

К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ЭСКАЛАТОРОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Козлов М.Н.

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

Ключевые слова: эскалатор, вибромониторинг, обработка сигналов, вейвлет-преобразование, сонографический анализ, пространственный годограф.

Аннотация. Предложена методика и разработано техническое решение задачи оценки технического состояния тоннельных эскалаторов на основе сравнительного вибропортретирования в характерных точках металлоконструкции. Показано, что для адекватной оценки технического состояния конструкции необходимо и достаточно выполнять измерение временных зависимостей проекций вектора ускорения по трем осям в характерных точках, а именно: участках вертикальных листов в районе привода зоны «М»; участках сопряжения секций ферм (в местах установки промежуточных и крайних опор); зон крепления криволинейных направляющих эскалатора; на направляющих натяжного устройства зоны «А». Обработка полученных сигналов с помощью метода построения пространственных годографов, сонографического анализа и вейвлет-преобразования позволяют однозначно определить дефектное состояние конструкции и определить его положение. Показано, что применение пространственных годографов вектора ускорения позволяет оценивать степень деградации жесткостных свойств конструкции эскалаторного оборудования, а применение сонографического и вейвлет-преобразования позволяет оценивать интенсивность контактного взаимодействия между отдельными узлами и элементами, а также характер диссипации энергии при данном взаимодействии. Предложенная методика апробирована на эскалаторе типа ЭС-04. Приведены результаты измерений и обработки сигналов от датчика в характерных точках конструкции эскалатора. Дано описание разработанного измерительно-диагностического комплекса.

ON THE ISSUE OF EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMICS OF THE SUBWAY ESCALATORS

Kozlov M.N.

Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg

Keywords: escalator, vibration monitoring, signal processing, wavelet transform, sonographic analysis, spatial hodograph.

Abstract. A technique is proposed and a technical solution to the problem of assessing the technical condition of tunnel escalators based on comparative vibration portraiture at characteristic points of the metal structure is developed. It is shown that for an adequate assessment of the technical condition of the structure, it is necessary and sufficient to measure the time dependencies of the projections of the acceleration vector along three axes at characteristic points, namely: sections of vertical sheets in the area of the drive zone "M"; sections of the coupling of sections of trusses (in places of installation of intermediate and extreme supports); zones of attachment of curved escalator guides; on the guides of the tension device of zone "A". Processing of the received signals using the method of constructing spatial hodographs, sonographic analysis and wavelet transform makes it possible to uniquely determine the defective state of the structure and determine its position. It is shown that the use of spatial hodographs of the acceleration vector makes it possible to assess the degree of degradation of the rigidity properties of the escalator equipment structure, and the use of sonographic and wavelet transformations makes it possible to assess the intensity of contact interaction between individual nodes and elements, as well as the nature of energy dissipation during this interaction. The proposed method has been tested on an escalator of the ЭС-04 type. The results of measurements and processing of signals from the sensor at the characteristic points of the escalator structure are presented. The description of the developed measuring and diagnostic complex is given.

Введение

Бесперебойная работа и обеспечение высокой пропускной способности станций глубокого заложения современных метрополитенов в условиях увеличенных пассажиропотоков в существенной степени зависит от надежной работы эскалаторов. К наиболее значимым факторам, влияющим на надежную работу эскалаторов относятся

технология и качество обслуживания и ремонта, а также уровень и организация мониторинга технического состояния во время эксплуатации.

Мониторинг технического состояния эскалатора представляет собой достаточно сложную техническую задачу. Это связано как расположением несущих металлоконструкций и основных движущих элементов эскалатора в труднодоступных местах, так и с тяжелыми условиями работы эскалаторов, которые приводят к неравномерному и трудно выявляемому износу, связанному с совместным воздействием на его узлы и детали вибраций, знакопеременных статических и динамических нагрузок, агрессивных сред, загрязнителей и абразивных материалов в зазорах между движущимися деталями.

Серьезным недостатком применяемого сегодня подхода «по наработке» является то, что в промежутках между регламентными мероприятиями оборудование зачастую остается без какого – либо контроля текущего состояния. В результате дефекты и предаварийные состояния выявляются с опозданием, что является в настоящее время одной из причин аварийных остановок и длительных внеплановых ремонтов эскалаторов и, как следствие, снижения уровня безопасности и провозной способности метрополитена в целом. Таким образом, задача разработки методов анализа и мониторинга технического состояния эскалаторов является актуальной.

Задача анализа технического состояния эскалаторов не является новой. В настоящее время благодаря накоплению и анализу статистических данных по отказам и аварийным остановкам эскалаторов разработаны методики [1, 2] мониторинга технического состояния металлоконструкций и приводов эскалаторов на основе анализа напряженно-деформированного состояния в статических режимах. В частности, проведены комплексные исследования состояния конструкций эскалаторов типов ЭТХООО «Конструктор», ТК65, ЭС – 02, 04, разработанных СКБЭ ЗАО «Эс-сервис». Обобщение опыта данных исследований позволило сформировать и классифицировать характерные повреждения эксплуатируемых эскалаторов, а именно: поверхностный износ деталей, абразивное истирание, коррозионный и усталостный износ (рис. 1).

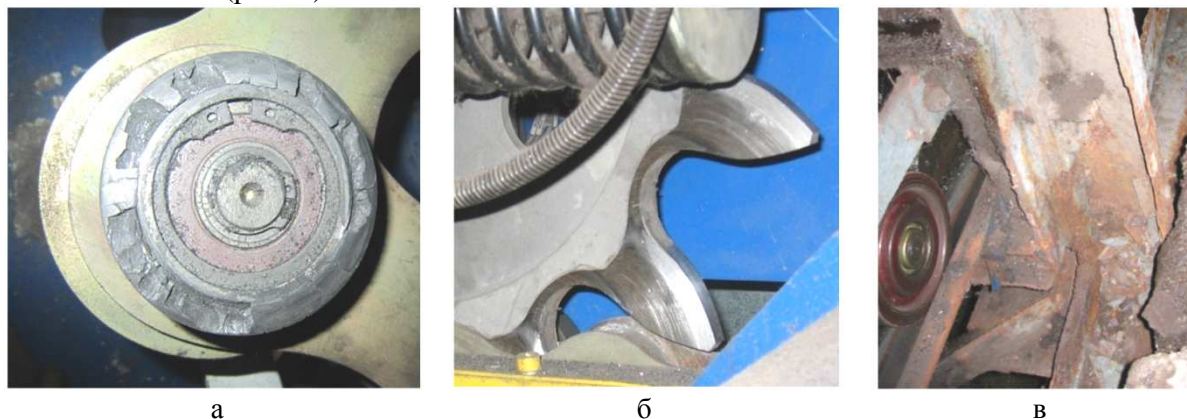


Рис. 1. Характерные повреждения узлов эскалаторов: поверхностный износ (а), абразивное истирание (б), коррозия и усталостный износ (в)

Опыт эксплуатации эскалаторов показывает, что возникновению предельных состояний предшествуют длительные процессы, обусловленные в том числе сложными взаимосвязанными механическими и электрохимическими процессами, приводящими к изменению строения межкусталлитной связей и соответственно физико-механических свойств металла. Эти процессы возникают не одновременно и имеют тенденцию к накоплению местных повреждений (очагов хрупкого разрушения) металлоконструкции эскалатора, что приводит к деструкции и в конечном итоге к разрушению одной или одновременно нескольких структурных составляющих металла с лавинообразной эволюцией процесса в виде развития магистральных трещин и разделения целостности объема объекта на отдельные части. Это приводит в свою очередь к изменению картины взаимодействия движущихся элементов эскалатора и появлению значительных ударных нагрузок, т.е.

возникновению характерных динамических процессов, являющихся причиной появления широкополосных составляющих вибрации, амплитуда и спектральный состав которых существенно зависит от степени развития дефектов.

Практика исследования и мониторинга сложных технических систем с высоконагруженными движущимися элементами показывает, что для непрерывного мониторинга технического состояния указанных систем, работающих в условиях знакопеременных динамических нагрузок целесообразно использовать методы вибродиагностики. Разработанные в настоящее время методы вибродиагностики, а именно магнитоакустические методы и вибрационные методы [3, 4] модального анализа успешно применяются для анализа и мониторинга технического состояния турбоагрегатов, насосов, компрессоров и другого оборудования. Ввиду того, что эскалатор также является сложной высоконагруженной системой, подверженной, как уже отмечалось, значительным вибрационным нагрузкам, изменяющимся в зависимости от степени износа конструктивных элементов, указанные методики целесообразно расширить и адаптировать применительно к анализу его технического состояния. Решение задачи в указанной постановке в настоящее время отсутствует, что делает актуальной тему настоящей статьи.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов анализа технического состояния эскалаторов на основе вибрационного мониторинга. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: анализ особенностей применения существующих методов вибромониторинга технического состояния узлов и агрегатов эскалаторов, оценка эффективности различных алгоритмов обработки экспериментальных результатов с целью формирования вибропортрета для контроля текущего технического состояния эскалаторного оборудования, а также разработка рекомендаций по повышению эффективности методов вибродиагностики на основе алгоритмов оценки энергетического состояния системы методами вейвлет-преобразования, сонографического анализа и конфигурации годографов.

Методы исследований

Как известно, в процессе работы энергия колебательных процессов взаимодействующих между собой сопряженных элементов и узлов оборудования частично поглощается при их взаимном перемещении под воздействием трения в узлах сочленения, а также локальной деформации этих элементов на участках контактирования. Дефектные состояния конструкции в значительной степени влияют на характер диссипации энергии в объекте. Это означает, что в качестве характерных признаков наличия дефекта могут выступать изменения динамических параметров колебательного процесса, свойственных данному типу дефекта, а именно: амплитуда, частота, фаза, тип и периодичность модуляции сигнала.

Мониторинг указанных параметров колебательных процессов не требует остановки машины, обладает высоким быстродействием, что делает возможным не только осуществление непрерывного мониторинга конструкции, но и обнаружение неисправностей на этапе их зарождения, а также заблаговременную остановку оборудования или выдачу рекомендаций по ограничению режимов работы, при наличии риска возникновения аварийной ситуации, обусловленную наличием дефектов. Данный метод получил название вибрационно-энтропийной оценки состояния узлов машин (технология «Entropy»). Недостатком метода является необходимость применения специальных алгоритмов для выделения вибрационного сигнала, обусловленного наличием неисправности, на фоне большого количества, возмущающих факторов, характерных для нормального режима работы.

Одним из методов определения наличия дефекта и определения его типа является применение математических алгоритмов интерпретации изменения кинетической энергии колебательного процесса: сонографический анализ, методы вейвлет-преобразования, анализ годографов вектора ускорения.

Сонографический анализ, или анализ спектрограмм, применяется для идентификации малозаметных повторяющихся и пересекающихся во временной области периодических энергетических флуктуаций в сигнале. Наличие дефекта обычно проявляется характерным

размытием спектра («развитием боковых лепестков»), «плаванием» частоты, потерей полуволны и пр. Для исследования быстропротекающих процессов в данном исследовании используется методика записи информации перекрывающимися фреймами режиме реального времени, а для обработки – специальная оконная функция «Кайзера», которая позволяет выбирать степень подавления боковых лепестков.

Вейвлет-преобразование позволяет эффективно анализировать характер временной динамики диссипации энергии в объекте, выявлять структурированность вибрационного сигнала, определять значимые мелкомасштабные вариации на фоне крупных структур (широкополосные возмущения). С помощью различного вида регулярных функций преобразования (вейвлетов) устанавливается зависимость «время – показатель масштаба – значение амплитуды вейвлет-преобразования», где низкие частоты сигнала представлены большими временными опорами, высокие частоты – короткими. Положение максимума спектра (масштаб) соответствует средней продолжительности элементарного события, характеризующий его вклад в энергию анализируемого процесса. Значение амплитуды вейвлет-преобразования определяются степенью корреляции между вейвлетом данного масштаба и поведением сигнала в окрестности рассматриваемой точки.

Анализ пространственных годографов вектора ускорения позволяет выполнять совместную оценку амплитуды и фазы колебаний конструкции в трехмерной постановке, а значит оценивать анизотропные прочностные свойства объекта. Если объект вибромониторинга в измерительной точке обладает свойством пространственной анизотропии прочности [5] – амплитудной (усталостной) или частотной (резонансной) разноподатливостью, то временная развертка, воспроизведенная с помощью волнового фазочувствительного преобразователя абсолютной пространственной вибрации, позволяет наблюдать проекции точек на ортогональные плоскости декартовых координат, изображаемые в виде годографа, в виде пространственного эллипсоида. Эллипсоид годографа отражает анизотропные свойства объекта как реакцию объекта исследования на внешние воздействия, с учетом множества дефектов и кинематических ограничений движению. Вследствие разнопрочности, или различия модулей упругости, размеры осей эллипсоида соответствуют абсолютным перемещениям измерительной точки. Малая ось эллипсоида соответствует абсолютным колебаниям измерительной точки в направлении минимальной податливости материала, большая ось – абсолютным колебаниям измерительной точки в направлении максимальной податливости. При этом оси проекции эллипсоида соответствуют проекциям амплитуд абсолютной вибрации на плоскости ортогональной системы координат [6, 7].

Таким образом, для оценки состояния процесса вибрации конструкции необходимо использовать вектор виброускорения, причем для его однозначного определения необходимо одновременно измерять проекции указанного вектора на три ортогональные оси. Пример такого измерительного комплекса представлен на рисунке 2.

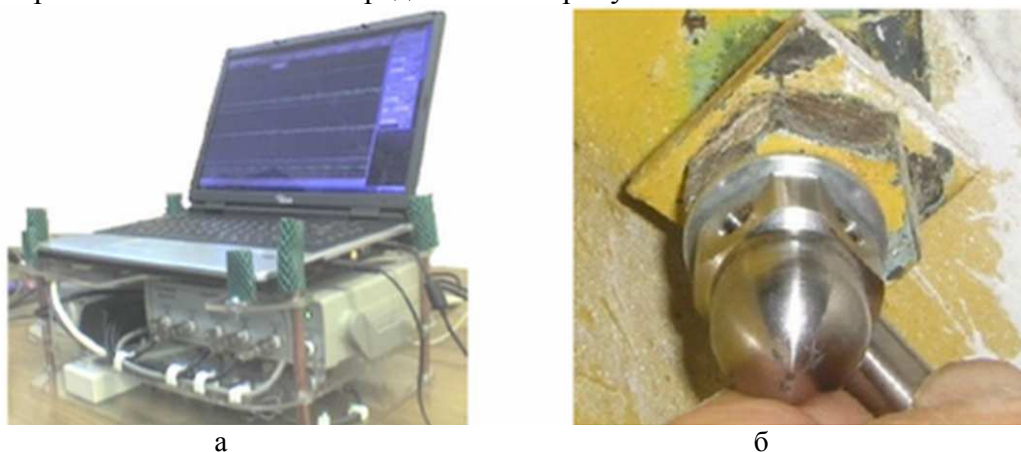


Рис. 2. Мобильный виброизмерительный комплекс (а) и трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр (б)

Практическая реализация описанного выше метода основана на применении измерительного комплекса [8], в состав которого входит следующее оборудование и программное обеспечение: векторный вибропреобразователь абсолютной вибрации типа ВТК 3-2, исполнение ВТК 1 (сертификат Госстандарт РФ RU.C/28/004/A № 12676, № 23241-02 Госреестр средств измерений); усилитель заряда УТК 2; комплекс АСК-3117 (SN№ 2372082012).

Данная методика была применена для анализа технического состояния закладных металлоконструкций сооружений метрополитена и доказала свою эффективность [9]. Ввиду наличия значительных динамических нагрузок и вибраций, характерных для эскалаторов, требуется определенная доработка и адаптация данной методики в части построения «вибропортрета» с целью «отсечки» фоновых шумов и вибраций, возникающих при нормальной работе эскалатора.

Процесс адаптации методики был сведен к последовательному решению следующих задач:

- определение точек измерения виброускорений на объекте;
- определение диагностических признаков повреждений эскалатора;
- разработка методов обработки полученных экспериментальных данных с целью оценки технического состояния эскалатора.

В качестве характерных мест контроля напряженно-деформированного состояния ферм эскалатора ЭС-04 выбраны (рис. 3) участки вертикальных листов в районе привода зоны «М»; участки сопряжения секций ферм (в местах установки промежуточных и крайних опор); зоны креплений криволинейных направляющих эскалатора; элементы направляющих натяжного устройства зоны «А».

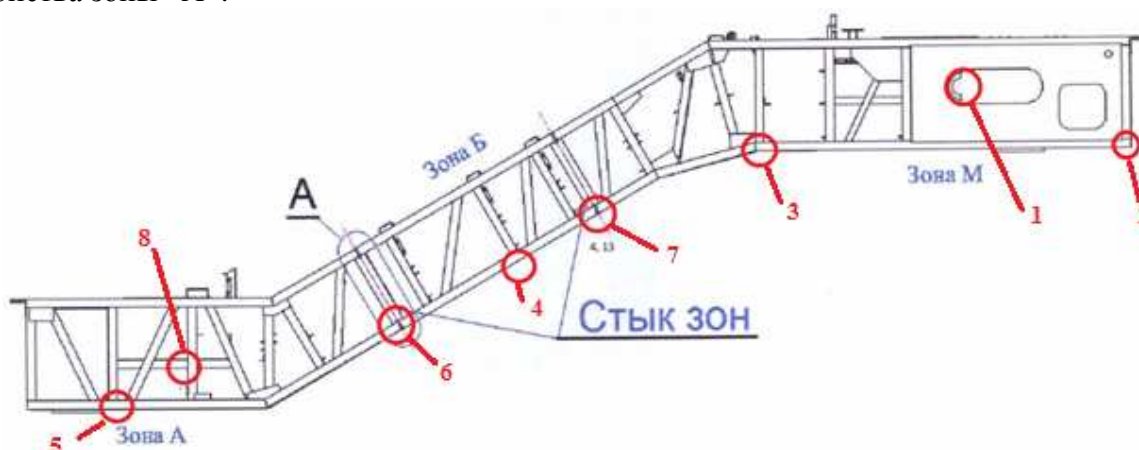


Рис. 3. Места измерения пространственного вектора виброускорения: 1 – вертикальные листы зоны М; 2, 4, 5 – места установки опор; 3 – зоны крепления криволинейных направляющих; 6, 7 – зоны стыков; 8 – элементы направляющих натяжного устройства

В качестве критерия оценки состояния конструкции на предмет наличия дефектов принято снижение жесткости элемента за счет изменения момента инерции сечения по причине коррозионного повреждения более 10% эффективного сечения несущего элемента; остаточной деформации стержневого элемента со стрелой прогиба более 1/500 длины элемента; деградация механических свойств металла по критерию ударной вязкости; повреждения в виде хрупкого разрушения или системы трещин общей длиной более 10 мм [10].

Практика применения методики позволила определить характерные признаки характерных повреждений эскалатора, а именно: сосредоточенный удар, перемещение элемента с трением (юз), деградация прочностных свойств металлоконструкции.

Так, для сосредоточенного удара характерно смещение энергии колебательного процесса из области низких частот (исправное состояние) в направлении высокочастотного спектра. Данное явление отражается на графиках спектральной плотности распределения энергии (см. рис. 4,а) синусоидальными кривыми с поднесущими составляющими по отведению X.

На сонограмме (рис. 4,б) процесс сопровождается мощным сосредоточенным возмущением по всему частотному диапазону, с одновременным снижением энергии в области низких частот. На скалограмме (рис. 4,в) процесс представлен высокоэнергетическим конусом прерывистой структуры с пролонгацией в пределах области средних частот по отведению X, и менее энергетически мощными по остальным отведениям.

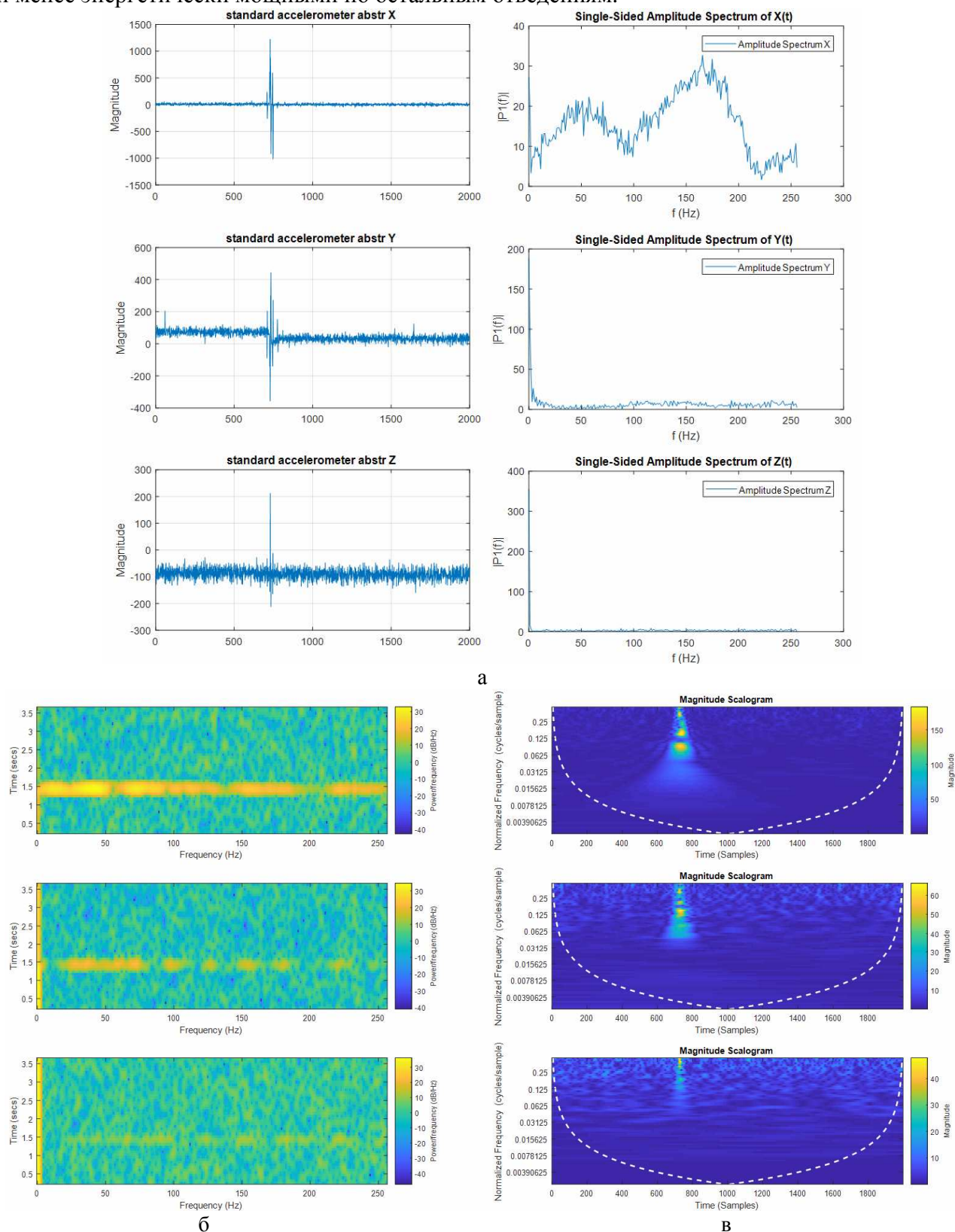


Рис. 4. Комплексная энергетическая характеристика дефекта в виде ударного взаимодействия сопряженных элементов (соответственно по отведениям X, Y, Z.): а – графики спектральной плотности, б – сонограмма, в – скалограмма вейвлет-представления

Характерной особенностью относительного перемещения элемента с трением скольжения (юз) является «размытие» энергии по всему диапазону измеряемых частот (рис. 5,а, отведение X) на изображении сонограммы. Скалограмма вейвлет-преобразования также по всем отведениям имеет подобный вид: фрагментированные флуктуации в пределах малых и средних масштабных коэффициентов (полоса низких и средних частот).

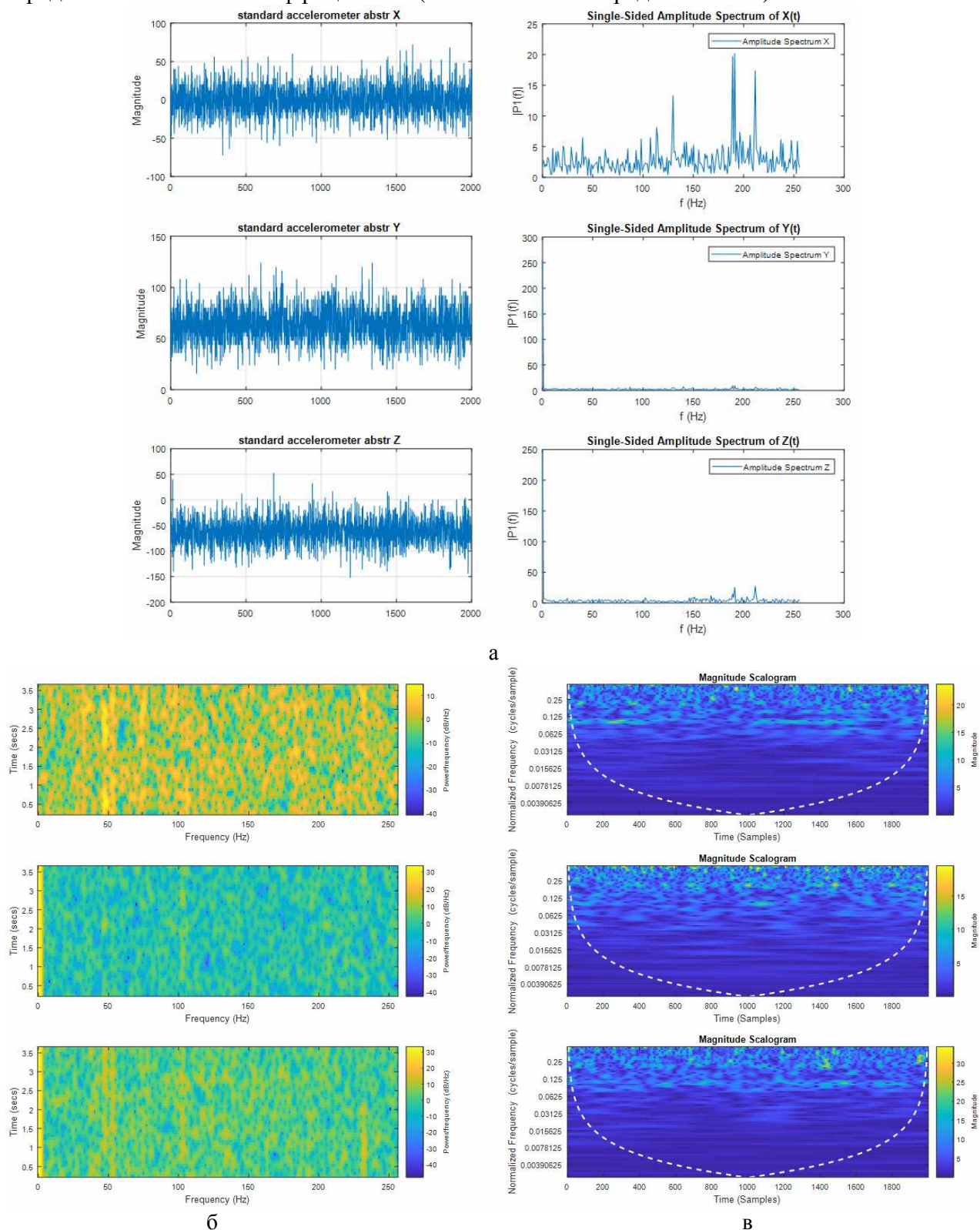


Рис. 5. Комплексная энергетическая характеристика дефекта контактирования элементов в процессе движения элементов кинематической пары под воздействием постоянной нагрузки (соответственно по отведениям X,Y,Z.): а – графики спектральной плотности, б – сонограмма, в – скалограмма вейвлет-представления

Деградацию жесткостных свойств конструкции эскалаторного оборудования (остаточная пластическая деформация, хрупкое разрушение различной природы, ослабление узлов разъемных сочленений) удобно определять с помощью пространственных годографов вектора ускорения, которые отражают изменение анизотропных прочностных свойств объекта (рис. 6).

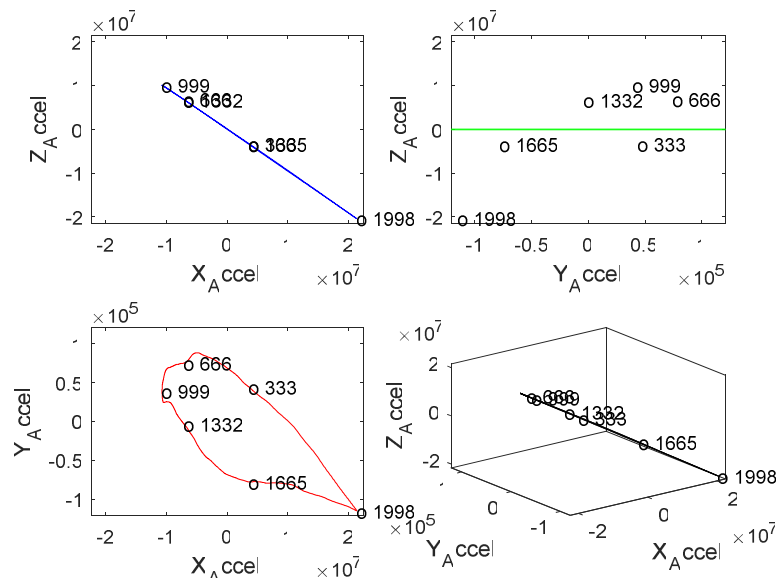


Рис. 6. Характерный вид пространственных годографов вектора ускорения при деградации жесткостных свойств объекта (прочностная анизотропия узла разъемного сочленения); видна характерная петля в плоскости X-Y

При эксплуатации оборудования вследствие износных явлений, деградации жесткостных свойств структурных компонентов происходит изменение условий контактного взаимодействия сопряженных элементов и кинематических пар, соответственно, изменяются и виброакустические процессы, сопровождающие это взаимодействие.

Принимая во внимание универсальный характер зависимостей физико-механических свойств деталей конструкции, осесимметричную геометрию конструкции, числа циклов и вид нагружения элементов, можно ожидать наличие прямой симметрии колебательных процессов в идентичных конструктивных элементах машины соответственно справа и слева относительно продольной оси машины.

Состояние узлов конструкции оценивается по степени идентичности характера диссипации энергии в симметрично расположенных сечениях конструкции, путем реализации процедуры нахождения разности значений амплитуд колебательного процесса симметричных элементов металлоконструкции эскалатора.

Отметим, что полная симметрия колебательных процессов в реально эксплуатируемом эскалаторном оборудовании, строго говоря, невозможна, поскольку в процессе эксплуатации изменяются допуски в сопряжениях элементов конструкций, соответственно изменяются и условия нагружения элементов. Этот факт означает наличие ненулевого остатка в створах измерения сигнала, что требует назначения допуска несимметрии для определения исправного состояния оборудования. Также для исправного состояния характерно постоянство во времени вибрационных параметров колебательного процесса. Указанные критерии постоянства вибрационных параметров и нахождение разности сигналов, полученных в идентичных левых и правых точках измерения, в поле допуска, используются для оценки состояния конструкции.

Результаты

Данный метод был применен для оценки состояния эскалатора ЭС-04. В качестве примера приведены результаты сравнительного анализа сигналов, полученных в левой и правой точках измерения в узле стыка зон М и Б (точка 7 на рис. 3). Проведены испытания

при движении на спуск и на подъем. Результаты, полученные после вычитания сигналов, представлены на рисунках 7 и 8.

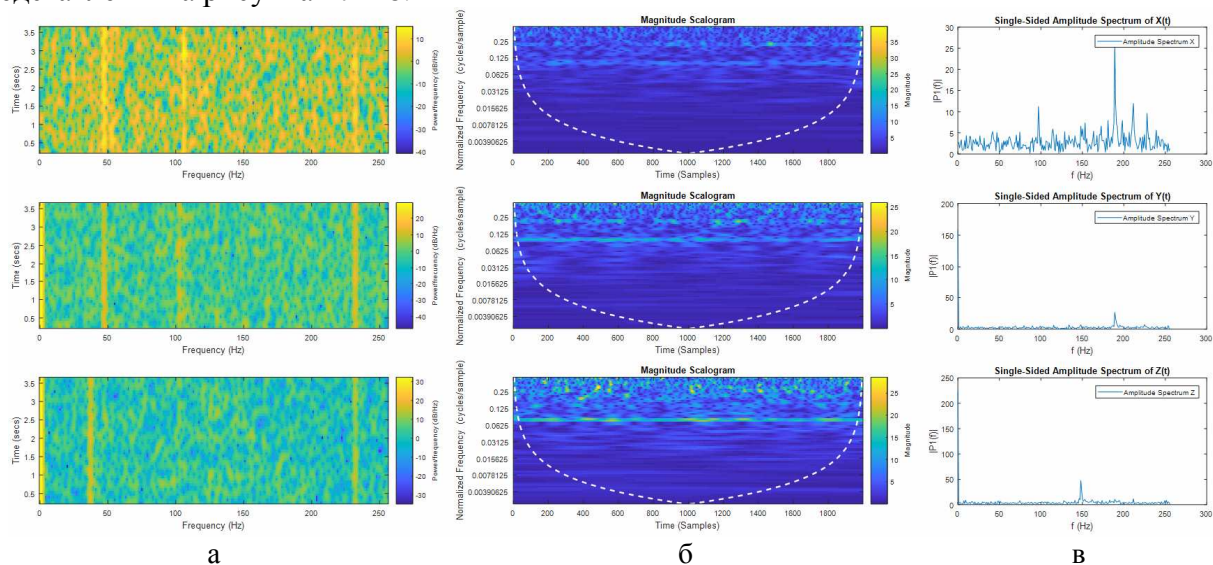


Рис. 7. Результаты обработки сигналов методом вычитания в узле стыка зон М и Б эскалатора при движении на подъем (соответственно по отведениям X, Y, Z.): а – сонограмма, б – скалограмма вейвлет-представления, в – графики спектральной плотности

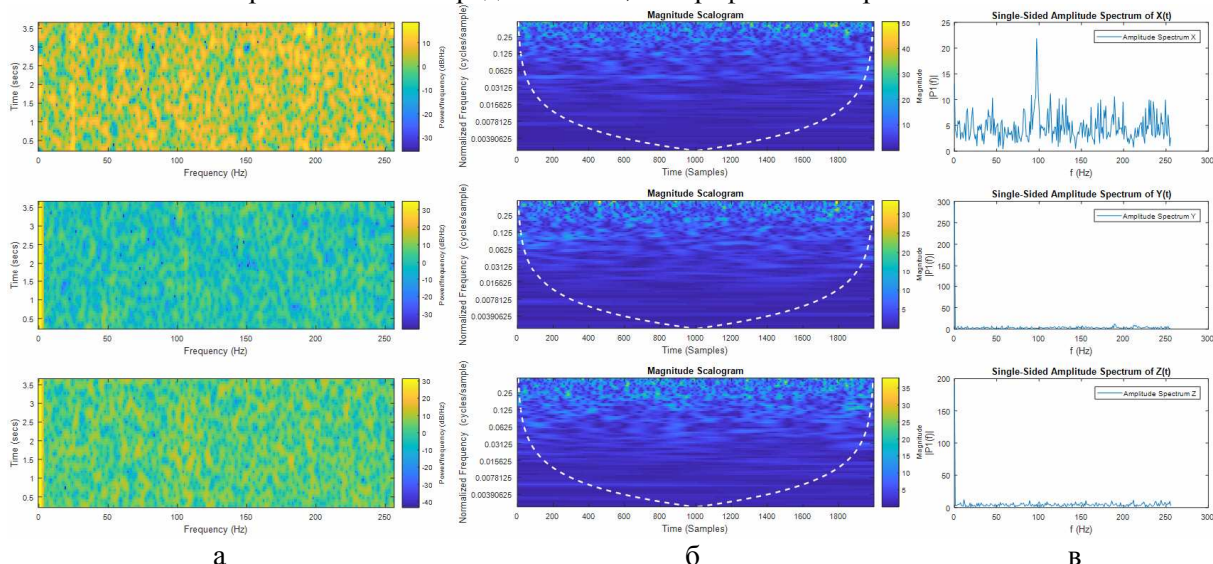


Рис. 8. Результаты обработки сигналов методом вычитания в узле стыка зон М и Б эскалатора при движении на спуск (соответственно по отведениям X, Y, Z.): а – сонограмма, б – скалограмма вейвлет-представления, в – графики спектральной плотности

Анализ полученных результатов позволил выявить наличие возмущающих факторов преимущественно по отведению X при движении на подъем. При движении на спуск энергетические флуктуации не обнаружены, энергетический фон повышен по отведению X. Общий анализ процессов позволил сделать вывод о том, что в узле стыка зон М и Б имеет место дефект нестабильного контактирования элементов в процессе движения под воздействием постоянной нагрузки, причем при движении на подъем проявление данного дефекта усиливается.

Как видно, предложенная методика позволяет оценивать техническое состояние эскалаторов, определять характерные дефекты и оценивать скорость их развития.

С целью организации работы автоматизированной системы мониторинга необходимо формализовать методику контроля текущего состояния оборудования таким образом, чтобы стало возможным реализовать ее алгоритм ограниченными средствами бортового процессора.

Формализацию алгоритма контрольных функций можно осуществить на основе структуры дерева диссипации энергии колебательного процесса представляемой рядом вейвлет-коэффициентов. Здесь критерием проявления дефекта может служить перераспределение энергии колебаний из области низких (в пределах 10-20 Гц) в область высоких частот. Соответствующее изменение частотного спектра неизбежно отражается на величине соответствующих вейвлет-коэффициентов.

Так, для случая обнаруженного дефекта распределение вейвлет коэффициентов представлено на рисунке 9. Развитие дефекта вызвало характерное возрастание амплитуды вейвлет-коэффициентов в диапазоне с 6 по 10 полосы энергетического спектра.

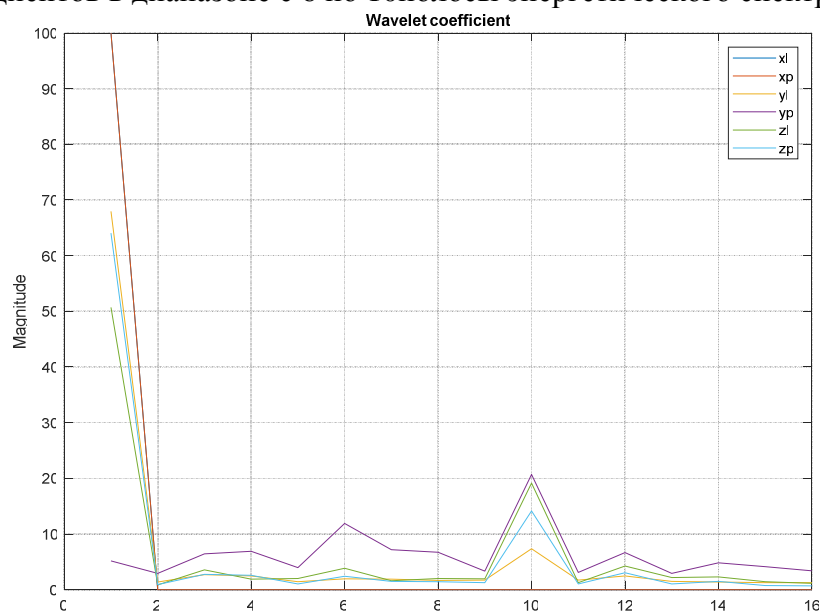


Рис. 9. Значения амплитуд вейвлет-коэффициентов при наличии дефекта в узле стыка зон М и Б эскалатора

Выводы и заключение

1. Представлена методика оценки технического состояния эскалаторов средствами вибродиагностики.

2. Показано, что применение вейвлет-преобразования, сонографического анализа, а также анализа годографов вектора ускорения позволяет определять техническое состояние эскалаторов и определять наиболее характерные типы дефектов, а именно: сосредоточенный удар, перемещение элемента с трением (юз), деградация прочностных свойств металлоконструкции.

3. Предложена методика автоматизированного мониторинга технического состояния эскалатора на основе анализа структуры дерева диссипации энергии колебательного процесса представляемой рядом вейвлет-коэффициентов, в качестве критерия проявления дефекта выбрано появление высокочастотных составляющих энергетического спектра.

4. Выполнена апробация предложенной методики и проведен анализ технического состояния эскалатора ЭС-04, позволивший определить дефект в узле стыка зон М и Б.

Список литературы

1. Бардышев О.А., Попов В.А., Коровин С.К., Филин А.Н. 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.
2. Репин С.В., Бардышев О.А., Попов В.А., Филин А.Н. Мониторинг транспортно-технологических машин // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 8. – С. 34-38.
3. Филинов В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитоакустических шумов. – М.: Машиностроение, 2000. –154 с.
4. Берман А.В., Ватулин Я.С., Коровин С.К. Магнитоакустический мониторинг подъемных сооружений. – СПб.: ООО «Издательство ОМ-Пресс», 2010. – 340 с.

5. Кобяков И., Сперанский А., Хориков А., Шатохин А., Калинин С. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств // Двигатель. – 2005. – №2. – С. 8-11.
6. Коровина М.С. Трехкомпонентные мэмс-датчики в системах мониторинга технического состояния специального самоходного подвижного состава // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – №7. – С. 84-91.
7. Бычковский Н.Н. Проблемы проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции транспортных сооружений и пути их решения – Саратов: СГТУ, 2008. – 810 с.
8. Подклетнов С.Г. Применение вейвлет-преобразования для обработки диагностической информации, полученной при эксплуатации эскалаторов, и использование результатов ее анализа для решения задач автоматизированного проектирования // Известия ПГУПС. – 2013. – №3. – С. 112-121.
9. Ватаев А.С., Ватулин Я.С., Великанов В.М., Ким К.К., Сочава М.В., Козлов М.Н. Анализ технического состояния закладных металлических конструкций сооружений метрополитена средствами конечно-элементного моделирования // Материаловедение. Энергетика. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 29-42. – doi.org/10.18721/JEST.28203.
10. Попов В.А., Бардышев О.А., Ватулин Я.С., Щербakov А.В. Оценка ресурса тоннельных эскалаторов петербургского метрополитена // Механизация строительства. – 2015. – №1. – С. 35-39.

References

1. Bardyshev O.A., Popov V.A., Korovin S.K., Filin A.N. Monitoring of the technical condition of technical devices at hazardous production facilities // Occupational safety in industry. 2020, no. 1, pp. 52-56. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56.
2. Repin S.V., Bardyshev O.A., Popov V.A., Filin A.N. Monitoring of transport and technological machines // Construction and road machines. 2021, no. 8, pp. 34-38.
3. Filinov V.V. Methods and devices for monitoring mechanical stresses based on the use of magnetic-acoustic noise. – M.: Mechanical Engineering, 2000. –154 p.
4. Berman A.V., Vatulin Ya.S., Korovin S.K. Magnetoacoustic monitoring of lifting structures. – SPb.: LLC "Publishing house OM-Press", 2010. – 340 p.
5. Kobayakov I., Speransky A., Khorikov A., Shatokhin A., Kalinin S. Knowledge of the vector characteristics of vibration is the key to the safety of technical devices // Engine. 2005, no. 2, pp. 8-11.
6. Korovina M.S. Three-component MEMS sensors in systems for monitoring the technical condition of special self-propelled rolling stock // News of the SPbSETU "LETI". 2013, no. 7, pp. 84-91.
7. Bychkovsky N.N. Problems of design, construction, operation, reconstruction of transport facilities and ways to solve them – Saratov: SSTU, 2008. – 810 p.
8. Podkletnov S.G. The use of the wavelet transform for processing diagnostic information obtained during the operation of escalators, and the use of the results of its analysis to solve computer-aided design problems // Proceedings of Petersburg Transport University. 2013, no. 3, pp. 112-121.
9. Vataev A.S., Vatulin Ya.S., Velikanov V.M., Kim K.K., Sochava M.V., Kozlov M.N. Analysis of the technical condition of embedded metal structures of metro structures by means of finite element modeling // Materials science. Energy. 2022, vol. 28, no. 2, pp. 29-42. doi.org/10.18721/JEST.28203.
10. Popov V.A., Bardyshev O.A., Vatulin Ya.S., Shcherbakov A.V. Resource assessment of tunnel escalators of the St. Petersburg metro // Mechanization of construction. 2015, no. 1, pp. 35-39.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Козлов Максим Николаевич – старший преподаватель	Kozlov Maksim Nikolaevich – senior lecturer
kozlov_m.n@mail.ru	

Получена 14.11.2023