалента $\varepsilon^e(i\Delta t)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 1, 2, 3, \dots, n$, т. е. $\varepsilon^e((i+1)\Delta t)$, $\varepsilon^e((i+2)\Delta t)$, $\varepsilon^e((i+3)\Delta t)$, ..., $\varepsilon^e((i+n)\Delta t)$, можно контролировать динамику развития аварий по выражениям

$$\begin{cases} a_{1\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+1)\Delta t) \cos n\omega(i\Delta t); \\ b_{1\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+1)\Delta t) \sin n\omega(i\Delta t); \\ a_{2\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+2)\Delta t) \cos n\omega(i\Delta t); \\ b_{2\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+2)\Delta t) \sin n\omega(i\Delta t); \\ \dots \\ a_{n\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+n)\Delta t) \cos n\omega(i\Delta t); \\ b_{n\varepsilon}^* \approx \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e((i+n)\Delta t) \sin n\omega(i\Delta t). \end{cases}$$

При этом формула формирования эквивалентной помехи при $\mu = 1$ имеет вид

$$\varepsilon^e((i+1)\Delta t) = \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \times \sqrt{g(i\Delta t)[g((i+1)\Delta t) + g((i+3)\Delta t) - 2g((i+2)\Delta t)]},$$

где

$$\text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \approx \sqrt{g(i\Delta t)[g((i+1)\Delta t) + g((i+3)\Delta t) - 2g((i+2)\Delta t)]}.$$

Это выражение при $\mu = 2$ будет иметь вид:

$$\varepsilon^e((i+2)\Delta t) = \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \times \sqrt{g(i\Delta t)[g((i+2)\Delta t) + 2g((i+4)\Delta t) - 2g((i+3)\Delta t)]}.$$

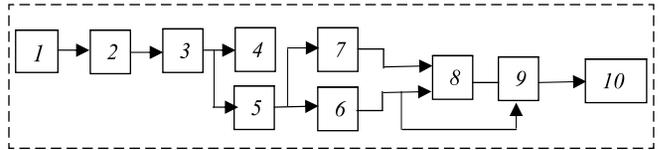
При $\mu = n$ данное выражение можно записать в обобщенном виде:

$$\varepsilon^e((i+n)\Delta t) = \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \times \sqrt{g(i\Delta t)[g((i+n)\Delta t) + 2g((i+n+2)\Delta t) - 2g((i+n+1)\Delta t)]}.$$

Если неисправность объекта стабильна, тогда оценки эквивалентной помехи будут повторяться. Однако при наличии динамики развития неисправностей оценки $a_{1\varepsilon}^*, b_{1\varepsilon}^*; a_{2\varepsilon}^*, b_{2\varepsilon}^*; \dots; a_{n\varepsilon}^*, b_{n\varepsilon}^*$ с течением времени будут отличаться друг от друга. В случае высокой динамики развития степени дефекта эти отличия будут значительными.

Интеллектуальная система вибрационного Noise-контроля

На рисунке приведена блок-схема системы интеллектуального Noise-контроля начала из-



Интеллектуальная система вибрационного Noise-контроля
Intelligent vibration noise control system

менения технического состояния объектов железнодорожного полотна. Система состоит из следующих модулей: 1 — датчик вибрации; 2 — модуль дискретизации и формирования центрированных отсчетов зашумленных вибросигналов $g(i\Delta t)$; 3 — модуль вычисления оценок $R_{gg}(i\Delta t)$; 4 — модуль вычисления эквивалентных отсчетов полезного сигнала $X(i\Delta t)$; 5 — модуль вычисления оценок эквивалентных корреляционных функций полезного сигнала $R_{X^e X^e}(\mu\Delta t)$ и взаимно корреляционной функции между полезным вибросигналом и помехой $R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t)$ и спектральных оценок $a_{nX^e}, b_{nX^e}, a_{n\varepsilon^e}, b_{n\varepsilon^e}$ полезного вибросигнала $X(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon^e(i\Delta t)$; 6 — модуль формирования текущих информативных признаков, состоящих из текущих оценок $R_{X^e X^e}(\mu\Delta t), R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t), a_{nX^e}, b_{nX^e}, a_{n\varepsilon^e}, b_{n\varepsilon^e}$; 7 — модуль обучения; 8 — модуль формирования множества эталонных информативных признаков; 9 — модуль принятия решения; 10 — модуль формирования информации для сигнализации и дистанционной передачи.

Система Noise-контроля функционирует следующим образом. В начале функционирования устройства начинается процесс обучения системы Noise-контроля, и во время перемещения подвижного состава через мост или туннель в каждом цикле контроля с помощью соответствующих модулей анализируется дискретизированный вибросигнал $g(i\Delta t)$, и полученные оценки $R_{X^e X^e}(\mu\Delta t), R_{X^e \varepsilon^e}(\mu\Delta t), D_{\varepsilon^e}, a_{nX}, b_{nX}, a_{n\varepsilon}, b_{n\varepsilon}$ запоминаются как информативные признаки. В последующих циклах текущие оценки сравниваются с предыдущими и оставляются только те, которые больше, чем предыдущее максимальные оценки. В результате через некоторое время формируется множество W_j^e , состоящее из максимальных оценок информативных признаков $R_{X^e X^e}^{\max}(\mu\Delta t), R_{X^e \varepsilon^e}^{\max}(\mu\Delta t), D_{\varepsilon^e}^{\max}, a_{nX}, b_{nX}, a_{n\varepsilon}, b_{n\varepsilon}$, которые принимаются в качестве эталонных. В следующих циклах этот процесс повторяется и аналогичным образом формирует последующее эталонное множество. Если при этом текущие информативные признаки не превосходят максимальные эталонные признаки, то допускается,

что обучение для объектов данного перегона завершено. При этом в последующих циклах начинается сравнение текущих комбинаций информативных признаков с элементом множества W_j^e эталонных информативных признаков. В дальнейшем, если текущие информативные признаки не превосходят эталонные, тогда считается, что техническое состояние объекта не изменилось. В случае, когда текущие информативные признаки больше эталонных, допускается, что имеет место начало скрытого периода изменения технического состояния контролируемого объекта пути. При этом в модуле 10 формируется информация для сигнализации о целесообразности контроля технического состояния данного объекта пути с применением традиционных методов и технологий. В случае, когда изменение не обнаружено, то возможно также формирование и передача информации о благополучном состоянии объектов пути данного перегона.

Заключение

Современные методы, технологии и технические средства обеспечивают надежный контроль исправности технических объектов всех перегонов пути через определенный промежуток времени. При этом для сейсмоактивных регионов гарантировать безопасность пути невозможно. В связи с этим очевидно, что для решения проблемы безопасности необходимо осуществить непрерывный мониторинг начала перехода в аварийные состояния всех технических объектов на всех перегонах пути с помощью простых и недорогих технических средств. В данной работе рассматривается один из возможных вариантов решения этой проблемы. При этом для формирования соответствующих множеств информативных признаков путем анализа вибрационных сигналов применение традиционных корреляционного, спектрального и других технологий анализа оказалось неэффективным. Это связано с тем, что в этих случаях в результате влияния помехи вибросигналов возникают большие погрешности, которые снижают адекватность результатов контроля пути. Для устранения этой трудности в работе используются технологии раздельного анализа полезного вибросигнала, помехи вибросигнала и взаимосвязи между ними. В работе предлагается один из возможных вариантов интеллектуальных технических средств Noise-контроля, который может легко

реализоваться во всех технических объектах пути. При этом помеха используется как носитель диагностической информации, с помощью которой формируется множество информативных признаков для идентификации технического состояния объектов контроля в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Aliev T. Noise control of the beginning and development dynamics of accidents. Springer, 2019, 201 p.
2. Vagnoli M., Remenyte-Prescott R., Andrews J. Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges // Structural Health Monitoring. 2017. Vol. 17, Iss. 4. P. 971–1007.
3. Zhang C., Ni Y., Zhou L., Wang C. A new railway tunnel deformation monitoring system using FBG bending gauges // The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17), Seoul, Korea, 28 August – 1 September 2017.
4. Кошкин Г. Г. Методы и средства диагностики земляного полотна. М.: Издательство МИИТ, 2004. 213 с.
5. Михалкин И. К., Симаков О. Б., Седелкин Ю. А., Атапин В. В. Новые подходы к мониторингу железнодорожного пути // Тр. IV Междунар. партнерской конф. "Современный подвижной состав: приоритеты, инновации, перспективы", Ялта, Украина. 2013. С. 77.
6. Осадчий Г. В., Лыков А. А. Система диагностики и удаленного мониторинга состояния железнодорожного пути // Открытое образование. 2011. № 2. С. 221–224.
7. Vagnoli M., Remenyte-Prescott R., Andrews J. Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges // Structural Health Monitoring. 2018. Vol. 17(4). P. 971–1007.
8. Zhang C., Ni Y., Zhou L., Wang C. A new railway tunnel deformation monitoring system using FBG bending gauges // The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17). Seoul, 2017.
9. Stoyanovich G. M., Pupatenko V. V., Maleev D. Y., Zmeev K. V. Solution of the Problem of Providing Railway Track Stability in Joint Sections Between Railroad Facilities and Subgrade // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. P. 587–592.
10. Vinberg E. M., Martin M., Firdaus A., Tang Y., Qazizadeh A. Railway Applications of Condition Monitoring. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018. 47 p.
11. Ngigi R. W., Pislaru C., Ball A. D., Gu F. Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 364(1).
12. Kostrzewski M. Analysis of selected vibroacoustic signals recorded on EMU vehicle running on chosen routes under supervised operating conditions // Vibroengineering PROCEDIA. 2017. Vol. 13. P. 153–158.
13. Aliev T., Babayev T., Alizada T., Rzayeva N. Noise control of the beginning and development dynamics of faults in the running gear of the rolling stock // Transport Problems. 2019. Vol. 9, N. 10. P. 87–95.
14. Aliev T., Ahmedov H., Babayev T., Alizada T., Manafov E., Zohrabov N., Mammadova A. Using fuzzy set theory and noise analysis technologies to enhance validity and reliability of control of the condition of the running gear of rolling stock // 5rd International Polish-Georgian Scientific-Technical Conference "TRANSPORT BRIDGE EUROPE-ASIA". Kutaisi, Georgia, 15–18 October 2019.
15. Aliev T. A., Babayev T., Alizada T., Rzayeva N. Possibilities of Application of Noise Technology in Railroad Operation Safety Systems in Seismically Active Regions // XI International Scientific Conference "Transport Problems 2019", Katowice. Poland, 26–28 June 2019.

A System for Noise Control of the Technical Condition of Railroad Bridges and Tunnels in Seismically Active Regions

T. A. Aliev, director@cyber.az, **T. A. Babayev**, tbabayev@bk.ru, **T. A. Alizada**, tahiralizada@gmail.com, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, AZ1141, Azerbaijan,
N. E. Rzayeva, nikanell@gmail.com, Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1073, Azerbaijan,
E. E. Alibayli, elnur.alibayli@gmail.com, Special Design Bureau "Kibernetika", Baku, AZ1141, Azerbaijan

Corresponding author: **Alizada Tahir A.**, Ph.D., Head of laboratory, Institute of Control Systems of ANAS, AZ1141, Baku, Azerbaijan, e-mail: tahiralizada@gmail.com

Accepted on December 08, 2020

Abstract

The authors analyze the technical condition of objects of railroad communications with modern bridges, tunnels, stations, overpasses, crossings and power installations. It is noted that, based on the specific features of such objects, control of their technical condition in most cases is carried out at certain intervals. At the same time, existing continuous control systems do not always adequately assess the technical condition of rail infrastructure objects due to the presence of additional noises in the processed signals at the time when a malfunction occurs. In this regard, one of the possible options is proposed for "continuous" monitoring of the beginning of changes in the technical condition of railroad tracks by means of noise technologies. It is pointed out that when the technical condition of rail infrastructure changes, vibration signals caused by the impact of rolling stock contain noises in addition to the useful component. The use of correlation and spectral analysis technologies, as well as other traditional methods does not allow ensuring the adequacy of the control results, due to the influence of the noise on useful vibration signals. Therefore, technologies are proposed for split analysis of the useful signal and the noise received from vibration, as well as for forming informative attributes of identification of the technical condition of rail infrastructure. In this case, the estimates of the characteristics of the useful signal and the noise are used as the main carrier of diagnostic information. Due to the simplicity and reliability of the developed theoretical algorithms, the implementation of the technical equipment and its installation in all objects of the railroad track present no particular difficulties. At the same time, the implementation of the Noise system will ensure real-time control of the beginning of changes in the technical condition of railroad tracks during the movement of the rolling stock. This, in turn, will allow timely detection of malfunctions, significantly enhancing the safety of passenger and cargo rail transportation.

Keywords: object, vibration, noise, signal, monitoring, Noise control, intelligent systems

For citation:

Aliev T. A., Babayev T. A., Alizada T. A., Rzayeva N. E., Alibayli E. E. A System for Noise Control of the Technical Condition of Railroad Bridges and Tunnels in Seismically Active Regions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 5, pp. 237–245.

DOI: 10.17587/mau.22.237-245

References

1. **Aliev T.** Noise control of the beginning and development dynamics of accidents, Springer, 2019, 201 p.
2. **Vagnoli M., Remenyte-Priscott R., Andrews J.** Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges, *Structural Health Monitoring*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 971–1007.
3. **Zhang C., Ni Y., Zhou L., Wang C.** A new railway tunnel deformation monitoring system using FBG bending gauges. *The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, Seoul, Korea, 28 August – 1 September 2017.
4. **Koshkin G. G.** Methods and tools for diagnostics of roadbed, Moscow, Publishing house of MIIT, 2004, 213 p. (in Russian).
5. **Mikhalkin I. K., Simakov O. B., Sedelkin Yu. A., Atapin V. V.** New approaches to the monitoring of railroad tracks, *Trudy IV Mezhdunarodnoy Partnerskoy Konferentsii "Sovremennyy Podvizhnoy Sostav: Priority, Innovatsii, Perspektivy"*, Yalta, Ukraine, 2013, p. 77 (in Russian).
6. **Osadchiy G. V., Lykov A. A.** System for diagnostics and remote monitoring of the state of the railroad tracks, *Otkrytoye Obrazovaniye*, 2011, no. 2, pp. 221–224 (in Russian).
7. **Vagnoli M., Remenyte-Priscott R., Andrews J.** Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges. *Structural Health Monitoring*, 2018, vol. 17(4), pp. 971–1007.
8. **Zhang C., Ni Y., Zhou L., Wang C.** A new railway tunnel deformation monitoring system using FBG bending gauges, *In: The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, Seoul, 2017.
9. **Stoyanovich G. M., Pupatenko V. V., Maleev D. Y., Zmeev K. V.** Solution of the Problem of Providing Railway Track Stability in Joint Sections Between Railroad Facilities and Subgrade, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 587–592.
10. **Vinberg E. M., Martin M., Firdaus A., Tang Y., Qazizadeh A.** Railway Applications of Condition Monitoring, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018, 47 p.
11. **Ngigi R. W., Pislaru C., Ball A. D., Gu F.** Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics, *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, vol. 364(1).
12. **Kostrzewski M.** Analysis of selected vibroacoustic signals recorded on EMU vehicle running on chosen routes under supervised operating conditions, *Vibroengineering PROCEDIA*, 2017, vol. 13, pp. 153–158.
13. **Aliev T., Babayev T., Alizada T., Rzayeva N.** Noise control of the beginning and development dynamics of faults in the running gear of the rolling stock, *Transport Problems*, 2019, vol. 9, no. 10, pp. 87–95.
14. **Aliev T., Ahmedov H., Babayev T., Alizada T., Manafov E., Zohrabov N., Mammadova A.** Using fuzzy set theory and noise analysis technologies to enhance validity and reliability of control of the condition of the running gear of rolling stock, *5rd International Polish-Georgian Scientific-Technical Conference "TRANSPORT BRIDGE EUROPE-ASIA"*, Kutaisi, Georgia, 15–18 October 2019.
15. **Aliev T. A., Babayev T., Alizada T., Rzayeva N.** Possibilities of Application of Noise Technology in Railroad Operation Safety Systems in Seismically Active Regions, *XI International Scientific Conference "Transport Problems 2019"*, Katowice, Poland, 26–28 June 2019.