

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭСКАЛАТОРОВ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Попов В.А., Коровина М.С., Щербаков А.В.

MAGNETOACOUSTIC MONITORING OF ESCALATORS PETERSBURG SUBWAY

Popov V., Korovina M., Shcherbakov A.

Рассмотрены вопросы создания системы магнитоакустического мониторинга новых эскалаторов Санкт-Петербургского метрополитена типа ЭТХ, предназначенной для предварительного выявления и последующей локализации источников негативного воздействия на металлоконструкцию и механизмы эскалаторов при переходе на систему ТО и Р "по состоянию". Обоснован методологический подход к решению метрологических задач комплексной регистрации сигналов магнитных и акустических возмущений и создания алгоритмов их пространственно-временной обработки. Приведены факторы, влияющие на эффективность выявления нарушений эксплуатационных режимов с формированием упреждающего прогноза. Предлагается модель состояния эскалатора на основе одновременной оценки результатов замеров векторных характеристик абсолютной вибрации в различных точках эскалатора и пространственного анализа собственных магнитных полей рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений. Приведены результаты вейвлет-анализа этих характеристик, а также рассмотрен пример классификации состояния элементов эскалатора по этим результатам.

Ключевые слова: эскалатор, мониторинг, магнитный контроль, вибрационный контроль, вейвлет-анализ.

Постановка проблемы. В настоящее время метрополитен в Санкт-Петербурге является основным видом городского транспорта, перевозящим более 2 млн пассажиров в сутки и обеспечивающим межрайонную транспортную доступность. Одной из главных особенностей Петербургского метрополитена является глубокое заложение станций (до 70 м), связанное с геологическими условиями района. Доставка пассажиров к поездам осуществляется тоннельными эскалаторами, которые установлены практически на всех станциях. Кроме того, пересадочные узлы между станциями также оборудованы эскалаторами.

Эксплуатация эскалаторов в метрополитене имеет ряд особенностей, они связаны с напряженностью ритма работы и загруженностью транспортных систем в часы "пик", отсутствием возможности остановки оборудования для производства ремонтных работ по причине возникновения опасной ситуации.

Надежная и безопасная работа оборудования обеспечивается своевременным производством планово-предупредительных и капитальных ремонтов, выполняемых по заранее разработанному графику, связанному с пробегом эскалаторов (ТОиР "по наработке"). Организация работ, связанная с техническим обслуживанием, ремонтом эскалаторов, в значительной степени определяет экономические показатели эффективности эксплуатации оборудования. Регулярность, периодичность производства работ, объем, степень детализации в настоящее время оценивается экспертным путем, часто только на основе имеющегося опыта эксплуатации оборудования, без какой-либо оценки величины остаточного ресурса элементов эскалаторов.

При переходе на систему ТОиР "по состоянию", которая позволит снизить эксплуатационные расходы, необходимо внедрение системы мониторинга технического состояния элементов и узлов эскалаторов, в том числе с применением методов магнитоакустического контроля.

Анализ последних исследований и публикаций. Информативность современных методов неразрушающего контроля значительно повышается при одновременном использовании акустических и магнитных шумов, несущих различную информацию о состоянии контролируемых машин и механизмов. К ней относятся импульсы электродвижущей силы и акустические сигналы при изменении напряжений в ферромагнитных материалах, напряженность собственных магнитных полей рассеяния при

работе электрических, гидравлических и механических приводов машин (Филинов В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитно-акустических шумов.- М.: Машиностроение, 2000. -154 с.). Исследована связь параметров акустических шумов перемагничивания с механическими и магнитными свойствами ферромагнетиков, скоростью продольных, поперечных и поверхностных волн в материалах при их нагружении (Берман А.В., Ватулин Я.С., Коровин С.К. Магнитоакустический мониторинг подъемных сооружений.- СПб. : ООО « Издательство ОМ-Пресс». 2010-340 с.) и ряд других.

Цель статьи. Анализ особенностей применения систем магнитоакустического мониторинга машин и механизмов на примере эскалаторов Петербургского метрополитена. Оценка эффективности различных алгоритмов обработки результатов магнитоакустического мониторинга и обоснование целесообразности комплексного контроля акустических и магнитных параметров состояния машин и механизмов в режиме мониторинга по сравнению с другими методами неразрушающего контроля.

В 2011-2012 гг. кафедрой “Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины” Петербургского государственного университета путей сообщения проводились комплексные исследования конструкций новых эскалаторов типа ЭТХ Петербургского метрополитена, установленных в подземных переходах между станциями “Спасская-Сенная площадь” и “Спасская-Садовая”. Одной из задач исследования было выявление возможности применения комплексного магнитоакустического метода контроля текущего состояния элементов эскалаторов в режиме мониторинга.

Для решения задачи магнитного контроля использовался измерительный комплекс на основе 3-х компонентных феррозондов, построенных на преобразователях Холла ПХЭ606117В (магнитная чувствительность >200 мкВ/мТл) и ПХЭ606118В (магнитная чувствительность >30 мкВ/мТл)

производства научно-производственной фирмы “Сенсор” г. Санкт-Петербург; комплекса АСК-3117 с усилителем; пакета прикладных программ для управления и обмена с АСК-310х APP-3007 и профессиональной версии программного обеспечения АСК-3107-РО. Виброконтроль производился с применением векторного вибропреобразователя абсолютной вибрации типа ВТК, усилителя заряда трёхканального УТК 2 (общепромышленное исполнение), комплекса АСК-3117, пакета прикладных программ для управления и обмена с АСК-310х APP-3007 и профессиональной версии программного обеспечения АСК-3107-РО.

Характерные места выборочного контроля напряженно-деформированного состояния элементов ферм секций, вертикальных листов ферм и вертикальных листов креплений криволинейных направляющих эскалатора ЭТХ представлены на рис.1.

Процесс магнитного мониторинга осуществлялся на макроуровне: в рабочем состоянии, без ревизии агрегатов. Признаком повреждения конструкции выбиралось резкое изменение значений и знака собственных магнитных полей рассеяния. При проведении вибродиагностики в качестве дефектов конструкции было принято:

- в виде трещины или системы трещин общей длиной более 2 мм; наличие хрупкого разрушения;
- коррозионные повреждения более 10% эффективного сечения несущего элемента;
- общая деформация стержневого элемента со стрелой прогиба более 1/500 длины элемента;
- деградация механических свойств металла по критерию ударной вязкости.

Методы магнитного мониторинга: пространственный анализ напряжённости собственных магнитных полей рассеяния металла в зоне развивающихся повреждений объекта посредством проведения вейвлет-анализа для идентификации локальных источников собственных магнитных полей рассеяния в отдельных узлах контроля.

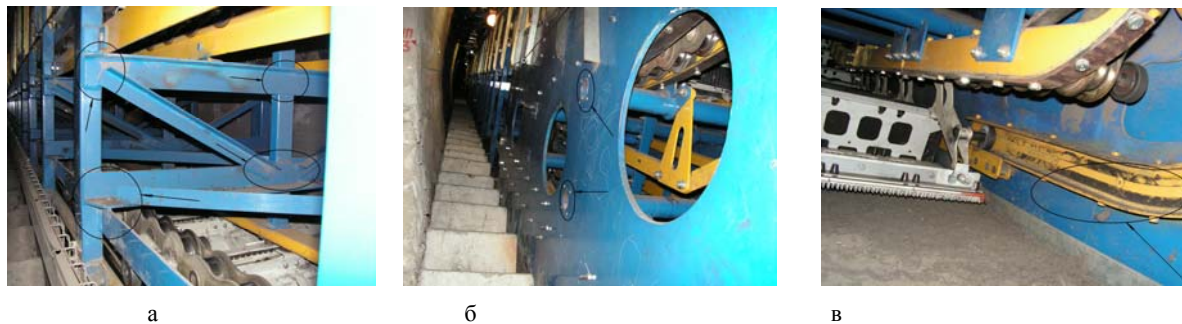


Рис.1. Характерные места выборочного контроля эскалаторов ЭТХ: а - элементы ферм секций; б - вертикальные листы ферм; в - вертикальные листы ферм в местах креплений криволинейных направляющих

Классификация состояния определялась по результатам вейвлет-анализа. Классификационным признаком считалось скачкообразное изменение знака и величины напряжённости магнитного поля рассеяния в зонах концентрации напряжений и деформаций по компонентам вектора.

При анализе результатов вибромониторинга применялся метод тестовой диагностики, требующий формирования искусственных возмущений, действующих на элементы металлоконструкции эскалатора. Состояние ответственных элементов оценивалось по степени искажения возмущений. Предметом изучения являются только те искажения, которые возникают при их передаче через крепления.

В качестве модели распространения энергии звука была выбрана модель Е. Скучика и А. Болотина (волновое представление). В волновом представлении любую механическую систему можно представить её характеристическим импедансом, коэффициентом отражения её 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. Эти характеристики дают представления о механических свойствах колебательной системы. Такие дефекты, как жёсткость узлов крепления, изменение профиля несущей части резьбы, ослабление элементов крепления в конструкциях испытуемых узлов, связаны с параметрами перечисленных характеристик.

При обработке результатов измерений применялся вейвлет-анализ с оценкой амплитудной модуляции в поддиапазонах частот, фигур Лиссажу, числа резонансных контуров и антирезонансов, декрементов затухания, фазочастотной модуляции [1]. Классификационными признаками были выбраны параметры многоконтурной механической колебательной системы конструкции узла, а именно - геометрические и массовые характеристики элементов металлоконструкций, вид и жёсткость креплений. Эти параметры характеризуются частотой мод и их формой, определяющийся как число резонансных механических колебательных контуров и число антирезонансов в спектре сигнала; фазочастотными характеристиками (отражения от неоднородностей, где происходит переворот фазы, формы фигур Лиссажу); затуханием сплошной части спектра при многократном отражении; декрементами затухания дискретных составляющих спектра; периодом фокусировки лучей при многократном отражении от границ узлов и дефектов (время, через которое многократные отражения лучей от границ элементов металлоконструкции придут в точку наблюдения в фазе).

Вторичная обработка результатов виброизмерений заключалась в составлении двумерных относительных значений признаков, относящихся к двум классам элементов металлоконструкции - эталон и испытуемые элементы.

Применение вейвлет-анализа для оценки указанных характеристик в отличие от Фурье-анализа позволяет более полно выявить амплитудно-фазочастотную структуру сигнала.

В зависимости от типа дефектов (трещина или утонение, смятие резьбы и др.) при обработке сигналов использовался определенный тип вейвлета (Шеннон, Гаусс, Добеши), который фокусировался на определенную область частот сигнала. Качество элементов металлоконструкций оценивалось по двухбалльной системе: балл 1 - неудовлетворительное качество; балл 2 - удовлетворительное качество. Баллом 1 оценивались элементы с дефектами, сигналы от которых превышают браковочный уровень чувствительности. Баллом 2 - элементы, в которых не обнаружены дефекты, сигналы которых превышают браковочный уровень чувствительности.

Используемый метод тестовой диагностики требует формирования искусственного возмущения, нормированного по энергетическому параметру, поэтому требуется стабильное значение амплитудно-частотных характеристик воздействия.

Для определения состояния элементов металлоконструкций используется процедура создания вибропортрета с помощью векторного датчика вибрации, а также динамического твердомера (рис. 2) для создания тестового сигнала и определения поверхностной твёрдости, характеризующей склонность металла к хрупкому разрушению.

Использование вейвлет-анализа [1-4] по каждой из компонент вектора способствует выявлению отклонений состояния материала элементов эскалатора от первичных значений и позволяет предсказать снижение прочностных характеристик конструкции, своевременно принять меры по предупреждению аварийной ситуации на исследуемом объекте. В качестве исходной информации использовались магнитограммы и виброграммы одного и того же сечения металла вертикальных листов, полученные за период мониторинга (июнь 2011 – июнь 2012 гг.). Применение вейвлет-анализа связано с большим уровнем электромагнитных помех от работающих электродвигателей привода эскалатора в виде короткоживущих высокочастотных компонент и позволило выделить низкочастотные компоненты основного сигнала. Удаление шума при помощи вейвлет-преобразования выполнялось в четыре этапа: разложения сигнала по базису вейвлетов; выбора порогового значения шума для каждого уровня

разложения; пороговой фильтрации коэффициентов детализации; реконструкции сигнала. Другими причинами применения вейвлет-анализа являлись сжатие информации и выявление долговременной эволюции. Это позволило увидеть локальные кратковременные особенности сигнала, связанные со сбоями в показаниях датчиков. Проведение локализации и классификации особых точек и вычисление различных фрактальных характеристик, а также выполнение частотно-временного анализа нестационарных сигналов позволило выделить участки интенсивного износа криволинейных

направляющих, в том числе и с наличием трещин. На основе вейвлет-анализа получены количественные оценки параметра Херста, подтверждена необходимость предварительного разделения данных вибро- и магнитограмм на нестационарную (тренд) и осцилляторную части.

Результаты контроля напряжённости магнитного поля вертикальных листов ферм в местах креплений направляющих представлены на рис. 3.

Результаты магнитного мониторинга (рис. 4) подтверждают визуальные наблюдения и данные ультразвуковой толщинометрии.



Рис. 2. Процедура создания вибропортрета элементов металлоконструкций.

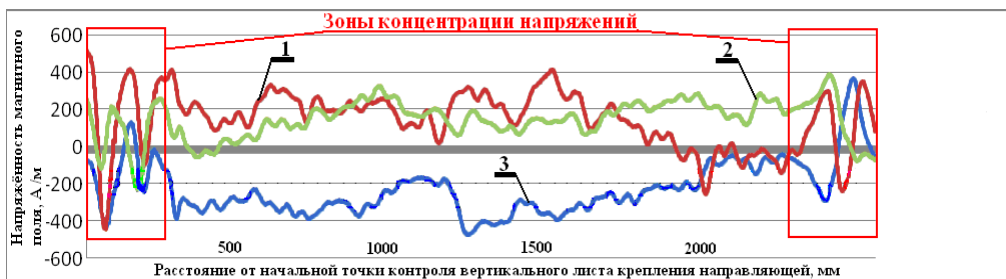


Рис. 3. Результаты контроля напряжённости магнитного поля вертикальных листов ферм металлоконструкции эскалатора в местах креплений направляющих (переход «Спасская» - «Садовая», режим «спуск»): 1 – нормальный к поверхности контроля компонент вектора напряжённости магнитного поля; 2 – компонент вектора напряжённости магнитного поля вдоль траектории движения; 3 – компонент напряжённости магнитного поля поперёк траектории движения.

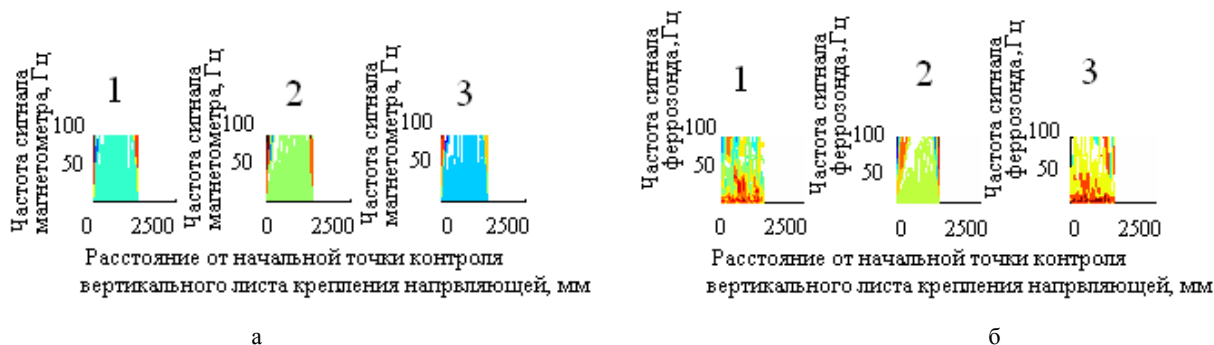


Рис. 4. Результаты вейвлет-анализа напряжённости магнитного поля вертикальных листов ферм металлоконструкции эскалатора в местах креплений направляющих (переход «Спасская» - «Садовая», режим «спуск»): 1 – нормальный к поверхности контроля компонент вектора напряжённости магнитного поля; 2 – компонент вектора напряжённости магнитного поля вдоль траектории движения; 3 – компонент напряжённости магнитного поля поперёк траектории движения; а – июнь 2011 г.; б – июнь 2012 г.

Наиболее интенсивные изменения состояния материала вертикальных листов наблюдаются по нормальной компоненте (рис. 4 а, б) в местах начала и конца криволинейного участка направляющей (рис.1,в) и соответствуют участкам максимального износа направляющей.

Представленные на рис. 4 результаты вейвлет-анализа напряжённости магнитного поля показывают значительное возрастание энергии по 1 и 3-х компонентам вектора напряжённости магнитного поля, особенно в области низких частот. Последнее указывает на интенсификацию процессов деградации материала вертикальных листов в результате усталости и износа. Результаты мониторинга показали перспективность применения трёхкомпонентных феррозондов для контроля состояния элементов эскалаторов на основе метода магнитной памяти металла.

При проведении вибромониторинга характеристический импеданс сложной колебательной системы, состоящей из нескольких связанных контуров, представляет собой дискретно-сплошной спектр отраженного сигнала. Дискретные составляющие спектра частотно-

модулированы, поскольку при распространении фазовая скорость определяется как

$$C_{\phi} = \alpha \sqrt{f_0} .$$

Ширина дискрет соответствует индексу частотно-модулированного сигнала и зависит от степени связи контуров, т.е. от их добротности и жёсткости. В табл. 1 приведены средние частоты мод в зависимости от диаметра стержня закладных элементов креплений металлоконструкции эскалатора. Известно, что при коррозии стержень утончается. На рис. 5 представлена зависимость резонансных частот стержня закладных элементов креплений от его диаметра.

Рассматриваемая зависимость пропорциональна индексу частотной модуляции, т.к. фазовая скорость изменяется с частотой. Ввиду нелинейных искажений при распространении из-за дисперсии (частотной зависимости) фазовой скорости возникают биения на частотах $f_{cp} - f$ и $f_{cp} + f$. Разностные частоты дискрет находятся в диапазоне частот 350-900 Гц.

Таблица 1

Зависимость резонансных частот стержня закладных элементов креплений от его диаметра

Номер моды	Частота, Гц				
	16 мм	15,5 мм	15 мм	14,5 мм	14 мм
1	1509.6	1416.7	1326.8	1239.78	1155.8
2	2516	2361.2	2211.4	2066.4	1926.3
3	3522.4	3305.7	3095.9	2892.9	2696.9
4	4528.9	4250	3980	3719	3467
5	5535	5194	4864	4546	4238

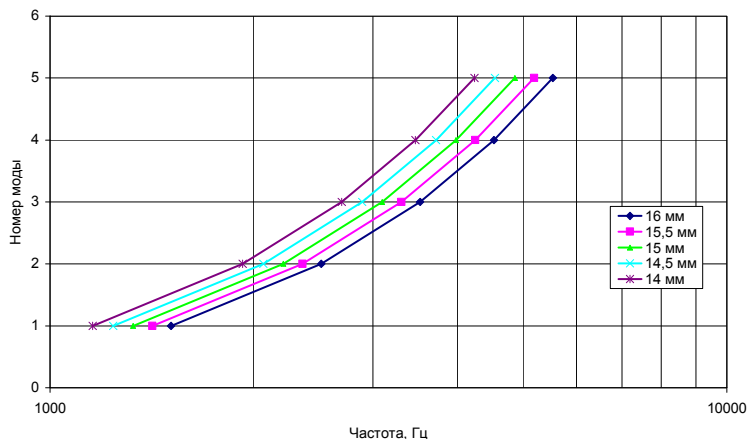


Рис. 5. Зависимость резонансных частот стержня закладных элементов креплений от его диаметра

Ввиду меньших значений фазовой скорости относительно групповой на величину фазы равную π происходит синфазное сложение, что приводит к амплитудной модуляции сигнала в соответствии с длиной волны. Поэтому при многократном отражении волн происходит чередование максимумов и минимумов амплитуд. Период их зависит от длины волны. С точки зрения волновой теории существуют интерференционные и дифракционные волны, параметры которых зависят от зон Френеля (1-я, 2-я и т.д.).

Поскольку в стержнях закладных элементов креплений распространяются поверхностные волны (Рэлея, Лэмба) их спектр представляет собой не кольца (зоны) Френеля, а эллипсы. Отношения осей этих эллипсов зависят от коэффициента Пуассона. В стержнях закладных элементов креплений без дефектов формы мод имеют периодическое чередование максимумов и минимумов. При $R \gg \lambda$ (R - расстояние) радиус зоны Френеля равен

$$r_m = \sqrt{R\lambda m} \quad (\lambda - \text{длина волны, } m - \text{номер зоны}).$$

В результате многократного прохождения сигнала через зоны Френеля спектр его представляет определенное периодическое сочетание низких и высоких частот. В случае дефекта (коррозии) изменяется коэффициент Пуассона, изменяется диаметр стержней закладных элементов креплений, увеличивается рассеянная компонента сигнала, уменьшается или отсутствует когерентная компонента. Величина рассеянной компоненты (её амплитуда) при волнах Рэлея зависит от размеров дефекта и его формы. В случае точечной коррозии имеет место полусферическая выемка. В случае сплошной коррозии - цилиндрическая выемка.

Дефект может характеризоваться параметром $D = 2\pi r A^2$, где r - расстояние, A - амплитуда отраженного сигнала. Наличие и степень коррозии дополнительно характеризуются двумя параметрами: индексом частотной модуляции средних частот мод; коэффициентом амплитудной модуляции.

Первый параметр связан с задержкой сигналов при наличии дефекта, его размеров (коррозии), а второй - с величиной рассеянной компоненты, т.е. соотношения дискрет и сплошной части спектра.

В качестве признаков состояния по критерию несущей способности применялся интегрированный параметр, представляющий собой взаимосвязь между характеристиками модуляции сигнала и наличием типового повреждения в элементе.

Одним из характерных повторяющихся критериев динамического спектра является

длительность спектра сигнала на основной частоте (или частотах) при изменении сигнала на 40дБ, см. рис. 6.

Характер спада частот со временем представлен на рис. 7. Дефектные участки носят криволинейный характер, а бездефектные - убывающий. Характерным признаком наличия коррозионного повреждения является амплитудно-частотная модуляция с овальными по форме, регулярно повторяющимися изображениями движения волн вибрации в теле соединения.

Обработка результатов измерений для стержней с элементами коррозии представлена на рис. 8.

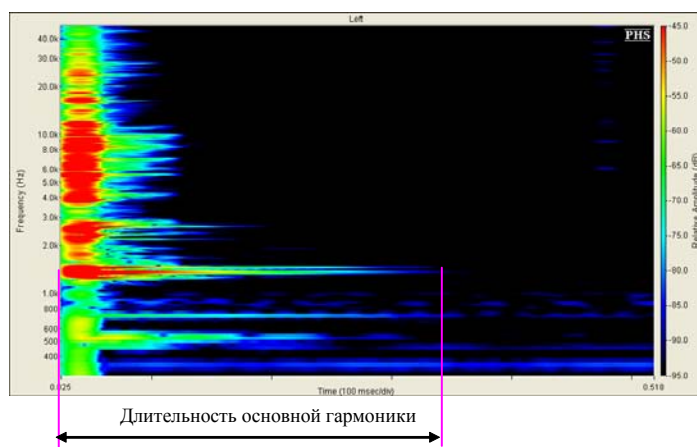


Рис. 6. Выбор диагностического признака по динамическому спектру (стержень со снижением площади поперечного сечения)

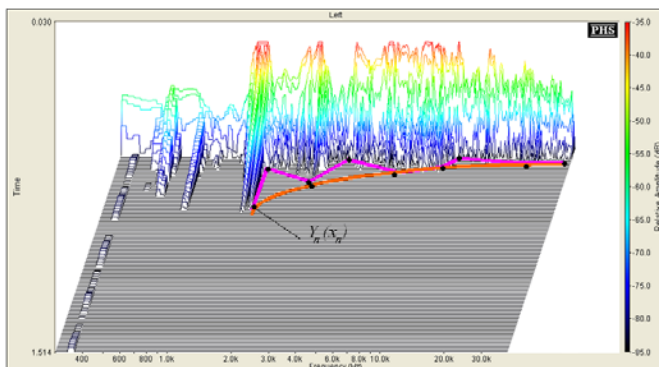


Рис. 7. Характер спадания частот со временем (синим – дефектный (криволинейный) характер убывания; красным – бездефектный, плавный)

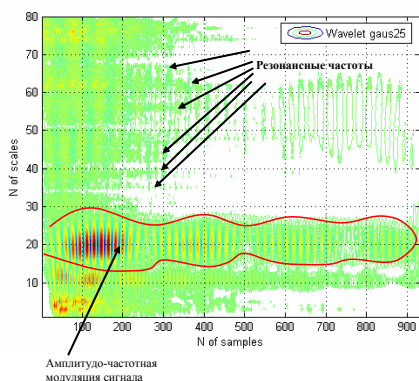


Рис. 8. Выбор диагностического признака коррозионного повреждения с применением вейвлет-представления спектра сигнала

В процессе обработки результатов измерений производилась кластеризация образов дефектов конструкции по следующим показателям: изменению частот первых гармоник и их соотношения для трёх узлов (контуров) собственных изгибных колебаний стержней; эффективной ширины дискретных составляющих; длительности затухания дискрет; затухания в спектрах в поддиапазонах частот до 8 кГц.

Функциональная зависимость огибающей спектра амплитудно-частотных характеристик стержней закладных элементов креплений представлена следующим полиномами:

$$T(f)=0,28f^2-12,27f+445,33 \text{ (без дефектов);}$$

$T(f)=0,15f^2-7,37f+361,55$ (деформированный стержень);

$T(f)=0,11f^2-4f+119,08$ (стержень со снижением эффективной площади поперечного сечения на 20%);

$T(f)=0,08f^2-2,73f+41,46$ (стержень со снижением эффективной площади поперечного сечения на 30%);

$T(f)=0,17f^2-3,34f+206,1$ (стержень с коррозионным повреждением до 30% эффективной площади поперечного сечения).

Анализ результатов натурального эксперимента выявил выделение дискретных составляющих в низкочастотном диапазоне 0,3-1 кГц (разностные

частоты биений): для стержня без дефектов 1-я гармоника изменяется на частотах 470-570 Гц при изменении нагрузки 0,5 - 7 тонн, 1-я гармоника 2-го контура – на частотах 570-680 Гц при изменении нагрузки 0,5-7 тонн; для деформированного стержня 1-я гармоника изменяется на частотах 400-480 Гц, 2-я, 3-я и 4-я гармоники 4-х контуров с 440 до 750 Гц при изменении нагрузки 0,5 - 7 тонн; для стержня с надпилами 1-я гармоника изменяется на частотах 390-480 Гц, 2-я, 3-я и 4-я гармоники 4-х контуров с 570 до 750 Гц при изменении нагрузки; для стержня с утонением 1-я и 2-я гармоники изменяются с 440 до 550 Гц, 3-я гармоника с 620 до 750 Гц при изменении нагрузки.

Частоты биений собственных колебаний увеличиваются при возрастании нагрузки линейно в пределах упругости материала. Изменяются также и соотношения частот, что свидетельствует об изменении жесткости между узлами (контурами). На границе упругого и текучего состояний металла наблюдается скачок частоты (и соответственно фазы), после которого наблюдается нелинейное изменение частот при увеличении ширины дискретных составляющих, что соответствует изменению добротности контуров. Аналогичное изменение частоты и увеличение эффективной ширины дискрет наблюдалось и на образцах с предварительным разрезом по диаметру стержня в одной точке или в области (что эквивалентно определённому проценту коррозии). Время затухания сигнала на 40 дБ стержней с дефектами существенно меньше бездефектных образцов.

Технология определения степени снижения несущей способности металлоконструкции и стержней их крепления к фундаментам требует проведения паспортизации этих элементов для каждого эскалатора на станции метрополитена (создание вибропортретов). При линейном изменении характеристик стержней закладных элементов крепления (частот первых гармоник, их соотношения, длительности затухания при уменьшении на 40дБ), т.е. в стадии упругих деформаций можно принять решение о том, что ситуация неопасна. В случае нелинейного изменения перечисленных признаков металл стержней находится в стадии пластической деформации и элемент требует немедленной замены.

Вывод. Таким образом, применение магнитоакустического мониторинга металлоконструкций эскалаторов и их креплений к фундаментам позволяет прогнозировать их техническое состояние, планировать упреждающие мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту с целью снижения затрат.

Л и т е р а т у р а

1. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB/ Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.

2. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО “Тиссо”, 2004. – 424 с.

3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам, перевод. Ижевск.: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 464 с.

4. Иванов А. Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи: Измерения, анализ, тестирование, мониторинг. - М.: Компания “Сайрус Системс”, 2000. – 375 с.

References

1. Osnovy teorii vejvletov. Vejvlety v MATLAB/ N.K. Smolencev. – М.: DMK Press, 2008. – 448 s.

2. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizicheskie osnovy metoda magnitnoj pamjati metalla. M.: ЗАО “Tisso”, 2004. – 424 s.

3. Dobeshi I. Desjat' lekcij po vejvletam, perevod. Izhevsk.: NIC “Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika”, 2001. – 464 s.

4. Ivanov A. B. Kontrol' sootvetstvija v telekommunikacijah i svjazi: Izmerenija, analiz, testirovanie, monitoring. - M.: Kompanija “Sajrus Systems”, 2000. – 375 s.

Попов В.А., Коровина М.С., Щербаков А.В. Магнітоакустичний моніторинг ескалаторів Петербурзького метрополітену

Розглянуто питання створення системи магнітоакустичного моніторингу нових ескалаторів Санкт-Петербурзького метрополітену типу ETX, призначеної для попереднього виявлення і подальшої локалізації джерел негативного впливу на металоконструкцію і механізми ескалаторів при переході на систему ТО і Р "за станом". Обгрунтовано методологічний підхід до вирішення метрологічних завдань комплексної реєстрації сигналів магнітних і акустичних збурень і створення алгоритмів їхньої просторово-часової обробки. Наведено фактори, що впливають на ефективність виявлення порушень експлуатаційних режимів з формуванням попереджувального прогнозу. Пропонується модель стану ескалатора на основі одночасної оцінки результатів замірів векторних характеристик абсолютної вібрації в різних точках ескалатора та просторового аналізу власних магнітних полів розсіювання металу в зоні розвиваються пошкоджень, що розвиваються.

Наведено результати вейвлет-аналізу цих характеристик, а також розглянуто приклад класифікації стану елементів ескалатора за цими результатами.

Ключові слова: ескалатор, моніторинг, магнітний контроль, вібраційний контроль, вейвлет-аналіз.

Popov V., Korovina M., Shcherbakov A. Magnetoacoustic monitoring of escalators Petersburg subway

The problems of establishing a system for monitoring the magneto new escalators St. Petersburg underground type ETX intended for preliminary identification and subsequent localization of the negative impact on the steel structure and mechanisms of the escalators in the transition to a maintenance system and P "as". Sound methodological approach to solving complex problems of metrological signal recording magnetic and acoustic disturbances and the creation of algorithms for their spatial and temporal processing. Shows the factors affecting the efficiency of detecting violations of operating conditions with the formation of pre-emptive forecast. A model status of the escalator on the basis of simultaneous measurements of vector evaluation absolute vibration characteristics at various points of the escalator and spatial analysis of the intrinsic magnetic stray fields of metal in the developing lesions. The results of wavelet analysis of these characteristics, and consider an example classification of state of the elements of the escalator on these results.

Keywords: escalator, monitoring, magnetic control, vibration control, the wavelet analysis.

Попов В.А. - к.т.н., завідувач кафедри “Підіймно-транспортні, дорожні та будівельні машини” ПГУПС, Санкт-Петербург, Росія, e-mail: vpopov_58@mail.ru

Коровина М.С. - асистент кафедри “Автоматизоване проектування” ПГУПС, Санкт-Петербург, Росія, e-mail: mkorovina.spb@mail.ru

Щербаков О.В. - аспірант ПГУПС, Санкт-Петербург, Росія, e-mail: shcherbakov85@mail.ru

Статья подана 14.07.20