

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

Оригинальное исследование



Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов

Я.С. Ватулин, В.А. Попов, В.Н. Дятлов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В процессе эксплуатации крановых балок грузоподъемного оборудования машинных залов тоннельных эскалаторов метрополитенов несомненно актуальна информация о техническом состоянии тех или иных конструктивных элементов несущих металлоконструкций, что определяет возможность их дальнейшего безопасного использования и необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ. Величина остаточного ресурса оценивается сопоставлением фактических показателей несущей способности с критериями, соответствующими предельным состояниям согласно проектной документации. Реальное состояние элементов несущей конструкции с течением времени может значительно изменяться, поэтому оценку остаточного ресурса производят экспериментально-расчетным методом, в основу которого положено определение напряжений и их максимальных отклонений в опасных сечениях элементов конструкций с определением степени их влияния на усталостную долговечность в перспективе.

Цель работы. Анализ комплексного применения методик моделирования напряженно-деформированного состояния с последующим вейвлет-анализом волновых процессов в замоноличенных шпильках узла подвеса ездовых балок подъемно-транспортного оборудования машинных залов тоннельных эскалаторов метрополитена.

Методы исследований. В связи со спецификой конструктивного исполнения в настоящей работе рассмотрено численное моделирование технического состояния замоноличенных участков шпилечного подвеса крановых балок грузоподъемного оборудования машинных залов тоннельных эскалаторов метрополитенов. При создании модели использованы возможности, входящих в состав программной платформы SolidWorks, модулей Simulation (статический анализ с применением метода конечных элементов) и Motion (кинематическое и динамическое исследование с построением систем дифференциальных уравнений движения с последующим решением).

Результаты. В результате проведенных исследований с учетом специфики различных методик моделирования напряженно-деформированного состояния разработана пространственная расчетная динамическая модель, которая отражает процессы, происходящие при деформировании узла шпилечного подвеса несущего двутавра, что позволяет объективно оценить его техническое состояние, а также возможность и условия дальнейшей эксплуатации.

Заключение. Для моделирования напряженно-деформированного состояния необходимо комплексное применение методик с последующим вейвлет-анализом волновых процессов, что повышает надежность диагностических процедур и, следовательно, позволяет обоснованно принимать решения о дальнейшей эксплуатации сооружения.

Ключевые слова: метрополитен; эскалатор; динамическая модель; шпилечный подвес; колебания, вейвлет-анализ.

Для цитирования:

Ватулин Я.С., Попов В.А., Дятлов В.Н. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

Рукопись получена: 16.04.2022

Рукопись одобрена: 10.08.2022

Опубликована: 15.10.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

Original study article

Technical diagnostics of heembedded elements of crane tracks of lifting equipment in machine halls of tunnel escalators

Yan S. Vatulin, Valery A. Popov, Vyacheslav N. Dyatlov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: During the operation of crane beams of lifting equipment of subway tunnel escalators' machine halls, the information about the technical condition of certain structural elements of supporting metal framework is always relevant, which determines the possibility of their further safe use and the need for repair and restoration work. The value of the remained service life is estimated by comparing the actual load-carrying ability with the criteria corresponding to the limiting conditions according to the project documentation. The actual state of the supporting framework elements can change with time significantly, therefore, the assessment of the remained service life is carried out with an experiment-and-simulation method based on the determination of stresses and their maximum deviations in weakest sections of framework elements with the determination of the degree of their impact on durability in the long term.

AIMS: Analysis of the combined application of methods for modeling the stress-strain state with subsequent wavelet analysis of wave processes in the interlocked stud-bolts of the suspension unit of riding beams of lifting and transport equipment of subway tunnel escalators' machine halls.

METHODS: With regard to the specific features of the design, numerical simulation of the technical state of the interlocked sections of the stud-bolted suspension of crane beams of lifting equipment of subway tunnel escalators' machine halls is considered in this work. The capabilities of the Simulation (static analysis using the finite element method) and Motion (kinematic and dynamic research with formation of systems of differential equations of motion and subsequent solving) modules of the SolidWorks software platform were used in the development of the model.

RESULTS: As a result of the carried out research, with regard to the specific features of various methods of the stress-strain state simulation, a spatial linear dynamic model has been developed that reflects the processes occurring during the deformation of the stud-bolt suspension of the supporting I-beam, which is helpful for an objective assessment of its technical state, as well as the possibility and conditions of further operation.

CONCLUSIONS: To simulate the stress-strain state, the combined application of methods is necessary, followed by a wavelet analysis of wave processes, which increases the reliability of diagnostic procedures and, consequently, makes it possible to make reasonable decisions about the further operation of the facility.

Keywords: *subway; escalator; dynamic model; stud-bolt suspension; oscillations, wavelet analysis.*

Cite as:

Vatulin YS, Popov VA, Dyatlov VN. Technical diagnostics of the embedded elements of crane tracks of lifting equipment in machine halls of tunnel escalators. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022;16(3):241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

Received: 16.04.2022

Accepted: 10.08.2022

Published: 15.10.2022

ВВЕДЕНИЕ

Санкт-Петербург – это самый большой северный мегаполис современной Европы, в котором решение транспортных проблем является одной из наиболее актуальных проблем жизнедеятельности. Географической особенностью Санкт-Петербурга является его расположение на более чем 100 островах в дельте реки Невы с разделением города основными ее протоками на южную и северную части. При этом большинство наземных транспортных потоков обеспечиваются разводными мостами через главные русла Невы и не обеспечивают достаточную перевозочную пассажирскую мощность. Для решения этой проблемы в 1955 году в Санкт-Петербурге появился прогрессивный вид транспорта – метрополитен.

В настоящее время метрополитен в Санкт-Петербурге, обслуживая ежедневно около 4 млн пассажиров, является основным видом городского транспорта и насчитывает 72 станции, на которых установлено 303 тоннельных эскалатора и 30 траволаторов. Протяженность линий метрополитена составляет 124,5 км. По уровню загруженности Петербургский метрополитен находится на 19 месте в мире и на 4 месте в Европе после Москвы, Лондона и Парижа.

Эксплуатация эскалаторов имеет ряд специфических особенностей, непосредственно связанных с напряженностью ритма работы и загруженностью транспортных систем в соответствии со сложившимися режимами, и вынужденные перерывы в их работе для производства ремонтных работ влекут за собой ограничение или исключение возможности использования станций метрополитена пассажирами. В то же время надежная и безопасная работа эскалаторного оборудования обеспечивается своевременным производством планово-предупредительных ремонтов, что в значительной степени определяет экономические показатели эффективности эксплуатации оборудования [1, 2, 3].

Важным средством обеспечения надежной и безопасной эксплуатации эскалаторного оборудования является также его своевременное техническое диагностирование в пределах нормативного срока службы, указанного в технической документации, и за пределами этого срока при проведении экспертизы промышленной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами, по результатам которого определяется необходимость ремонта или замены того или иного оборудования [3, 4, 5].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШПИЛЕЧНОГО ПОДВЕСА

Техническое обслуживание и ремонт оборудования, находящегося в машинных залах эскалаторов на станциях метрополитена, производится с применением средств

механизации, в том числе грузоподъемных машин, предназначенных для перемещения тяжелых грузов. Основным грузоподъемным средством является подвесная таль с ручным или электрическим приводом. Грузоподъемные средства перемещаются над эскалаторным оборудованием в машинных залах посредством подвесных крановых путей, выполненных в виде ездового двутавра, который крепится к потолочным строительным конструкциям с помощью частично замоноличенных шпилечных соединений (рис. 1).

Согласно проектной документации, как правило, шпилька крепления двутавра представляет собой металлический стержень диаметром 16 мм, длиной 400 мм, материал сталь СтЗсп, зафиксированный в проектом положении резьбовым соединением. Режим ее нагружения характеризуется низкой интенсивностью при максимальных значениях грузоподъемности.

В процессе эксплуатации подвесных путей возникает необходимость определения их технического состояния с целью определения необходимости проведения ремонта и восстановления эксплуатационных свойств. Проведение контроля технического состояния замоноличенных узлов несущих элементов данных конструкций традиционными диагностическими методами и приборами не всегда представляется возможным по причине отсутствия непосредственного доступа к ним. Тем не менее, проблема является актуальной, так как вероятность деградации несущих свойств этих элементов достаточно высока, поэтому

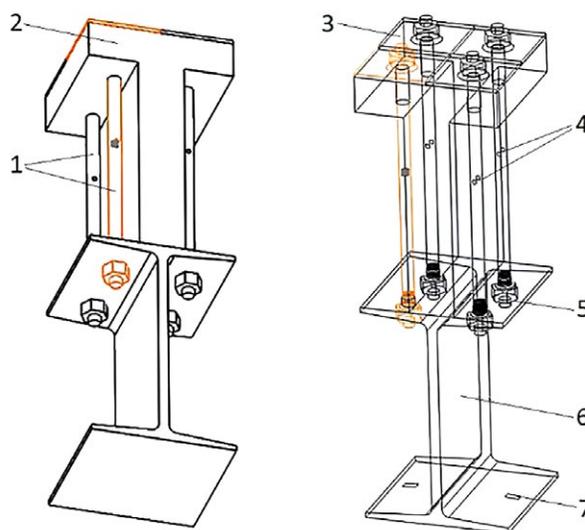


Рис. 1. Шпилечный подвес ездового двутавра грузоподъемного оборудования: 1 – шпилька; 2 – элемент бетонного перекрытия; 3 – замоноличенный узел крепления шпилечного подвеса; 4 – точки приложения импульса возбуждения; 6 – ездовой двутавр; 7 – участки приложения статической нагрузки от веса тельфера.

Fig. 1. The stud-bolt suspension of the riding I-beam of lifting equipment: 1 – a stud-bolt; 2 – an element of concrete overlap; 3 – an embedded attachment point of the stud-bolt suspension; 4 – points of application of the excitation impulse; 6 – a riding I-beam; 7 – areas of static load application from the weight of a hoist.

основной задачей настоящего исследования является оценка несущей способности монолитной части.

В практике эксплуатации данного оборудования известны случаи прогрессирующего разрушения узлов подвеса при перегрузке одной из шпилек узла подвеса. Такое событие имеет место быть если натяжение одного из элементов выводит из работы остальные элементы, образуя зазор достаточно для развития значительных мгновенных инерционных нагрузок на остальные элементы узла. Именно динамический характер приложения нагрузок приводит к прогрессирующему характеру разрушения [6].

При проведении диагностики узлов подвеса в качестве критериев, определяющих предельное состояние элементов конструкций, принимают формирование и развитие до недопустимых пределов усталостных трещин, остаточных пластических деформаций, потерю устойчивости, уменьшение до недопустимых значений сечений элементов вследствие протекания коррозионных процессов, а также деградация физико-механических свойств материалов.

Сопоставление определяемых фактических показателей несущей способности (остаточные деформации, сопротивление усталости) с критериями, определяющими указанные предельные состояния, дает возможность произвести объективную оценку величины остаточного ресурса. Исходными данными при этом считаются паспортные характеристики и данные, определяемые условиями фактической эксплуатации узлов подвеса [5, 7].

Однако в процессе эксплуатации реальное состояние элементов несущей конструкции может существенно изменяться: прогрессирует величина зазоров в сочленениях, проявляются остаточные деформации в виде прогибов несущих элементов, формируются и развиваются трещины и т.д. Иногда конструкция значительно модернизируется, что может повлечь за собой изменение жесткости составных элементов и, как результат, изменение режима нагружения конструкции грузоподъемной машины в целом.

Изменившаяся жесткость несущего элемента металлоконструкции неизбежно приводит к перераспределению нагрузки в сопряженных частях металлоконструкции. В таких условиях лимитирующим (в смысле ресурса машины в целом) элементом может оказаться совсем иной элемент металлоконструкции, чем принятый в проектной (заводской) расчетной методике. Поэтому использование только проектной документации для определения ресурса элементов в этих условиях будет несколько некорректно.

Каждый конкретный случай, опять-таки, требует определения того конкретного элемента металлоконструкции, который в данных условиях эксплуатации и в данных режимах нагружения, является лимитирующим для всей рассматриваемой конструкции. Поэтому оценку остаточного ресурса рекомендуется производить экспериментально-расчетным методом.

Экспериментально-расчетный метод основывается на определении напряжений и их максимальных отклонений в опасных сечениях элементов конструкций расчетным (в соответствии с нормативными документами) и экспериментальным (натурная тензометрия) методами с проведением анализа их влияния на усталостную долговечность в перспективе.

Согласно теории Брауде [8] сопротивление усталости поврежденной детали может быть получено в результате учета: влияния геометрических свойств формы трещины как концентратора напряжений, чувствительности материала к концентрации напряжений, закона изменения напряжения во времени, при предположении равномерного распределения напряжения по сечению и гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений.

Наиболее значимым допущением этой теории является описание повреждений условными геометрическими моделями, а также трактовка их применимости. Применение натурального и численного эксперимента позволяют более адекватно определить параметры элемента с учетом существующих отклонений от проектного состояния.

При полном или частичном отсутствии конструкторской документации, а также в случае значительного изменения геометрии несущего элемента в результате образования деформаций, наличия усталостного разрушения (трещин) приоритетным становится экспериментальный метод определения напряжений [9]. Реализация данного метода обычно основывается на результатах натурной тензометрии, но в рассматриваемом случае, его применение невозможно, по причине недоступности монолитной части конструкции.

Альтернативным вариантом в исследуемом случае является применение вибрационных методов определения состояния конструкции, в частности метод тестовой диагностики [10].

Метод тестовой диагностики шпилечных соединений основан на анализе реакции (мод колебаний) стержневых элементов конструкции. Возбуждение свободных колебаний конструкции осуществляется путем искусственного вывода системы из положения равновесия кратковременным динамическим импульсом – ударным воздействием сложной формы.

Колебательный процесс изучаемого объекта имеет пространственный характер перемещений. С целью получения полного вектора колебаний в точке (вибропортрета), необходимо измерять три базисных отведения в контрольной точке объекта, для чего используется специальное оборудование, представляющее собой виброизмерительный комплекс [10, 11].

Импульсное возмущение конструкции осуществляется с помощью механического ударника с силовым приводом в виде пружины с калиброванными свойствами жесткости и индентора конусного типа, реализующего условия центрального удара со стабилизированной скоростью внедрения, с пиковым значением ускорения

бойка до 100 м/с^2 и длительностью импульса до 10 мс. Устройство формирует непрерывный спектр ударного импульса, с максимальной амплитудой при 0 Гц и с последующим ее уменьшением с ростом частоты (рис. 2).

С целью достижения максимальной эффективности возбуждения собственных колебаний при импульсном воздействии определялось местоположение ввода импульса и его направление с помощью численного моделирования средствами специализированного модуля Simulation системы автоматизированного проектирования SolidWorks.

Для адекватного моделирования объекта исследования в цифровом формате оказывается недостаточным представление его геометрии. Важной особенностью является воспроизведение всех условий взаимодействия данного объекта с сопряженными элементами в общей сборке, и с окружающим пространством в целом [12]. Полезная нагрузка грузоподъемного устройства приложена

к шпильчным элементам в составе узла подвеса, находящимся в постоянном нагруженном состоянии от воздействия подвешенных масс конструктивных элементов, а также усилия от затяжки резьбового соединения.

Определение параметров напряженно-деформированного состояния элементов узла подвеса выполняется в два этапа: на первом осуществляют определение параметров напряженно-деформированного состояния элементов от затяжки резьбового соединения; на втором – параметров напряженно-деформированного состояния элементов от воздействия эксплуатационной нагрузки.

Моделирование условия затяжки резьбового соединения выполняется путем применения к телу шпильчных соединений отрицательной температурной нагрузки, вызывающей усадку металла в месте ее приложения. В результате шпильки подвергаются сжимающей нагрузке, а верхняя полка ездового двутавра – изгибающей (рис. 3).



Рис. 2. Ввод механической энергии в исследуемую конструкцию с помощью генератора ударных импульсов.

Fig. 2. Input of mechanical energy into the studied structure using a shock pulse generator.

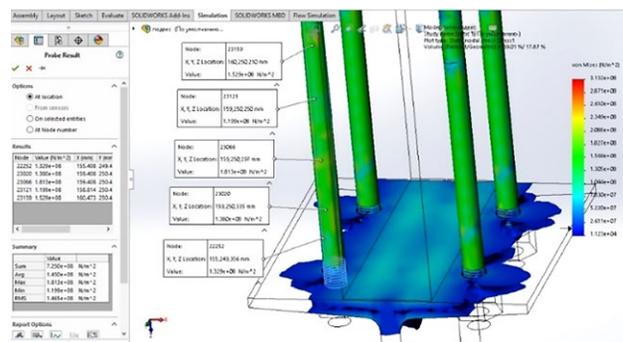


Рис. 3. Эпюра напряжений шпильчных соединений узла подвеса с реализацией предварительного натяжения резьбовыми соединениями.

Fig. 3. Stress diagram of the stud-bolt joints of the suspension unit with the implementation of pre-tension by threaded joints.

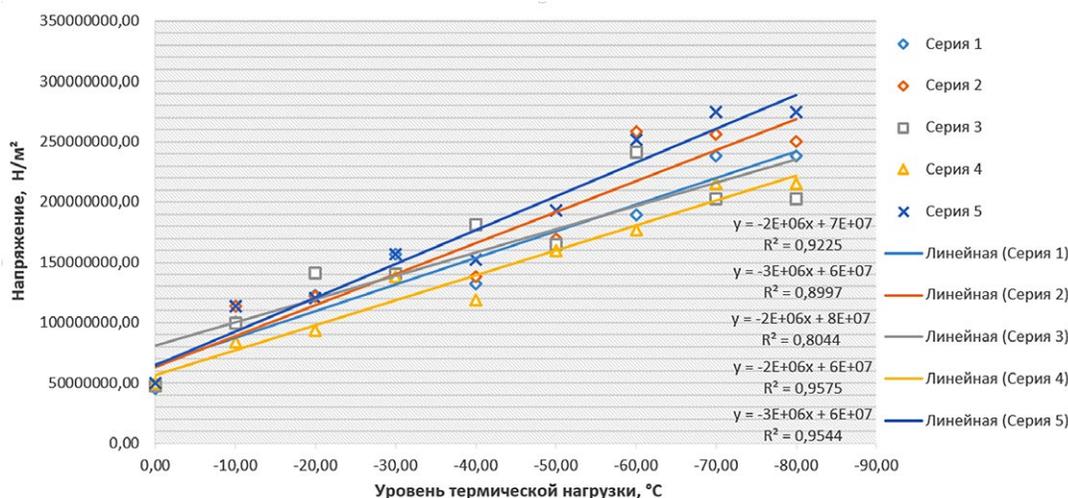


Рис. 4. Зависимость напряженно-деформированного состояния шпильчного соединения от величины прикладываемой отрицательной температуры.

Fig. 4. Dependence of the stud-bolt joint stress-strain state on the magnitude of the applied negative temperature.

Посредством линейной аппроксимации установлен закон изменения напряжений в сечениях шпилечного соединения от приложенной термической нагрузки, моделирующей процесс затяжки резьбового соединения (рис. 4).

Наблюдающаяся тенденция роста напряжений в направлении резьбового соединения объясняется снижением площади поперечного сечения на резьбовом участке шпильки, и наличия концентраторов напряжений по дну резьбовой канавки.

Таким образом, воздействие полезной нагрузки на узел подвеса будет сопровождаться усилением уже имеющихся участков повышенных напряжений в материале, что и определяет узлы конструкции, представляющие интерес для диагностирования технического состояния конструкции.

Одним из видов анализа напряженно-деформированного состояния шпилечного узла является проведение модального анализа, в основе которого лежит определение условий реализации наиболее эффективных способов импульсного возбуждения конструкции с минимальными энергетическими затратами и достаточным эффектом получения информации о вибрационных процессах. Подобные участки элементов конструкции

в процессе колебания имеют максимальные значения амплитуды, и расположены между «узлами» – точками, в которых амплитуда равна нулю. Расположение таких участков может быть определено путем построения форм низкой моды – простых форм собственных частот.

Для выполнения частотного анализа с помощью метода конечных элементов (МКЭ) необходимо воспроизведение условий взаимодействия рассматриваемого элемента с сопряженными деталями сборки [13, 14]. В таблице 1 представлены первые пять собственных частот элементов с моделями характерных дефектов.

Наличие того или иного дефекта характеризуется сканированным значением частоты и местом расположения датчика: коррозионное повреждение замоноличенной части шпилечного соединения имеет узел с нулевым значением амплитуд непосредственно на границе заделки (рис. 5), а остаточная деформация (изгиб) максимальные амплитуды имеет в среднем сечении шпильки. Степень коррозионного повреждения шпилечного соединения может быть определена по методике, изложенной в [2, 3].

Результаты исследования динамического нагружения узла подвеса с моделированием характерных повреждений (рис. 7) показали, что наиболее чувствительными

Таблица 1. Собственных частот элемента, Гц

Таблица 1. Table of eigenfrequencies of the element, Hz

№ моды	Исправное	Коррозия 30% площади поперечного сечения	Трещина 50% площади поперечного сечения	Остаточная деформация (прогиб)
1	571,44	461,62	535,93	500,65
2	571,83	461,97	562,81	706,05
3	1325,5	728,62	1315,1	1214,5
4	1581,4	1429,9	1544,7	1489,0
5	1582,4	1431,0	1570,3	1517,5

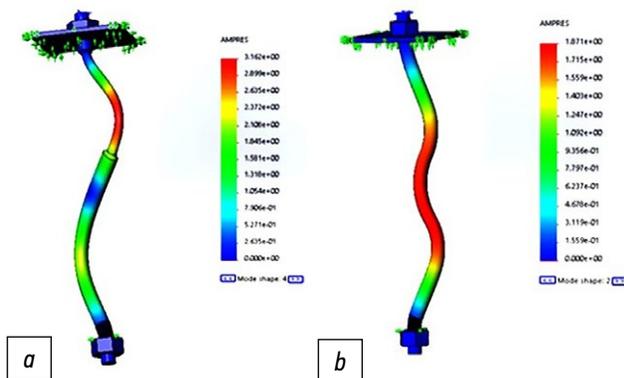


Рис. 5. Пример моды № 2 колебания элемента с характерными повреждениями: *a* – коррозия 30% площади сечения, *b* – остаточная деформация (изгиб).

Fig. 5. The example of the #2 oscillation mode of an element with specific damage: *a* – corrosion of 30% of the cross-sectional area, *b* – residual deformation (bending).

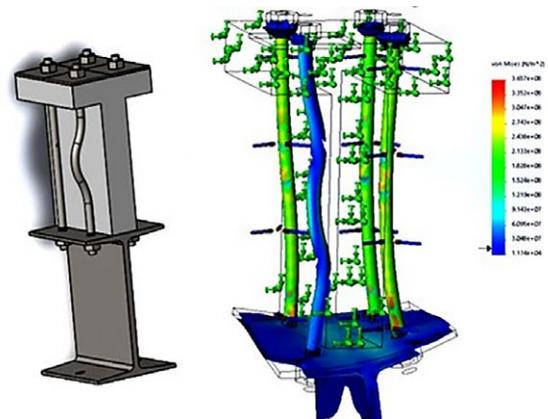


Рис. 6. Моделирование напряженно-деформированного состояния узла подвеса с поврежденной шпилькой при нагружении узла генератором ударных импульсов.

Fig. 6. Simulation of the stress-strain state of a suspension unit with a damaged stud-bolt when loading the unit with a shock pulse generator.

модами для диагностических целей являются моды № 6 и выше в частотном диапазоне 100–500 Гц.

Метод устойчиво работает, если шпильчный элемент разгружен (не связан), в этом случае при его возбуждении наблюдается резонирование шпильки на собственной частоте (признак неравномерного нагружения элементов узла подвеса). При наличии затяжки резьбового соединения эффективно использование частотного диапазона, превышающего шестой моды колебаний. Устойчивым диагностическим признаком является изменение интервалов между соседними резонансными частотами (завышенная тональность виброотклика), что свидетельствует о превышении значения растягивающего усилия. Однако, на практике использование высоких мод трудно реализуемо по причине сложной технологии сканирования: интенсивного затухания сигнала, небольших зон локализации, сложностей монтажа датчика.

В волновом представлении любую механическую систему можно представить ее характеристическим импедансом,

коэффициентом отражения ее неоднородностей для волновых цугов (серии импульсов), возникших в точке приложения возбуждающей силы (удара), интервалом между соседними резонансными частотами, затуханием и симметрией точки возбуждения относительно границ колеблющейся системы [12]. Эти характеристики дают представления о механических свойствах колебательной системы. Такие дефекты, как жесткость узлов крепления, изменение профиля несущей части резьбы, усталостные повреждения элементов крепления в конструкциях испытываемых узлов связаны с параметрами перечисленных характеристик.

Детальное представление о волновых процессах передачи энергии удара в объекте дает вейвлет-анализ [16, 17] с оценкой амплитудной модуляции в поддиапазонах частот, фигур Лиссажу, числа резонансных контуров и антирезонансов, декрементов затухания, фазо-частотной модуляции. Конфигурации фигур Лиссажу уникальны для любого компонента конструкции, поскольку определяются его жесткостью и условиями взаимодействия

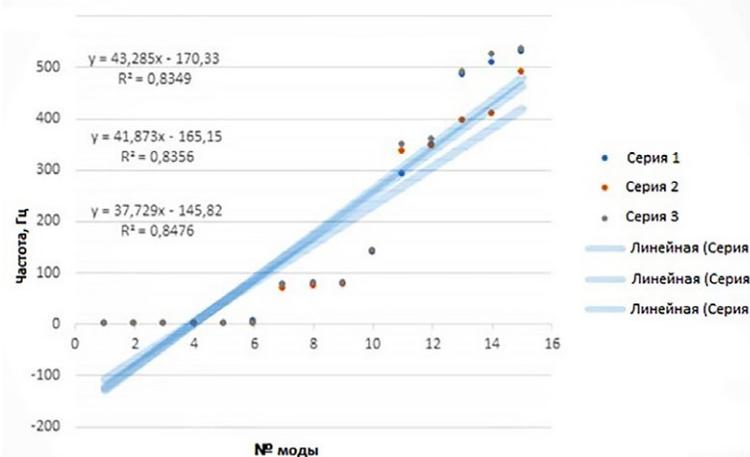


Рис. 7. Исследование динамики нагружения узла подвеса с моделированием повреждений: серия 1 – изгиб с радиусом 100 мм; серия 2 – коррозия 50% площади поперечного сечения, серия 3 – трещина 50% сечения.

Fig. 7. The study of the loading dynamics of the suspension unit with damage modeling: series 1 – bending with a radius of 100 mm; series 2 – corrosion of 50% of the cross-sectional area, series 3 – crack of 50% of the cross-section.

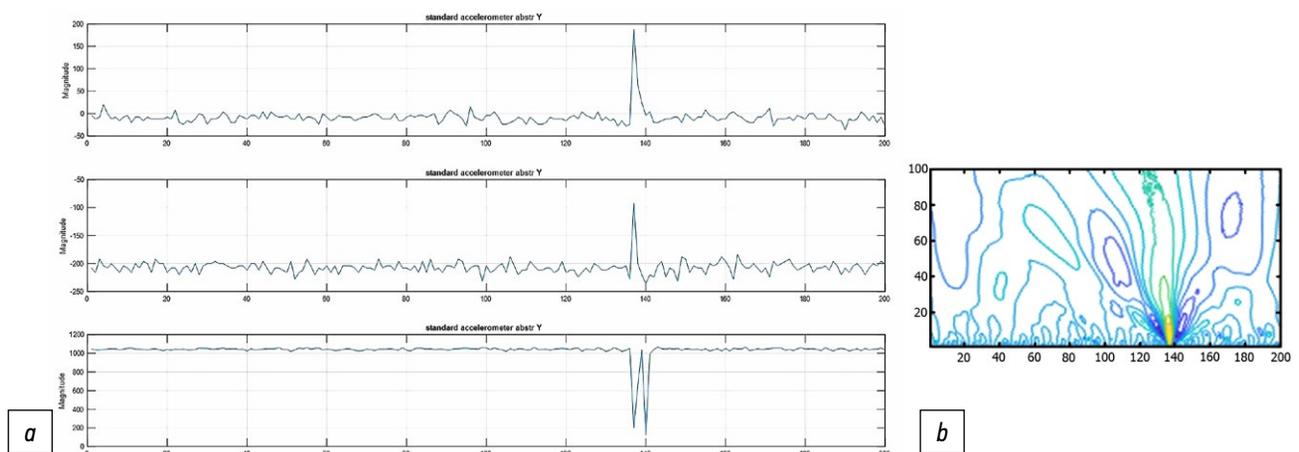


Рис. 8. Вейвлет-анализ исправного состояния шпильчного подвеса: *a* – форма сигнала, соответствующая исправному состоянию, *b* – вейвлет-представление вибропортрета сигнала.

Fig. 8. The wavelet analysis of the normal state of the stud-bolt suspension: *a* – the shape of the signal corresponding to the normal state, *b* – the wavelet representation of the vibration pattern of the signal.

с сопряженными элементами. Любое перераспределение свидетельствует об изменениях, связанных либо с изменениями геометрии конструкции, либо с деградацией свойств материала, из которого изготовлен данный элемент. На рис. 8 приведен пример вейвлет-анализа исправного состояния шпильчатого подвеса.

Применение вейвлет-анализа обладает высокой чувствительностью, но требует интерпретации большого объема графической информации, что снижает эффективность методики. Программная реализация компаратора сравнения образов реализует технологию разделения изображений по полосам, с выявлением значимых элементов матрицы.

Дополнительным диагностическим признаком состояния шпильчатого соединения при вибрационном контроле является построение графика орбиты контрольной точки в пространстве [10, 18]. График представляет собой кривую, соединяющую концы вектора переменной величины, отложенного в разные моменты времени от одной точки. Перемещение контрольной точки в пространстве качественного элемента подвеса представляет собой эллипс, с радиусами, соответствующими максимальным амплитудам колебаний шпильки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На рис. 9 представлен пример орбиты элемента подвеса, поврежденного остаточной деформацией в виде изгиба.

Характерная деформация орбиты отражает неравномерную жесткость диагностируемого узла в определенных направлениях, что позволяет значительно сузить участок исследуемого узла и сделать вывод о его техническом состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное применение методик моделирования напряженно-деформированного состояния

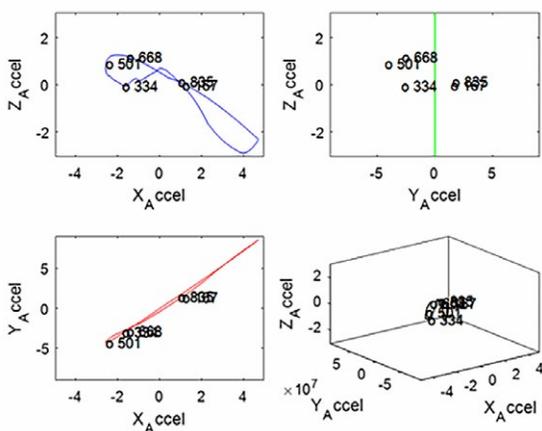


Рис. 9. Орбита движения исследуемой точки элемента подвеса, поврежденной остаточной деформацией.

Fig. 9. The orbit of motion of the studied point of the suspension element damaged by residual deformation.

с последующим вейвлет-анализом волновых процессов в моноличных шпильках узла подвеса ездовых балок подъемно-транспортного оборудования машинных залов тоннельных эскалаторов метрополитена значительно повышает надежность диагностических процедур, дает возможность диагностирования их технического состояния без разрушения строительных конструкций, позволяет обоснованно принимать решения о дальнейшей эксплуатации сооружения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Я.С. Ватулин — поиск публикаций по теме статьи, анализ проблем диагностирования закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов, написание текста рукописи, создание изображений; В.А. Попов — проверка основных положений и предположений статьи, написание текста рукописи; В.Н. Дятлов — редактирование текста рукописи, создание и редактирование изображений, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors contribution. Y.S. Vatulin — search for publications on the subject of the article, analysis of problems of diagnosing embedded elements of crane tracks of lifting equipment in the machine halls of tunnel escalators, writing the text of the manuscript, creating images; V.A. Popov — checking the main provisions and assumptions of the article, writing the text of the manuscript; V.N. Dyatlov — editing the text of the manuscript, creating and editing images, approval of the final version. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding source. The authors state that there is no external funding for the study.

ЛИТЕРАТУРА

- Bardyshev O., Gordienko V. Some Aspects of Maintaining Inclined Tunnel Escalators in St. Petersburg // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. P. 202–207. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.202
- Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // *Вестник МАДИ*. 2022. №1 (68). С. 29–35.
- Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена. // *Вестник МАДИ*. 2022. № 3 (70). С. 46–50.
- Bardishev O.A., Druginin P.V., Repin S., et al. Method of safety control of transport and technological machines in the initial period of operation (on the example of tunnel escalators) // *Bulletin of Civil Engineers*. N 6(71). P. 129–134. doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-129-134
- Бардышев О.А., Попов В.А., Коровин С.К., и др. Мониторинг технического состояния технических устройств на опасных производственных объектах // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 1. С. 52–56. doi: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56
- Kazarinov N., Smirnov A., Petrov Y., et al. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. P. 01020. doi: 10.1051/e3sconf/202015701020
- Бардышев О.А. О диагностировании технических устройств // *Безопасность труда в промышленности*. 2019. № 7. С. 44–48. doi: 10.24000/0409-2961-2019-7-44-48
- Benin A., Semenov S., Bogdanova E. The Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with Different Types of Bars Carrying Capacity // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 53. P. 01047. doi: 10.1051/mateconf/20165301047
- Petrov Y., Kazarinov N. Instabilities encountered in the dynamic crack propagation process under impact loading as a natural consequence of the dynamic fracture discreteness // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 1975–1980. doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.021
- Efanov D., Osadchy G., Sedykh D., et al. Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines // *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, Yerevan, Armenia. 2016. P 1–8. doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807691
- Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. P. 06021. doi: 10.1051/e3sconf/202015706021
- Ulitskiy V., Alekseev S., Kondrat'ev S. Experimental evaluation of the deformational calculation method of foundations for overpasses of high-speed railways // Petriaev A., Konon A. (eds) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 50. Singapore: Springer. 2020. P. 83–91. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_10
- Герасименко П.В., Ходаковский В.А. Численный алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек железнодорожных цистерн // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2019. Т. 6. № 2. С. 308–314. doi: 10.1134/S1063454119020067
- Uzdin A.M., Freze M.V., Fedorova M.Y., et al. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018. Vol. 55, N 3. P. 201–208. doi: 10.1007/s11204-018-9526-0
- Benin A., Guzijan-Dilber M., Diachenko L., et al. Finite element simulation of a motorway bridge collapse using the concrete damage plasticity model // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. P. 06018. doi: 10.1051/e3sconf/202015706018
- Barausov V.A., Bubnov V.P., Sultonov S.Kh. Simulation modeling in methods and designs for detecting ice or snow buildup on control surface in MATLAB/SIMULINK dynamic modeling environment // *CEUR Workshop Proceedings. Models and Methods for Researching Information System in Transport*, Dec. 11–12, 2020, St. Petersburg, Russia. 2020. Vol. 2803. P. 136–141. Режим доступа: <https://ceur-ws.org/Vol-2803/paper19.pdf>
- Lavrov K., Semenov A., Benin A. Modeling of nonlinear multiaxial deformation of concrete on the base of hyperelastic orthotropic model // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 53. P. 01043. doi: 10.1051/mateconf/20165301043
- Kudryavtsev S., Valtseva T., Bugunov S., et al. Numerical simulation of the work of a low-settlement embankment on a pile foundation in the process of permafrost soil thawing // Petriaev, A., Konon, A. (eds) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 50. Singapore: Springer. P. 73–82. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_9

REFERENCES

- Bardyshev O., Gordienko V. Some Aspects of Maintaining Inclined Tunnel Escalators in St. Petersburg. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;725–726:202–207. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.202
- Dyatlov VN. Modeling of the process of corrosion of the supporting metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022;1(68):29–35. (in Russ).
- Dyatlov VN. Refinement of the model for the development of corrosion defects in the supporting metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022;3(70):46–50. (in Russ).
- Bardishev OA, Druginin PV, Repin S, et al. Method of safety control of transport and technological machines in the initial period of operation (on the example of tunnel escalators). *Bulletin of Civil Engineers*. 2018;6(71):129–134. doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-129-134.
- Bardyshev OA, Popov VA, Korovin SK, et al. Monitoring of the technical condition of technical devices at hazardous production facilities. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2020;1:52–56. doi: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56 (in Russ).
- Kazarinov N, Smirnov A, Petrov Y, et al. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete

- mechanical system. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:01020. doi: 10.1051/e3sconf/202015701020
7. Bardyshev OA. About diagnosing technical devices. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019;7:44–48. doi: 10.24000/0409-2961-2019-7-44-48 (in Russ).
8. Benin A, Semenov S, Bogdanova E. The Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with Different Types of Bars Carrying Capacity. *MATEC Web of Conferences*. 2016;53:01047. doi: 10.1051/mateconf/20165301047
9. Petrov Y, Kazarinov N. Instabilities encountered in the dynamic crack propagation process under impact loading as a natural consequence of the dynamic fracture discreteness. *Procedia Structural Integrity*. 2020;28:1975–1980. doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.021
10. Efanov D, Osadchy G, Sedykh D, et al. Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines. *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia*. 2016:1–8. doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807691
11. Uzdin A, Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:06021. doi: 10.1051/e3sconf/202015706021
12. Ulitskiy V, Alekseev S, Kondrat'ev S. Experimental evaluation of the deformational calculation method of foundations for overpasses of high-speed railways. In: Petriaev A., Konon A. (eds) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer. 2020:83–91. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_10
13. Gerasimenko PV, Khodakovskiy VA. Numerical algorithm for studying the stress-strain state of cylindrical shells

- of railway tanks. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*. 2019;6(2):308–314. doi: 10.1134/S1063454119020067 (in Russ).
14. Uzdin AM, Freze MV, Fedorova MY, et al. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018;55(3):201–208. doi: 10.1007/s11204-018-9526-0
15. Benin A, Guzijan-Dilber M, Diachenko L, et al. Finite element simulation of a motorway bridge collapse using the concrete damage plasticity model. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:06018. doi: 10.1051/e3sconf/202015706018
16. Barausov VA, Bubnov VP, Sultonov SKh. Simulation modeling in methods and designs for detecting ice or snow buildup on control surface in MATLAB/SIMULINK dynamic modeling environment. In: *CEUR Workshop Proceedings. Models and Methods for Researching Information System in Transport, Dec. 11-12, 2020, St. Petersburg, Russia*. 2020;2803:136–141. Available from: <https://ceur-ws.org/Vol-2803/paper19.pdf>
17. Lavrov K, Semenov A, Benin A. Modeling of nonlinear multiaxial deformation of concrete on the base of hyperelastic orthotropic model. *MATEC Web of Conferences*. 2016;53:01043. doi: 10.1051/mateconf/20165301043
18. Kudryavtsev S, Valtseva T, Bugunov S, et al. Numerical simulation of the work of a low-settlement embankment on a pile foundation in the process of permafrost soil thawing. In: Petriaev, A., Konon, A. (eds) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer. 2020:73–82. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_9

ОБ АВТОРАХ

***Дятлов Вячеслав Николаевич**, старший преподаватель, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»;
адрес: Россия, 182101, Великие Луки,
проспект Гагарина, д. 95;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>;
eLibrary SPIN: 2978-6706;
e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Ватулин Ян Семенович, к.т.н., доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6271-0399>;
eLibrary SPIN: 4657-8668;
e-mail: yan-roos@yandex.ru

Попов Валерий Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>;
eLibrary SPIN: 2418-7152;
e-mail: vpopov_58@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

***Vyacheslav N. Dyatlov**, Senior Lecturer, postgraduate student of the Mechanical Handling and Road Building Machines Department;
address: 95 Gagarina Avenue, 182100 Velikiye Luki, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>;
eLibrary SPIN: 2978-6706;
e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Yan S. Vatulin, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Mechanical Handling and Road Building Machines Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6271-0399>;
eLibrary SPIN: 4657-8668;
e-mail: yan-roos@yandex.ru

Valeriy A. Popov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Mechanical Handling and Road Building Machines Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>;
eLibrary SPIN: 2418-7152;
e-mail: vpopov_58@mail.ru

*Corresponding author