

Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов

С. Г. Подклетнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ podklet@yandex.ru

Аннотация

Цель. Рассмотреть вопрос о необходимости улучшить выявление признаков дефектов эскалатора на ранних стадиях. Разработать и усовершенствовать методы тестовой и функциональной диагностики эскалаторов. Предложить методы цифровой обработки сигналов. Разработать правильную интерпретацию результатов обработки сигналов.

Методы. Применяются методы вибродиагностики и методы цифровой обработки сигналов: Фурье- и вейвлет-преобразования. Представлено сравнение методов Фурье- и вейвлет-преобразований. Показана возможность их успешного применения для обработки сигналов.

Результаты. Указана необходимость совершенствования параметров методики вибродиагностики и методов цифровой обработки сигналов: Фурье- и вейвлет-преобразования. Для повышения достоверности результатов расчета следует учитывать большую вариативность условий эксплуатации состояния тоннельных эскалаторов. Выявлена необходимость в проведении дополнительного исследования технического состояния тоннельных эскалаторов.

Практическая значимость. Преобразование Фурье, а также вейвлет-анализ выявляют изменение характера колебаний по отведениям (повышение/понижение уровня энергии в отведениях синфазно и диаметрально меняются местами в зависимости от варианта режима работы машины). Данное обстоятельство указывает на наличие зазоров, которые «выбираются» характерным образом всякий раз при смене направления движения. Если в материале присутствуют какие-либо неоднородности, то вейвлет-преобразование может получить необходимую информацию для определения дефектов конструкции, их место расположения и, предположительно, тип дефекта. Все это позволяет сделать нам вывод, что предложенные методики вейвлет- и Фурье-преобразований сигналов могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: вибродиагностика, эскалатор, цифровая обработка сигналов, Фурье-преобразование, вейвлет-преобразование

Для цитирования: Подклетнов С. Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 24–32. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32.

Original article

Application of Fourier Transform and Wavelet Transform Methods for Vibration Diagnostics of the Technical Condition of Tunnel Escalators

S. G. Podkletnov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ podklet@yandex.ru

Abstract

Aim. To consider the possibility of improving the detection of early signs of escalator defects. To develop and improve methods for testing and functional diagnostics of escalators. To propose methods for digital signal processing. To develop an approach for correcting interpretation of signal processing results.

Methods. The methods of vibration diagnostics and digital signal processing were used: including Fourier and wavelet transform. A comparison of Fourier and wavelet transform methods is presented. The possibility of their successful application for signal processing is shown.

Results. It was shown that the parameters of vibration diagnostic techniques and the methods of digital signal processing – Fourier transform and wavelet transform-require improvement. The reliability of calculation results can be increased by considering highly variable operational conditions of tunnel escalators. The need for additional examination of the technical condition of tunnel escalators is revealed.

Practical significance. Fourier transform and wavelet analysis reveal changes in the nature of oscillations along the leads (an increase or a decrease in the energy level in the leads in phase and diametrically change places depending on the operation mode of the machine). This circumstance indicates the presence of gaps that are «selected» in a characteristic manner every time the direction of movement is changed. When there are any inhomogeneities in the material, wavelet transform analysis may provide the necessary information to determine the design defects, along with their location and possible defect type. The above considerations make the proposed methods of Fourier and wavelet transform of signals to be practically feasible.

Keywords: vibration diagnostics, escalator, digital signal processing, Fourier transform, wavelet transform

For citation: Podkletnov S. G. Application of Fourier Transform and Wavelet Transform Methods for Vibration Diagnostics of the Technical Condition of Tunnel Escalators // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 24–32. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32.

Введение. При использовании какой-либо технической системы необходима оценка ее состояния, проводимая своевременно и точно. Такую оценку необходимо проводить, в частности, для эскалаторов, перевозящих людей с одного уровня поверхности на другой [1].

Эскалаторы – это важный производственный объект, связанный с опасностями для людей, который периодически необходимо подвергать экспертизе на предмет безопасности. Самое главное – это обеспечение безопасности людей при совершении поездок.

Большое значение имеет оценка технического состояния для эксплуатации эскалаторов, используемых в настоящее время. Современная оценка технического состояния эскалатора пока находится

в стадии становления. Используемый в настоящее время подход недостаточно объективен и полностью зависит от субъективных качеств исполнителя. При частых остановках эскалатор нужно ставить на ремонт – это сигнализирует о том, что эксплуатируемая техника находится в аварийном режиме, и начинает срабатывать датчик безопасности.

Сигнал для обработки снимается на элементе эскалатора в узле крепления эскалатора в районе зоны В (рис. 1) и рассчитывается таблица спектров колебаний в отведениях X , Y , Z . Исследование проводилось на эскалаторе тоннельном Христинича (ЭТХ).

На рис. 1 обозначены: 1 – зона А натяжной станции; 2 – зона Бн, первая в наклоне; 3 – зона Б,

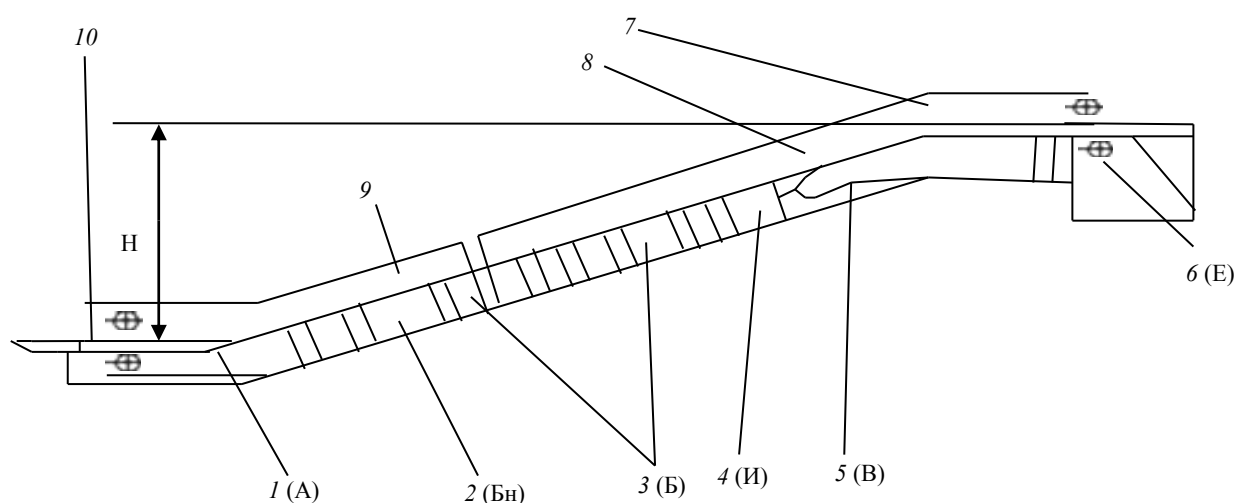


Рис. 1. Расположение зон эскалатора

Fig. 1. Location of escalator zones

средняя в наклоне; 4 – зона И, последняя в наклоне; 5 – зона В, переходная, место снятия сигнала; 6 – зона Е, промежуточная; 7 – поручень; 8 – балюстрада лестничное полотно; 9 – тяговые цепи и ступени; 10 – плиты перекрытий натяжной камеры.

Материалы и методы. Все виды технической диагностики можно разделить на функциональные (рабочие) и тестовые.

Функциональная диагностика бывает электрическая, вибрационная, тепловая и т. д. Главное – функциональная диагностика осуществляется объектом при выполнении им своих функций без прекращения работы. Оценки параметров технического состояния и принятие окончательного решения выполняются до того, как прекращается или изменяется работа объекта (рис. 2).

В отличие от функциональной, тестовая диагностика осуществляется по результатам реакции тестируемого объекта на внешнее воздействие. Внешнее воздействие проводится с использованием специального источника стимулирующего воздействия (рис. 2).

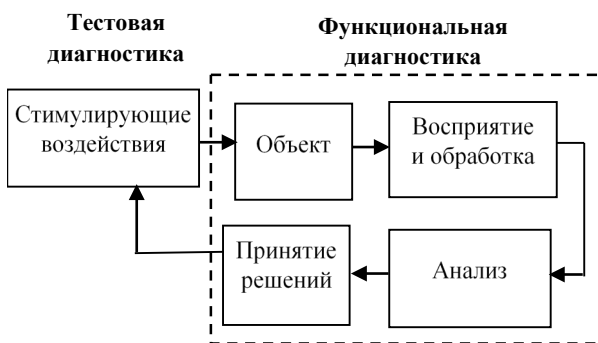


Рис. 2. Функциональная и тестовая диагностика объекта
Fig. 2. Functional and test diagnostics of the object

Основные операции диагностики проводятся на макроуровне (в рабочем и нерабочем состоянии, без ревизии агрегатов), предполагается выявление флуктуаций значений амплитудно-частотных характеристик в симметрично расположенных точках по сечениям (створам) конструкции. Резкое, несимметричное изменение значений свидетельствует, что, возможно, появился дефект конструкции. О предполагаемом дефекте конструкции говорит изменение модуля упругости материала, это свидетельствует о деградации материала и изменении момента инерции сечения элемента, что связано с пространственной или местной деформацией.

Несущая способность конструкции оценивается путем анализа спектра частот собственных

колебаний, который связан зависимостью со средней жесткостью элемента. Изменение спектральных характеристик диагностируемого элемента определяется отношением экспериментально измеряемых жесткостей опасных сечений элемента по отношению к квадратам соответствующих частот собственных колебаний. Степень снижения жесткости элемента отражает снижение ее несущей способности.

Для оценки состояния элементов текущие значения частот определяются экспериментально спектральным анализом виброграмм.

Сигналы подвергаются цифровой обработке с помощью Фурье-преобразования для частотного исследования сигнала [2], [3], а для исследования в частотно-временной области применяется вейвлет-преобразование [4]–[6].

Преобразование Фурье, или быстрое преобразование Фурье (БПФ), применяется, когда неважно изменение частотных характеристик сигнала во времени. При необходимости можно применить оконное преобразование Фурье [7], [8].

Проблемы частотного преобразования сигнала: большое отношение сигнал/шум и малая разрешающая способность анализа в высокочастотной области. Применение вейвлет-преобразования позволяет лучше выделять шумовую составляющую сигнала [9]–[12].

При эксплуатации эскалаторов встречаются следующие дефекты: трещины, прижоги, троститные пятна и т. д. Локальные дефекты можно рассмотреть как резкие кратковременные всплески с большой амплитудой, поэтому они лучше всего видны при визуализации детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала. При этом дефекты внутри своего класса имеют сходную форму, но отличаются по некоторым признакам: площади, глубине, размерам зон напряжения и т. д. На графике вейвлет-преобразования дефекты имеют вид пиков сигналов выше некоторого значения (рис. 3). На рис. 3, а представлен график снятия сигнала с дефектом. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – значение сигнала, снятого пьезодатчиком. На рис. 3, б представлен график вейвлет-преобразования данного сигнала. По оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат – масштабные коэффициенты вейвлет-преобразования от 1 до 5. Значение вейвлет-преобразования пока-

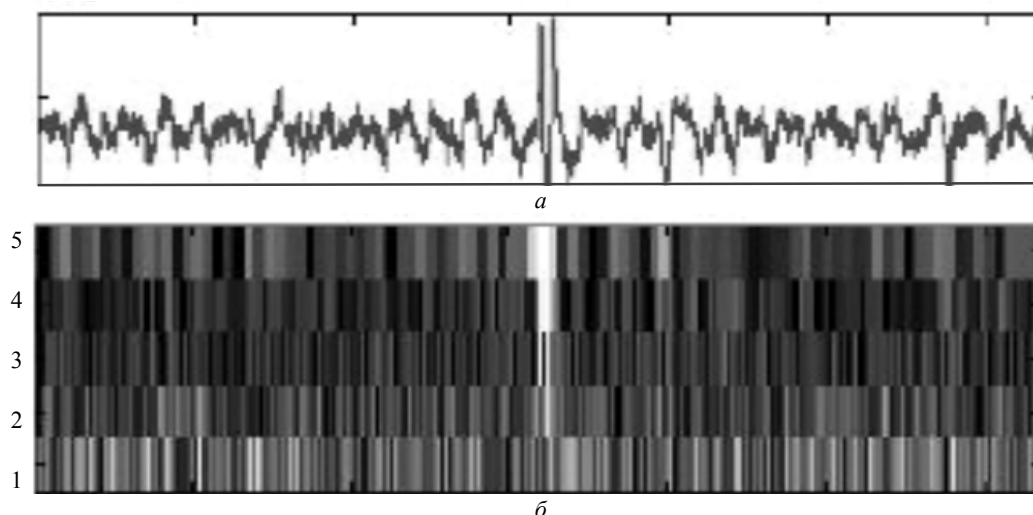


Рис. 3. Дефект-трещина и детализирующие коэффициенты вейвлет-преобразования исследуемого сигнала
Fig. 3. Crack defect and detailing coefficients of the wavelet transform of the signal under study

зано в градациях серого цвета: от 0 – черный, до максимального значения вейвлет-преобразования – белый цвет.

Задача распознавания дефектов базируется на различиях упорядоченной совокупности признаков распознавания, которые традиционно формируют на основе полученных в результате наблюдений различных параметров классифицируемого объекта.

Полученные в результате вейвлет-разложения вибросигнала коэффициенты в простейшем случае могут быть проанализированы в частотных диапазонах в поисках характерных частот либо могут быть рассмотрены их спектральные характеристики. В более сложных методах коэффициенты вейвлет-декомпозиции после промежуточной обработки для уменьшения их размерности или выбора наиболее значимых из них (например, статистических методах) могут быть использованы в качестве входа искусственных нейронных сетей для классификации типа дефекта и определения степени износа изделия.

С целью получения вибропортрета участков объекта используется виброизмерительный комплекс, описанный в [13]. Комплекс использует векторный датчик, стабилизированный механический ударник и трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр*. Возмущение конструкции с заданными характеристиками осуществляется с помощью механического ударника с силовым приводом в виде пружины с калибро-

ванными свойствами жесткости и индентора шарового или конусного типа, формирующего условия центрального удара со стабилизированной скоростью внедрения. Такая конструкция позволяет вызывать чистые изгибные колебания системы.

Для обработки сигналов используется вейвлет-преобразование, Фурье-преобразование для чего применен пакет MatLab [14]–[17].

Параметры вибрации снимаются с радиальной направляющей элемента эскалатора, после чего сигналы обрабатываются с помощью преобразования Фурье и вейвлет-преобразования.

Вейвлет-преобразование сигнала, снятого с эскалатора, приведено в [18], где рассматривались вопросы выбора вейвлет-функции для обработки сигналов и применения вейвлет-преобразования для решения задач автоматизированного проектирования.

Результаты. В табл. 1 показан спектр колебаний БПФ в районе радиальной направляющей элемента эскалатора в осях X , Y , Z . В первом столбце показан результат преобразования Фурье, во втором и третьем столбцах представлены результаты вейвлет-преобразования при движении вверх и вниз. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – частота для преобразования Фурье (масштаб для вейвлет-преобразования), место сканирования спектра – направляющее колесо.

По строкам представлены оси X , Y , Z .

Преобразование Фурье показало, что основные процессы диссипации механической энергии колеблющихся масс происходят по оси X , по оси Z почти нет энергетических процессов. Колебательные процессы имеют в основном плоский двумер-

* Виброакселерометр (акселерометр) – прибор, измеряющий разность между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением.

Табл. 1. Преобразование Фурье и вейвлет-преобразование, снятые по осям X , Y и Z
Tab. 1. Fourier transform and wavelet transform taken along axes X , Y and Z

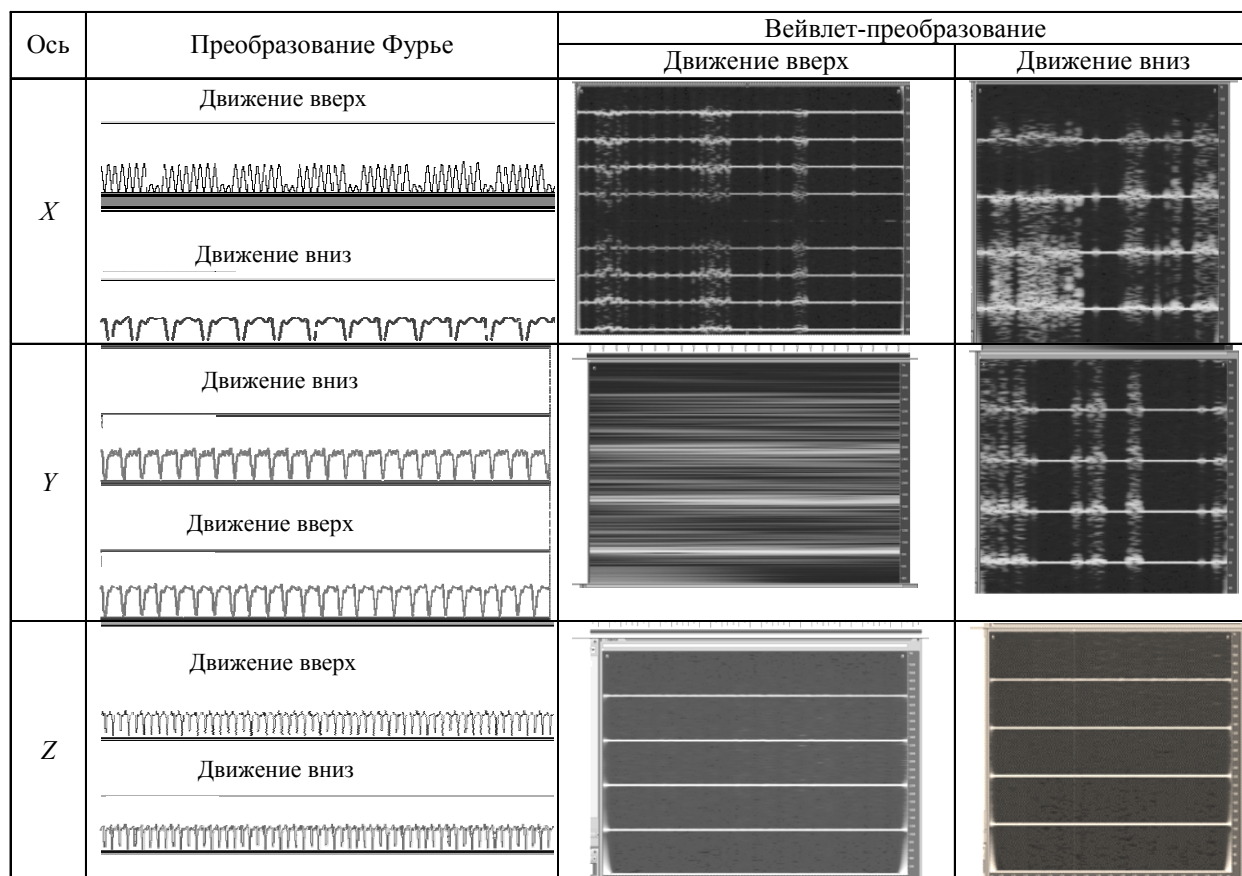


Табл. 2. Интервалы времени снятия сигнала
Tab. 2. Time intervals of the signal recording

Ось	Движение полотна вверх, мс				Шаг	Движение полотна вниз, мс				Шаг
	400	800	1200	1600		800	1600	2400	3200	
X	400	800	1200	1600	400	800	1600	2400	3200	800
Y	800	1650	2500	3300	~800	800	1600	2400	3200	800
Z	1100	2200	3300	4400	1100	1100	2200	3300	4400	1100

ный характер, при этом можно выделить основные резонансные частоты. Расположение резонансных частот свидетельствует о последовательной нагрузке через приблизительно одинаковые интервалы времени (400 мс) при направлении движения полотна вверх и вниз (табл. 2, ось X).

Выявлено большее количество резонансных частот при движении вниз по оси X . В дальнейшем решения будут приниматься в основном по этой оси.

Имеется определенная нестационарность сигнала при движении вверх по оси Y (с временным масштабом 50 Гц) и движении вверх по оси X (уменьшение шага резонансных частот в два раза).

Предполагаем наличие дефекта.

На рис. 4 представлены характеристики трех составляющих полного эхо-сигнала тестового возмущения покомпонентно. Результат Фурье-преобразования в частотной плоскости представ-

лен в градациях серого: 0 – черный цвет, максимальное значение – белый. На графиках слева по оси X (сонограмма, Фурье-преобразование) отложено время, мс, по оси Y – частота, Гц. На графиках справа (вейвлет-анализ (представление характеристического импеданса сигнала) в зависимости от поставленной цели поиска – типа дефектов (трещина или утонение)) по оси X отложено время, мс, по оси Y – масштаб.

Результат вейвлет-преобразования показан в плоскости время–масштаб. Применяется определенный тип вейвлета – вейвлет Добеши, который фокусируется на определенной области частот сигнала. Критерий выбора вейвлет-функции – равномерное приближение формы вейвлет-функции к форме измеренного сигнала [18]. Большим масштабам соответствуют низкие частоты, а малым – высокие.

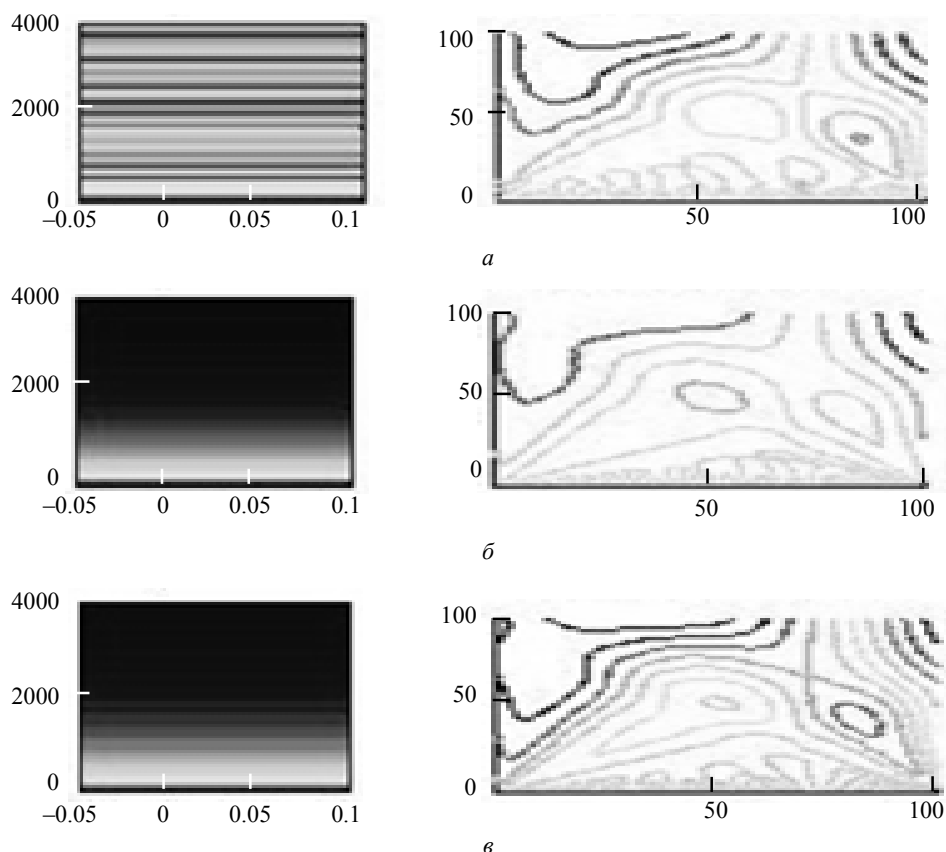


Рис. 4. Результаты сонограммы и вейвлет-анализа в трех измерениях: *a* – вертикальный *V*; *б* – СЕВЕР-ЮГ *N*; *в* – ЗАПАД-ВОСТОК *E*

Fig. 4. The results of the sonogram and the wavelet analysis, respectively, in three dimensions: *a* – vertical *V*; *б* – North-South *N*; *в* – West-East *E*

В нижней части вейвлет-спектрограммы представлены разложения сигнала по малым масштабам, а в верхней части – более точные, соответствующие большим значениям масштаба. Обе части спектрограммы могут применяться для распознавания особенностей сигналов – как глобальных (грубых), так и самых тонких.

В верхней части спектрограммы можно выделить перепады импульса, имеются пики и точки перегиба синусоиды с возрастающей во времени частотой, можно сразу сделать вывод о характере нестационарности сигнала и оценить количественно изменение длительности периода прямоугольных и синусоидальных колебаний на вершине импульса.

В целом по графику вейвлет преобразованию (вейвлет-спектрограммы) сигнала можно сделать следующей вывод:

– по оси *Y* наблюдается высокое значение вейвлет преобразования наблюдается по высоким масштабам 80...100, что соответствует низким частотам при значениях, близких к 100 в начальном интервале времени 10...20;

– по оси *X* высокое значение вейвлет-преобразования наблюдается по высоким масштабам – значения в районе 100 (низкие частоты) в начальном интервале времени 0...20 и незначительное – в районе 80...100. Есть локальный максимум в интервале времени 50 по средним масштабам (средние частоты);

– по оси *Z* вейвлет-преобразование имеет более низкие значения; их наблюдается в тех же интервалах времени, что и по оси *X*;

– наличие локальных максимумов и фигур Лиссажу на вейвлет-спектрограмме говорит о наличии остаточной пластичной деформации элементов конструкции.

При этом результат Фурье-преобразования не показывает резкого изменения значений.

На этих значениях частот предположительно наличие дефектов конструкции – трещин или утонений.

В случае дефекта конструкции сигнал несколько задерживается, обходя зону дефекта, как дополнительная энергетическая составляющая на графике вейвлет-преобразования, что становится

видно при его проведении. Наличие сплошности в материале вызывает появление дополнительных экстремумов, что приводит к усложнению формы сигнала после вейвлет-преобразования.

Классификация состояния определяется по результатам Фурье-преобразования и вейвлет-анализа. Классификационными признаками принимаются фазочастотные характеристики (отражения от неоднородностей, где происходит переворот фазы – «потеря полувольты»).

Наиболее значительные значения результата вейвлет-преобразования выражены на интервале времени 0...20, масштаб 50...100 (область низких частот) по оси X .

По оси Y наибольшее значение результата вейвлет-преобразования представлено на интервале времени 10...20, масштаб 30...100 (область средних и верхних частот). В этом месте энергия сигнала наиболее значительна. Резкое изменение значения энергии сигнала на данном масштабе (или частотах) говорит о нарушении однородности объекта и о возможном наличии дефекта (утонение или разрыв) при обходе сигналом места дефекта.

Обсуждение анализ результатов. Приведенные результаты исследования трех составляющих трехкомпонентного сигнала датчика в режимах работы машины вверх-вниз показали высокую информативность коэффициентов вейвлет-преобразования, что представляет вейвлет-анализ как некоторую «математическую лупу» для более ясного выявления неоднородностей внутреннего строения неоднородных функций и сигналов.

Изучение виброграмм колебательного процесса в измеряемой точке на плоскости корпусного элемента, перпендикулярной оси элемента, показывает помимо основной несущей волны с периодом 2.97 с наличие пульсирующих флуктуаций с четко модулируемым циклом взаимодействия (удар) серповидной направляющей с пластиной цепи в момент прохождения ступени данного участка, что говорит о возможном наличии дефектов.

Фурье-преобразование и вейвлет-анализ показывают наличие «ротации» характера колебаний по отведениям (повышение/понижение уровня энергии в отведениях синфазно и диаметрально меняются местами в зависимости от варианта режима работы машины). Данное обстоятельство указывает на наличие зазоров, которые «выбираются» характерным образом всякий раз при смене направления движения. Вейвлет-преобразование при этом позволяет выявлять необходимую информацию для определения мест и типов дефектов.

Заключение. Рассматриваемая система – это система контроля, ориентированная на непрерывный анализ диагностических параметров конкретного технического объекта. На данном этапе имеется возможность измерять параметры технического объекта, сопоставлять с пороговыми значениями параметров и проследивать их изменения последовательно во времени. Развитием данной системы должно быть создание режимов адаптации при эксплуатации оборудования на стадии эксплуатации, когда дефекты обычно либо отсутствуют совсем, либо незначительны.

Представленные вейвлет-коэффициенты могут служить основой вибропортрета объекта. Поскольку указанные характеристики связаны с собственными частотами колебаний объекта, изменение их значений будет отражать определенные преобразования компонентов объекта: деградация прочностных свойств материала, изменение момента инерции сечений.

Развивая дальше аппарат автоматической классификации дефектов по найденным признакам, можно в дальнейшем использовать аппарат нейронных сетей (НС). К достоинствам нейронных сетей относятся способность к обучению, хорошая устойчивость к шумам в данных, возможность работы при наличии неинформативных, шумовых сигналов и работе, когда неизвестны закономерности развития ситуации и неопределенны зависимости между входными и выходными данными.

Список литературы

1. Мониторинг эскалаторов метрополитена при оценке их остаточного ресурса на основе магнитных методов контроля / Я. С. Ватулин, М. С. Коровина, С. К. Коровин, В. А. Попов // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 1 (44). С. 56–59.
2. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1998. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.

3. Астафьева Н. М. Вейвлет-преобразования. Основные свойства и примеры применения / ИКИ. М., 1994. 56 с., ил.
4. Efimov V. G. Wavelet analysis – new opportunities for NDT // Nondestruct. Test. Eval. 2006. No. 21 (1). P. 27–38.
5. Altaisky M. V. Multiscale theory of turbulence in wavelet representation // Dokl. Phys. 2006. No. 51 (9). P. 481–485.

6. Koronovskii A., Khramov A. Wavelet bicoherence analysis as a method for investigating coherent structures in an electron beam with an overcritical current // *Plasma Phys. Rep.* 2002. No. 28 (8). P. 666–68.

7. Wavelet and Fourier analysis of electric fluctuations in semiconductor and electrochemical systems / E. Budnikov, I. Kukoev, A. Maksimychev, I. Miroshnikova, S. Timashev, A. Gulyaev // *Meas. Tech.* 1999. No. 42 (11). P. 1062–1067.

8. Myachin M., Pevzner L. Wavelet analysis of logging data for the Baikal bottom sediments // *Geol. Geofiz.* 2001. No. 42 (1–2). P. 138–145.

9. Effect of unstable MHD modes on the confinement of a stellarator plasma / D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, G. A. Gladkov, S. E. Grebenshchikov, I. S. Danilkin, L. M. Kovrizhnykh, L. V. Kolik, A. B. Kuznetsov, N. F. Larionova // *Jetp. Lett.* 1999. No. 69 (6). P. 441–447

10. Li J. A wavelet approach to edge detection. Runtsville, Texas: San Houston State University, 2001. 80 p.

11. Wavelet analysis of ceramic surface images as a method for measuring the size of structural elements / M. M. Filyak, A. G. Chetverikova, O. N. Kanygina, I. N. Anisina // *Measurement Techniques.* 2020. No. 63. P. 130–134.

12. Kustov V., Protsko D. A steganographic model using wavelet and Arnold cat transform with multi-threshold error-correcting coding // 42nd Intern. Conf. on Telecommunications and Signal Processing, TSP. URL: https://www.researchgate.net/publication/334703043_A_Steganographic_Model_Using_Wavelet_and_Arnold_Cat

Transform_with_Multi-Threshold_Error-Correcting_Coding (дата обращения 25.01.2023).

13. Пат. РФ № 2061242. Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом / Кобяков И. Б. Дата подачи заявки: 27.05.1994. Оpubл. 27.05.1996.

14. Integration of the MATLAB System and the object-oriented programming system C# based on the Microsoft COM interface for solving computational and graphic tasks // S. Adadurov, Y. Fomenko, A. Khomonenko, A. Krasnovidov // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020. No.1224. P. 581–589.

15. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MatLab обработка сигналов и изображений. Спец. справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

16. 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 // Сб. тр. конф. Springer, 2020. Vol. 2803. P. 136–14.

17. Rusanova E. V., Runev E. V. A method for evaluating geo-environmental technologies based on a weighted convolution of partial performance criteria in the Matlab environment // Сб. тр. конф. CEUR Workshop Proc. Springer, 2021. Vol. 2803. P. 92–99.

18. Подклетнов С. Г. Применение вейвлет-преобразования для обработки диагностической информации, полученной при эксплуатации эскалаторов, и использовании результатов ее анализа для решения задач автоматизированного проектирования // *Изв. Петербургского ун-та путей сообщения.* 2013. № 3 (36). С. 112–121.

Информация об авторе

Подклетнов Сергей Георгиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Email: podklet@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6617-5901>

References

1. Monitoring jeskalatorov metropolitena pri ocenke ih ostatochnogo resursa na osnove magnitnyh metodov kontrolja / Ja. S. Vatulin, M. S. Korovina, S. K. Korovin, V. A. Popov // *Transport Rossijskoj Federacii.* 2013. № 1 (44). S. 56–59. (In Russ.)

2. Astaf'eva N. M. Vejvletanaliz: osnovy teorii i primery primenenija // *Uspehi fizicheskikh nauk.* 1998. T. 166, № 11. S. 1145–1170. (In Russ.)

3. Astaf'eva N. M. Vejvlet-preobrazovanija. Osnovnye svojstva i primery primenenija. M.: IKI, 1994. 56 s., il. (In Russ.)

4. Efimov V. G. Wavelet analysis – new opportunities for NDT // *Nondestruct. Test. Eval.* 2006. No. 21 (1). P. 27–38.

5. Altaisky M. V. Multiscale theory of turbulence in wavelet representation // *Dokl. Phys.* 2006. No. 51 (9). P. 481–485.

6. Koronovskii A., Khramov A. Wavelet bicoherence analysis as a method for investigating coherent structures in an electron beam with an overcritical current // *Plasma Phys. Rep.* 2002. No. 28 (8). S. 666–68.

7. Wavelet and Fourier analysis of electric fluctuations in semiconductor and electrochemical systems / E. Budnikov, I. Kukoev, A. Maksimychev, I. Miroshnikova, S. Timashev, A. Gulyaev // *Meas. Tech.* 1999. No. 42 (11). P. 1062–1067.

8. Myachin M., Pevzner L. Wavelet analysis of logging data for the Baikal bottom sediments // *Geol. Geofiz.* 2001. No. 42 (1–2). P. 138–145.

9. Effect of unstable MHD modes on the confinement of a stellarator plasma / D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, G. A. Gladkov, S. E. Grebenshchikov, I. S. Danilkin, L. M. Kovrizhnykh, L. V. Kolik, A. B. Kuz-netsov, N. F. Larionova // *Jetp. Lett.* 1999. No. 69 (6). P. 441–447

10. Li J. A wavelet approach to edge detection. Runtsville, Texas: San Houstiom State University, 2001. 80 p.

11. Wavelet analysis of ceramic surface images as a method for measuring the size of structural elements / M. M. Filyak, A. G. Chetverikova, O. N. Kanygina, I. N. Anisina // Measurement Techniques. 2020. No. 63. P. 130–134.

12. Kustov V., Protsko D. A steganographic model using wavelet and Arnold cat transform with multi-threshold error-correcting coding // 42nd Intern. Conf. on Telecommunications and Signal Processing, TSP. URL: https://www.researchgate.net/publication/334703043_A_Steganograph-ic_Model_Using_Wavelet_and_Arnold_Cat_Transform_with_Multi-Threshold_Error-Correcting_Coding (data obrashhenija 25.01.2023).

13. Pat. RF № 2061242. Trehkomponentnyj p'ezojel-ektricheskij vibroakselerometr s odnim chuvstvitel'nym jelementom / Kobjakov I. B. Data podachi zajavki: 27.05.1994. Opubl. 27.05.1996. (In Russ.)

14. Integration of the MATLAB system and the object-oriented programming system C# based on the Microsoft COM interface for solving computational and

graphic tasks // S. Adadurov, Y. Fomenko, A. Khomonenko, A. Krasnovidov // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. No. 1224. P. 581–589.

15. D'jakonov V. P., Abramenkova I. V. MatLab. Ob-robotka signalov i izobrazhenij. Special'nyj spravochnik. SPb: Piter, 2002. 608 s. (In Russ.)

16. Barausov V. A., Bubnov V. P., Sulonov S. Kh. Simulation modeling in methods and designs for detecting ice or snow buildup on control surface in MatLab/Simulink dynamic modeling environment // Sb. tr. konf. Springer, 2020. Vol. 2803. P. 136–14.

17. Rusanova E. V., Runev E. V. A method for evaluating geoenvironmental technologies based on a weighted convolution of partial performance criteria in the MATHLAB environment // Sb. tr. konf. CEUR Workshop Proc. Springer, 2021. Vol. 2803. P. 92–99.

18. Podkletnov S. G. Primenenie vejvlet-preobrazovaniya dlja obrabotki diagnosticheskoy informacii, poluchennoj pri jekspluatacii jeskalatorov, i ispol'zovanii rezul'tatov ee analiza dlja reshenija zadach avtomatizirovannogo proektirovaniya // Izv. Peterburgskogo unta putej soobshhenija. 2013. № 3 (36). S. 112–121. (In Russ.).

Information about the author

Sergey G. Podkletnov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Computer Engineering of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Email: podklet@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6617-5901>

Статья поступила в редакцию 14.02.2023; принята к публикации после рецензирования 06.04.2023; опубликована онлайн 25.05.2023.

Submitted 14.02.2023; accepted 06.04.2023; published online 25.05.2023.
