УДК 621.87

С. Г. Подклетнов
Петербургский государственный университет путей сообщения

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ–ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭСКАЛАТОРОВ, И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЕЕ АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Статья демонстрирует применение метода вейвлет-преобразования для диагностики работы и автоматизированного проектирования эскалаторов. Методом вейвлет-преобразования можно выявлять неисправности работы оборудования на ранних стадиях.

вейвлет-преобразование, эскалатор, автоматизированное проектирование.

Введение

Автоматизированное проектирование, или проектирование с помощью компьютера (англ. *Computer-Aided Design, CAD*), – термин, используемый для обозначения широкого спектра компьютерных инструментов, которые помогают инженерам, архитекторам и другим профессионалам создавать, изменять, анализировать и оптимизировать концептуальные, инженерные, архитектурные и строительные проекты.

Являясь ключевым инструментом в рамках концепции управления жизненным циклом изделия (PLM), системы CAD включают в себя множество программных и аппаратных средств – от систем двумерного черчения до трехмерного параметрического моделирования поверхностей и объемных тел.

Технологии автоматизированного проектирования обычно применяются совместно с *автоматизированным конструированием* (инженерным анализом, CAE) и *автоматизированным производством* (CAM), позволяя решать задачи и выполнять операции, возникающие в процессе разработки и производства продукта, а также на других этапах его жизненного цикла. Внедрение на предприятии CAD/CAM/CAE-систем является ключевым моментом стратегии PLM.

1 Формирование качества. Петля качества. Принцип жизненного цикла

Качество – совокупность характеристик объекта, индивидуально описываемый и рассматриваемый процесс, продукция. Качество относится к категории сложных и динамичных понятий. Динамичность категории «качество» заключается в том, что требования к качеству оцениваемых объектов и ожидания от них меняются очень быстро.

Жизненный цикл продукции (ЖЦП) включает период от возникновения потребности в создании продукции до её ликвидации вследствие исчерпания потребительских свойств. Основные этапы ЖЦП: *проектирование, производство, эксплуатация, утилизация.*

Модель жизненного цикла продукции можно более точно представить в виде так называемой петли качества, построенной на базе анализа основных стадий формирования и изменения показателей качества. Основу модели составляет цепочка последовательных видов деятельности, качество которых отражается на показателях качества продукции. *Качество продукции планируется и формируется в производственной сфере и подвергается изменениям в потребительской сфере* (рис. 1). Характеристики продукции

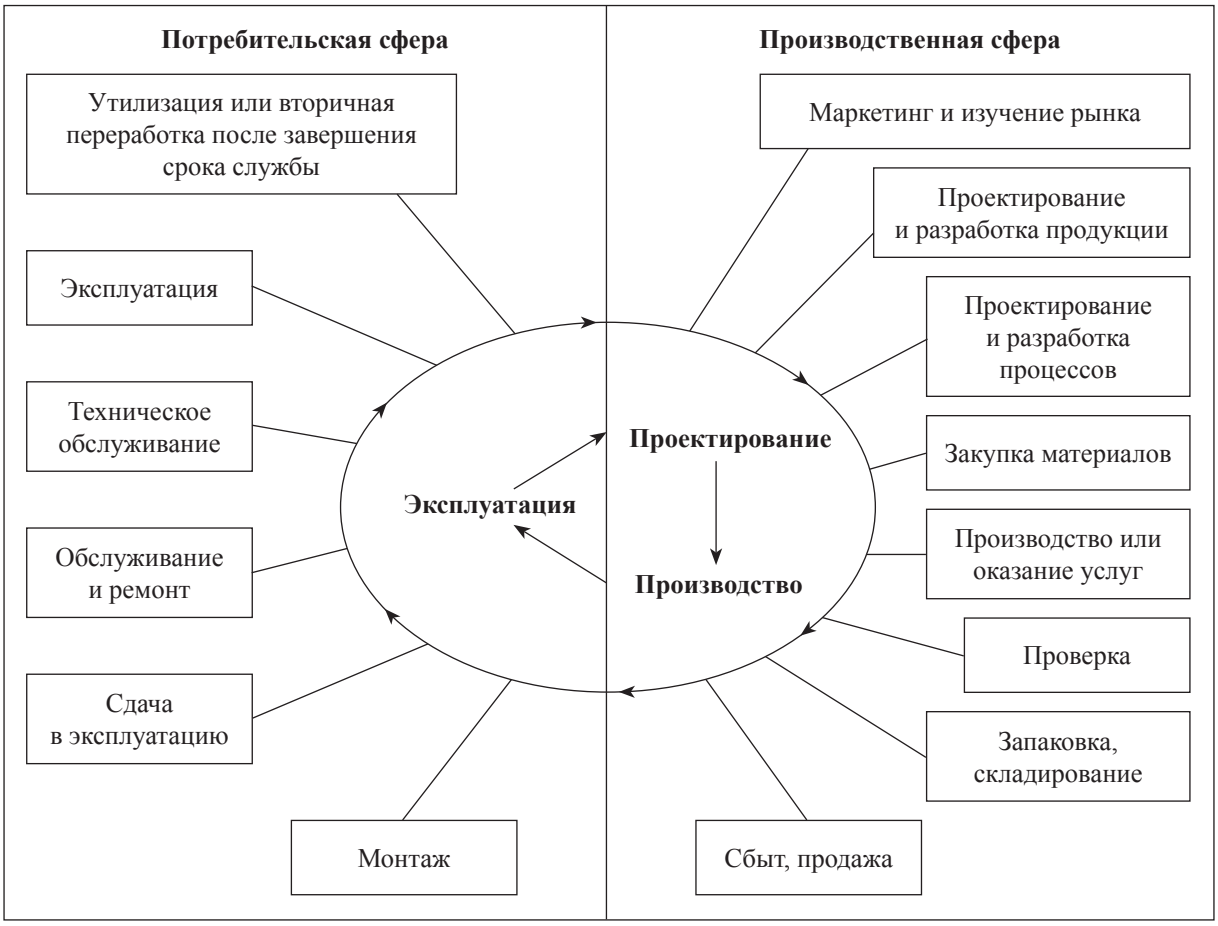

Рис. 1. Петля качества

могут быть изменены посредством воздействия на составляющие петли качества.

Петля качества наглядно показывает последовательное отражение качества процессов на качестве конечного результата. Обобщенное качество результата представляет собой совокупность проектного, производственного и эксплуатационного качества (таблица).

Проектное качество отражает процессы планирования качества продукции.

Производственное качество отражает процессы формирования качества продукции. Качество продукции определяется удовлетворенностью потребителя, зависит от характеристик произведенной продукции и от качества упаковки, своевременности доставки, качества сбыта.

Эксплуатационное качество отражает процессы изменения качества продукции. На качество продукции, находящейся в эксплуатации, влияет качество процессов эксплуа-

ТАБЛИЦА. Отражение качества процессов жизненного цикла на качестве результата

Качество процессов жизненного цикла	Качество результата
Процессы маркетинга и проектирования	→ Проектное качество
Процессы производства	→ Производственное качество
Процессы эксплуатации	→ Эксплуатационное качество

тации, сервисного обслуживания и проведенных ремонтов (рис. 2). Опыт эксплуатации необходим для дальнейшего совершенствования продукции.

Попробуем определить, как происходит изменение качества работы в процессе эксплуатации эскалаторов.

2 Строение эскалатора и виброизмерительного комплекса

Эскалатор – наклонный пластинчатый конвейер с движущимся ступенчатым полотном, служащий для подъема и спуска пассажиров на станциях метро, в общественных зданиях, на уличных переходах и в других местах со значительными пассажиропотоками. Схема эскалатора показана на рисунке 3.

Поставим задачу проследить изменение качества работы эскалатора в процессе эксплуатации. Исследование проводится в рамках проекта перехода на обслуживание эскалаторного оборудования по фактическому состоянию. Задача предполагает поэтапное внедрение средств информационного обеспечения безопасной эксплуатации объекта. Для выявления признаков некачественной работы было выбрано два эскалатора:

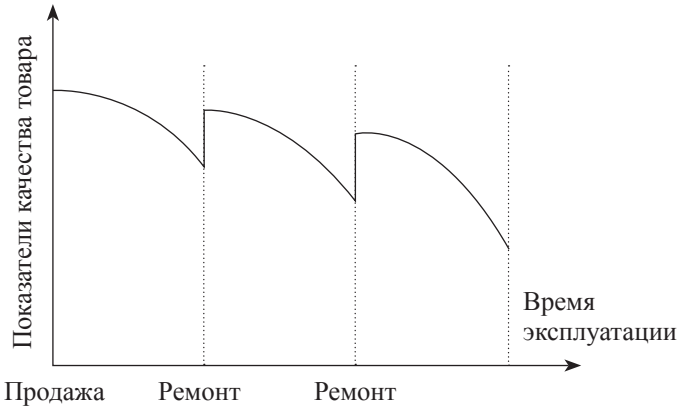

Рис. 2. Изменение качества товара в процессе эксплуатации

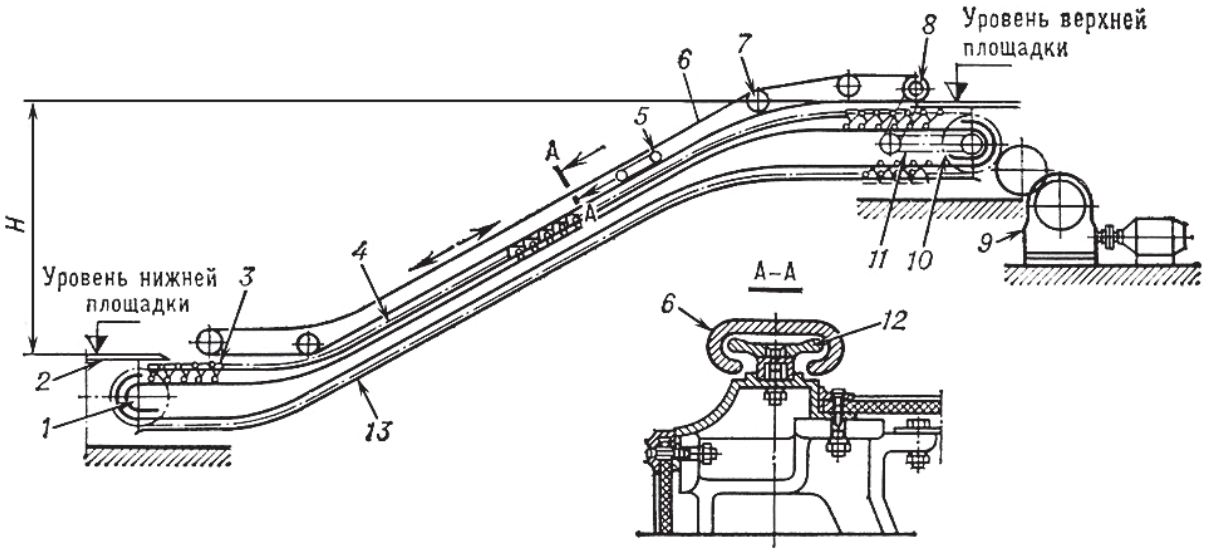

Рис. 3. Схема эскалатора:
1 – натяжная звездочка; *2* – входная площадка; *3* – полотно; *4* – тяговая цепь; *5* – натяжной блок; *6* – поручень; *7* – отклоняющий блок; *8* – приводной блок; *9* – привод тяговых звездочек; *10* – тяговая звездочка; *11* – цепная передача; *12* – направляющая пластина; *13* – направляющий путь

нормальный, только что вышедший с завода-изготовителя и исправно работающий в течение длительного времени, а также *явно дефектный*, выведенный из эксплуатации, направленный на ремонт после истечения срока годности и полного износа деталей, запрещенный к дальнейшей работе.

Методика измерений

Для исследования берется сигнал, снятый с датчика, установленного на участке става в месте установки привода (*9* на рис. 3) в обоих эскалаторах (в частности, узел соединения поперечной связи с боковой пластиной). На эскалаторах были установлены датчики, с них сняты сигналы. Датчики были векторными трехкомпонентными абсолютной вибрации типа ВКТ. Сигналы были сняты в трех ортогональных плоскостях X, Y, Z. Сигналы снимались в течение 10–15 секунд, с частотой около 100 Гц. Количество отсчетов сигналов 500. Снятые сигналы были виброакустические. Режим работы эскалатора рабочий, а не отладочный.

С целью получения полного вектора колебаний в точке (вибропортрета) при контроле состояния объекта требуется измерять три компонента участков объекта, для чего используется оборудование, представляющее собой виброизмерительный комплекс (рис. 4) на основе *векторного датчика (Патент РФ № 2061242 Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом)*. Процесс мониторинга объекта осуществляется на макроуровне: в рабочем состоянии, без ревизии агрегатов.

Оборудование и программное обеспечение:

– векторный вибропреобразователь абсолютной вибрации типа ВТК 3-2, исполнение ВТК 1 (сертифицирован Госстандартом РФ, сертификат RU.C/28/004/A № 12676, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 23241-02 11 июля 2002 г.);

– усилитель заряда трёхканальный УТК 2 (общепромышленное исполнение);

– комплекс АСК-3117 (серийный номер 2372082012, проверен до 21.12.2009 г.);

– пакет прикладных программ для управления и обмена с АСК-310х APP-3007 (серийный номер PQ26-AB58);

– профессиональная версия программного обеспечения АСК-3107-РО (серийный номер 2372082012).

Признаки повреждения конструкции: резкое, несимметричное изменение значений амплитудно-частотных характеристик в симметрично расположенных точках по

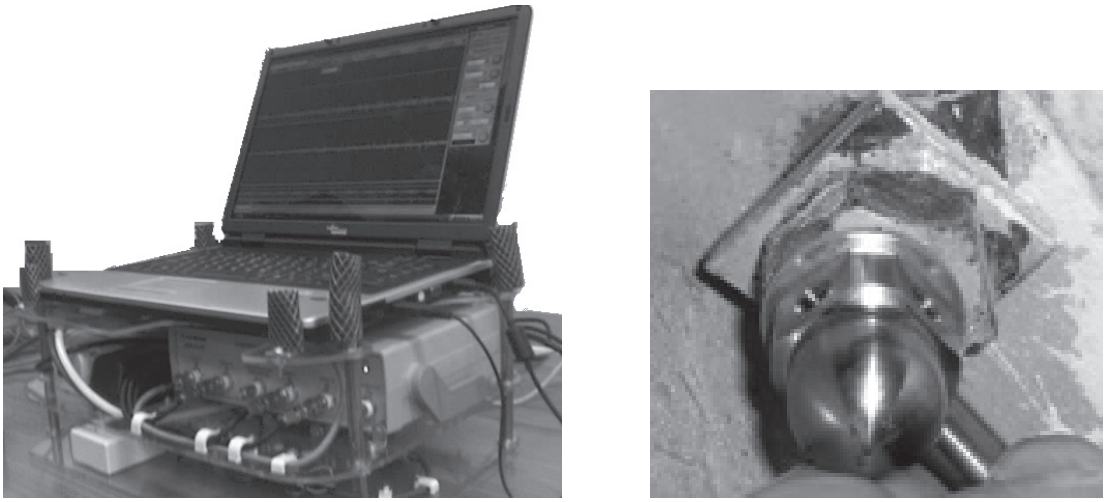

Рис. 4. Мобильный виброизмерительный комплекс и трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр

сечениям (створам) конструкции; изменение момента инерции сечения элемента (пространственная или местная деформации); изменение модуля упругости материала (деградация материала); наличие локализации пластической деформации элементов.

Классификационными признаками принимаются фазочастотные характеристики (отражения от неоднородностей, где происходит переворот фазы – «потеря полуволны»).

Целью работы является разработка метода автоматизированного проектирования для выявления информативных признаков, характеризующих конкретное состояние диагностируемой системы. Выбранный метод должен давать возможность классификации текущего технического состояния системы, а также прогнозирования ее состояния – таким методом является вейвлет-преобразование.

3 Определение качества работы эскалаторов с помощью вейвлет-преобразования

Сигналы для обработки приведены на рисунке 5.

Проведение вейвлет-преобразования

Для проведения вейвлет-преобразования воспользуемся пакетом MathLab 7. Необходимо выбрать вейвлет-функцию и масштаб. Вейвлет-функция должна обладать конечной энергией и ограниченной полосой частот [1]–[4]. Примеры возможных вейвлет-функций приведены на рисунке 6.

В задачах выделения, идентификации локальных особенностей сигналов определяющими при выборе вейвлет-функции будут следующие характеристики: *гладкость, размер носителя, число нулевых моментов.*

1. Число нулевых моментов. В окрестностях, где функция f гладкая, большее число нулевых моментов m обеспечит большее число пренебрежимо малых вейвлет-коэффициентов. В этом случае мы получаем аппроксимирующую схему с минимальным числом слагаемых при заданном уровне точности аппроксимации.

2. Размер носителя. Вейвлет-преобразование порождает искусственные «скачки» на краях функции f, находящие отражение в коэффициентах разложения. Получаем: чем меньше размер носителя, тем меньшую погрешность мы имеем на краях f. Если f имеет локальную особенность в некоторой точке и если эта точка находится внутри носителя, то вейвлет-коэффициенты имеют большую амплитуду. Чем больше носитель, тем большее число таких коэффициентов на каждом масштабном уровне мы получаем. Чтобы минимизировать их число, мы должны использовать функции с наименьшим размером носителя.

3. Гладкость вейвлета. Гладкость вейвлета также характеризует его способность выявлять особенность вида m. Если функция f имеет несколько локальных особенностей и очень гладкая между этими особенностями, необходимо использовать вейвлет-функцию с большим числом нулевых моментов; если число особенностей нарастает, лучше уменьшить размер носителя ценой уменьшения числа нулевых моментов. Например, для фильтров Добеши характерно следующее свойство: гладкость вейвлета возрастает с возрастанием числа нулевых моментов [3], [4]. Исходя из нестационарности, гладкости и числа нулевых моментов функции выберем для обработки вейвлет-функцию Морлета, показанную на рисунке 6, *б*. Функция Морлета хорошо зарекомендовала себя при обработке именно нестационарных сигналов. Она подходит по гладкости для выявления локальных особенностей именно нашего сигнала (сигнал имеет несколько локальных особенностей и гладкий между ними). Данная функция имеет больше нулевых моментов, чем другие, например «мексиканская шляпа».

Для выбора значений масштаба надо эмпирически методом проб и ошибок подобрать разные значения и внимательно рассмотреть итоговый график вейвлет-преобразования, как показано на рисунке 7. Значения вейвлет-преобразования показаны в виде закра-

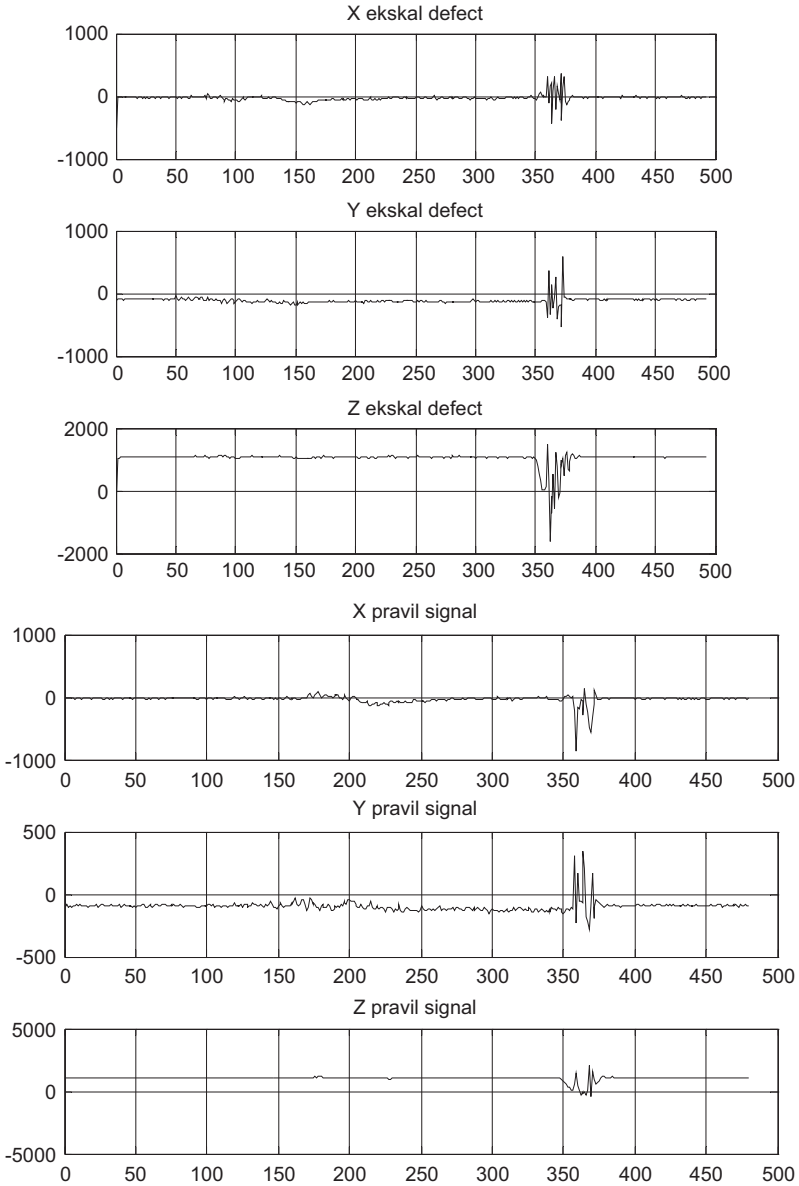

Рис. 5. Сигналы:
слева – ненормально работающий эскалатор в трех проекциях X, Y, Z;
справа – нормально работающий эскалатор в трех проекциях X, Y, Z

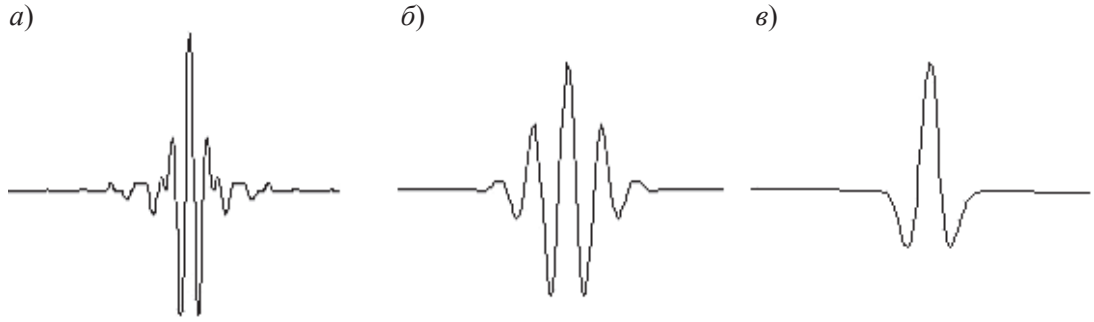

Рис. 6. Примеры вейвлетов:
а – Мейера; *б* – Морлета; *в* – «мексиканская шляпа»

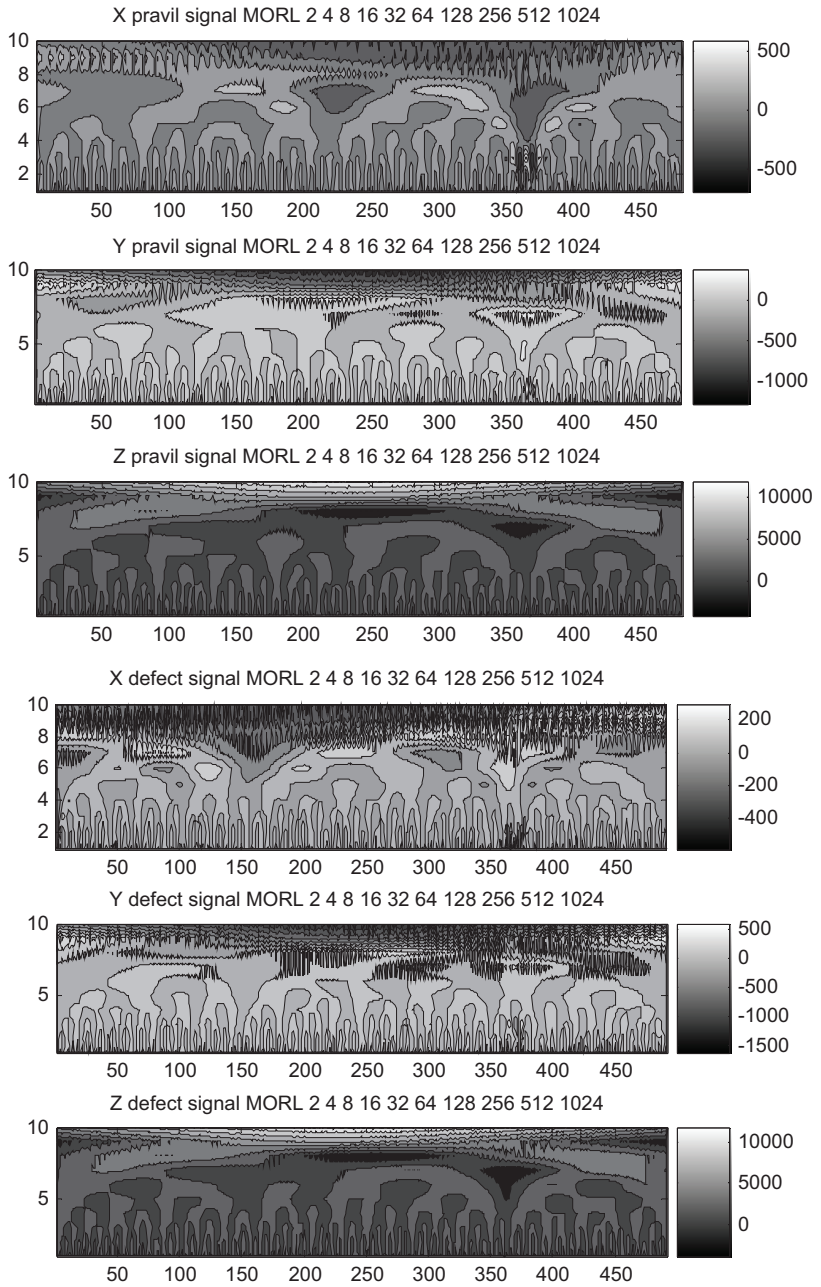

Рис. 7. Вейвлет-преобразование:
слева – правильный, справа – дефектный сигналы с вейвлет-функцией Морлета
и коэффициентами масштаба 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024

шенного графика линий уровня линейной палитрой в оттенках серого цвета. Белый цвет – наибольшее значение вейвлет-преобразования, черный цвет – 0. Серый цвет – промежуточные значения.

Для выбора коэффициентов масштаба можно применить линейный вариант с сложением старого коэффициента с одним числом или логарифмический, при котором новый коэффициент получается путем умножения предыдущего на число.

Если коэффициенты растут линейно, то результат вейвлет-преобразования будет сильно вытянут по оси Y. Лучше применить логарифмический вариант. Выберем наиболее простые значения коэффициентов мас-

штаба, равные степени 2: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024. Масштабы по оси Y показаны числами от 1 до 10, результаты – на рисунках 7 и 8. Вейвлет-преобразование нормального и дефектного сигналов по осям Y и Z ничем не отличаются. Для дальнейшей обработки возьмем сигнал по оси X. Там различия просматриваются более отчетливо.

Для более точной обработки выберем более узкий участок масштаба 32, 64, 128 (1, 2, 3) и повторим вычисления только по оси X. Разница между результатами вейвлет-преобразования отчетливо видна на сигнале, снятом по оси X с коэффициентами масштаба 32, 64, 128, как показано на рисунке 8 (более точно – на рисунке 9).

Разница между результатами вейвлет-преобразования видна по значениям максимума вейвлет-преобразования, показанного областью белого (или более светлого оттенка) цвета. У правильного сигнала максимум значений вейвлет-преобразования выражен бо-

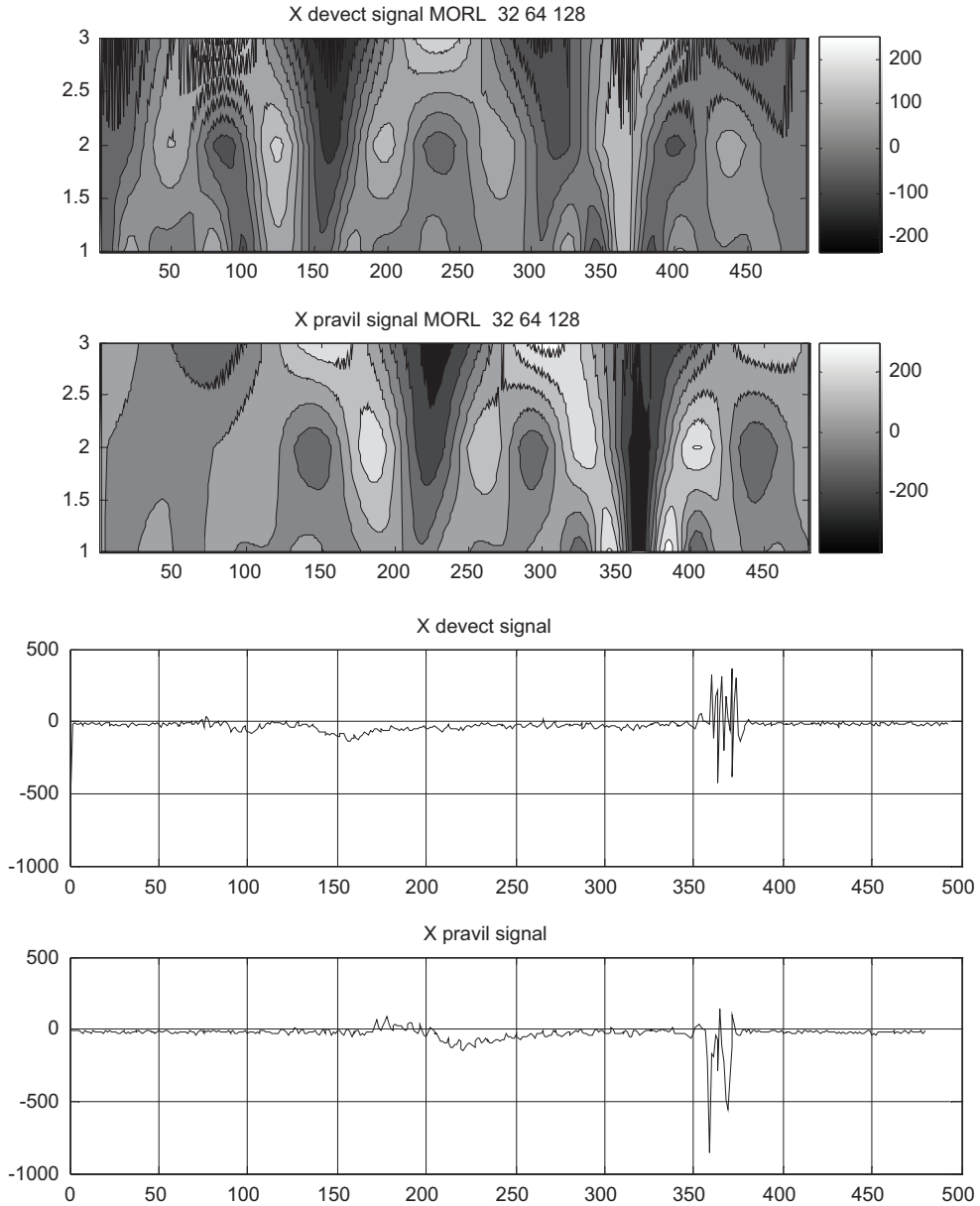

Рис. 8. Правильный и дефектный сигналы и вейвлет-преобразование правильного и дефектного сигналов с вейвлет-функцией Морлета и коэффициентами масштаба 32, 64, 128 (или 1, 2, 3)

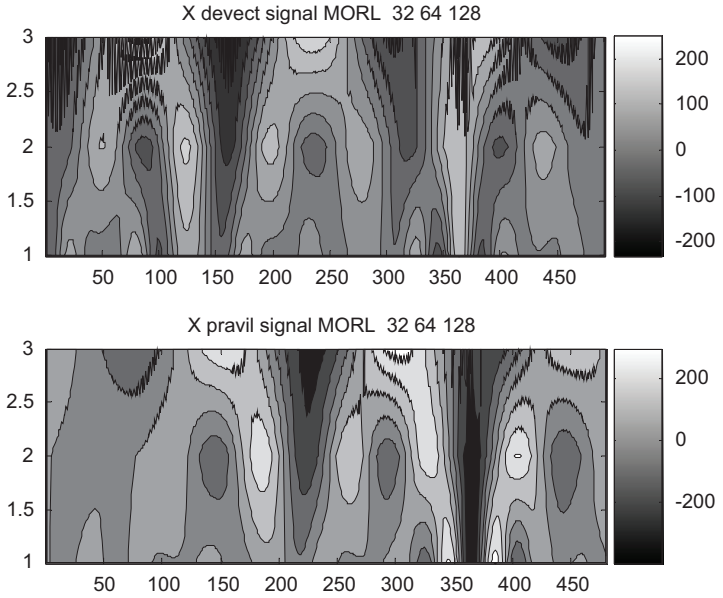

Рис. 9. Вейвлет-преобразование правильного и дефектного сигналов с вейвлет-функцией Морлета и коэффициентами масштаба 32, 64, 128 (1, 2, 3)

лее отчетливо (более ярким цветом). Наблюдается изменение значений на масштабе 64 (или 2 на графике) и рядом с ним (показано областью белого цвета). Здесь наблюдается максимум значений вейвлет-преобразования нормального сигнала – 220, что в дальнейшем может быть использовано для диагностики сигналов.

Чтобы выявить эти различия более четко, возможно провести дискриминатный анализ. В дальнейшем можно более точно выявить место расположения дефектов на сигнале путем выбора определенных значений на графике вейвлет-преобразований и проведения дискриминантного анализа.

Заключение

В ходе данного исследования был разработан метод обработки данных, снятых с датчиков, расположенных на эскалаторе в процессе его эксплуатации. Данный метод можно применять для технической диагностики эскалаторов. Полученные результаты можно использовать в качестве исходных данных для проектирования новых эскалаторов в замкнутой петле:

проектирование – производство – эксплуатация – проектирование.

Использованный для обработки метод вейвлет-преобразования несложен, позволяет хорошо выявлять информативные признаки, характеризирующие состояние эскалатора. Теперь для диагностики возможных неисправностей эскалатора, выявления предотказного состояния эскалатора и определения показателей качества необходимо снять сигнал с датчиков, установленных на эскалаторе, и провести вейвлет-преобразование данного сигнала с вейвлетом Морлета и масштабами 32, 64, 128. После этого на графике вейвлет-преобразования по расположению его максимума можно без проведения дальнейшей обработки увидеть признаки начинающихся дефектов эскалатора.

Предложенный метод довольно дешев, его возможно использовать более широко для обработки сигналов различной природы с целью выявления различных неисправностей. В будущем возможно разработать шкалу для количественной оценки качества работы эскалаторов и определения тяжести дефекта эскалаторов по графику вейвлет-преобразования, а также прогноза развития опасной

ситуации, затем с их помощью разработать требования безопасности работы на эскалаторах, создать информационную поддержку и автоматизировать процесс принятия решений, разработать критерии оценки качества.

Для математического обеспечения автоматизированного проектирования эскалаторов надо разработать программу, реализующую данный алгоритм на языке высокого уровня (желательно на языке СИ – лингвистическое обеспечение), для технического обеспечения автоматизированного проектирования – разработать соответствующее аппаратное обеспечение.

Библиографический список

1. **Ортогональные** преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К. Р. Рао ; пер. с англ. ; ред. И. Б. Фоменко. – М. : Связь, 1980. – 248 с.

2. **Теория** и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин. – СПб. : ВУС, 1999. – 203 с.

3. **Ingrid** Daubechies. Ten Lectures on Wavelets ; пер. с англ. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

4. **A Wavelet** tour of signal processing / S. Mallat ; пер. с англ. – М. : Мир, 2005. – 671 с.

УДК 691-405.8

М. Хаммади
Петербургский государственный университет путей сообщения

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ ПОДСОСЕ КРЕМНЕЗОЛЯ

Представлен термодинамический и инструментальный анализ образцов пенобетонных изделий разной плотности с кремнезолем, подпитанных методом капиллярного подсоса. Показано, что при понижении значения энергии Гиббса реакций кремнезоля с составляющими цементного камня возможно самопроизвольное образование дополнительного количества гидросиликатов, в том числе пониженной основности. Инструментальный анализ подтверждает образование дополнительного количества гидросиликатов кальция, что объясняет повышение прочности.

образцы цементные, капиллярный подсос, термодинамика, инструментальный, прочность, энергия Гиббса, гидросиликаты.

Введение

Современное состояние вопросов строительной практики, а также защиты окружающей среды диктует поиск новых энергосберегающих решений. Такие решения предоставляет знание основополагающих естественно-научных законов, которое предполагает использовать известные самопроизвольные процессы вместо затрат энергии, топлива, обусловливающие сохранение чистоты (незагрязнение) окружающей среды с одновременным повышением качества материала, изделия или сооружения.

К числу основополагающих законов относятся прежде всего термодинамические [1]–[3], которые позволяют «использовать» энергию химического процесса, способную превращаться в полезную работу, величину $-\Delta G^0_{298}$, которая характеризует самопроизвольно протекающую химическую реакцию. К числу таких же (с точки зрения самопроизвольности) можно отнести некоторые капиллярные явления (физические процессы),