

УДК 62.799

**Ю. В. Алеветдинова**

*Кафедра «Наземные транспортно-технологические средства»,  
Российский университет транспорта, Москва*

## СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПОДВИЖНОЙ ЕДИНИЦЫ

Статья посвящена изучению методов диагностики, используемых в динамической работе дорожных строительных машин. Описаны существующие способы, которые в дальнейшем могут быть использованы при создании экспертной системы диагностики. Рассмотренные в статье методы диагностики (в основном методы неразрушающего контроля) в интеллектуальных системах могут повысить точность диагностирования и прогнозирования состояния металлоконструкций.

Срок службы металлоконструкции зависит от многих факторов, таких как силовые воздействия, динамичность нагрузки, агрессия внешней среды, воздействие высоких температур и т. д. Возможно продлить срок службы изделий за счет повышения точности и своевременности диагностирования. В статье рассмотрена архитектура экспертной системы, наглядно показывающая связи между подсистемой и динамически изменяемыми свойствами системы. Предложенная архитектура способна обеспечить наиболее полный анализ поведения сложных технических систем и оперативность принятия экспертных решений. Предлагается использовать комплексный подход в работе экспертных систем, в которых предпочтение отдается более общим и менее связанным с предметной областью теоретическим методам, чаще всего математическим. Автор представил также математическую модель, отражающую логику решений экспертной системы.

экспертная система, динамика, неразрушающий контроль, синергетический подход, самосознание, прогнозирование, нечеткая логика

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-25-37

### Введение

В производстве, обслуживании, перевозках, строительстве, в повседневной жизни мы используем различные металлоконструкции, из которых состоят автомобили, поезда, самолеты или техника, каждое утро чистящая дороги. Техническое обслуживание (ТО) каждой из этих машин ведется по специальному графику, рассчитанному на основании определенных параметров, которые могут быть как постоянными, так и переменными. Расчет графика обслуживания и ремонта производится для класса машин, но не для каждой единицы в отдельности. К сожалению, рассчитанный график ТО для класса машин может не соответствовать установленному следующему графику из-за условий работы металлоконструкций. Существует также риск непроявленной трещины либо другого дефекта, скрытого в глубине металла.

Особое внимание уделяется диагностике технического состояния тех классов машин, которые эксплуатируются с высокими нагрузками. Возникает большая вероятность снижения несущей способности металлической конструкции, что может привести к человеческим травмам, авариям, серьезным материальным затратам.

Комплексный подход с применением методов диагностики, описанных в этой статье, существенно расширит спектр измеряемых параметров, что позитивно повлияет на качество эксплуатации.

Эксплуатируемые машины стоит диагностировать в процессе работы, а это возможно только при применении методов неразрушающего контроля. Те из них, что используются для обнаружения дефектов по типу разрушения сплошности материала изделий, мониторинга геометрических параметров, анализа физико-химических свойств материала, дают возможность изучить качество изделий без перебоев в эксплуатации. Одно из главных преимуществ методов неразрушающего контроля в том, что при их применении удобно исследовать изделие на каждой ступени производства, не оказывая при этом влияния на свойства, параметры и качество.

### 1. Методы контроля состояния металлоконструкции

Методы диагностирования металлоконструкций бывают разрушающими и неразрушающими (табл. 1).

Результаты первого варианта таких методов позволяют изготовить металлоконструкции максимальной прочности для реализации возложенных на них функций и определить меры предосторожности по их эксплуатации.

Для повышения срока эксплуатации следует оценить прочность и надежность сварных конструкций и соединений, качества присадочного и основного металла, правильность следуемой технологии, а также квалификацию специалистов по сварке.

**Таблица 1.** Методы контроля состояния металлоконструкции

Методы контроля состояния	Виды КСМК	Место проведения
механическая или динамическая проверка сварных соединений	проверка целостности соединения при изгибе, разрыве и др. деформации; макро- и микроструктурный методы анализа	в лаборатории (испытания)
методы контроля при специфических условиях	проверка конструкций, предназначенных для работы с очень низкими или очень высокими температурами	в лаборатории (испытания)
методы неразрушающего контроля	см. табл. 2	на месте; в лаборатории

**Таблица 2.** Методы и типы неразрушающего контроля

Типы НК	Методы неразрушающего контроля
акустический	теневого, эхо-метод, зеркально-теневого, эхо-зеркальный
магнитный	магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, индукционный
тепловой	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения и др.
электромагнитный (вихретоковый)	вихретоковый с использованием накладных, проходных, погружных и экранных вихретоковых преобразователей
оптический	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения
электрический	электрические методы
проникающими веществами	цветной (хроматический), яркостный (ахроматический), люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующихся частиц, комбинированный
радиационный	рентгеновский, гамма-, бета-, нейтронный, позитронный и др.
радиоволновой	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения

Для успешного мониторинга необходимо выполнить контрольные пробы указанных форм и размеров.

Определение структуры металла сварных соединений и установление местонахождения, характера и наличия дефектов являются основными задачами проводимых исследований.

Разрушение металлоконструкции в первостепенные задачи не входит, поэтому наиболее часто в современном мире используются методы неразрушающего контроля (табл. 2) [1].

Среди методов неразрушающего контроля главенствующее место занимает оптический контроль. Его используют для проявления дефектов типа нарушения сплошности, проверки геометрических характеристик, фиксирования физико-механических характеристик, технической диагностики для предположения образования различных дефектов [2].

Выбор подходящего метода зависит как от физико-химических свойств диагностируемого объекта, так и от различных характеристик и условий проводимого изучения. Прибор выбирают также в зависимости от характера дефекта и разрешающей способности. Однако ни один из представленных типов контроля нельзя назвать универсальным, поскольку они не позволяют эффективно оценить все характеристики изделия [3].

В процессе эксплуатации металлической конструкции основными критериями становятся усталость и истощение трещиностойкости. На поверхности

и в близлежащих слоях проявляется усталостная повреждаемость, и необходимо определить наличие дефекта, находящегося на первой стадии. Далее в самое короткое время нужно провести количественную оценку с применением приборов. Если дефект перешел на вторую стадию, определить его можно только с помощью увеличительных средств [4, 14].

При эксплуатации детали механизмов претерпевают аварийное или естественное изнашивание. Наибольшее распространение получил визуально-оптический метод контроля посредством специального инструмента для измерения. Осмотр и диагностику электрооборудования грузоподъемных машин осуществляют с помощью лупы и набора инструментов.

Для содержания разнообразных транспортных средств требуются большие затраты. Плановый ТО и ремонт, а также внеплановые ремонты проводятся главным образом для увеличения срока эксплуатации и сохранения работоспособности изделий [16].

Исследования с применением методов диагностики дают возможность снизить трудоемкость и стоимость эксплуатации. Безотказность работы, повышенная ремонтно- и контролепригодность объектов будут показателями улучшения состояния изделия.

## 2. Экспертная система

Все вышеописанные методы позволяют исследовать металлическое изделие в статичном состоянии. Экспертная система диагностики работает на основе широкой базы данных. Она состоит из множества алгоритмов и фактов, описывающих работу метода и текущих вводных данных; блока приобретения знаний, призванного обеспечить поддержку в процессе работы; механизма вывода; подсистемы объяснений, играющей роль «самосознания» системы, которая обеспечивает анализ и аргументирование решений.

Повышение безопасности и снижение количества ошибок диагностики позволяют наиболее точно составить календарь эксплуатации [8, 20]. Это возможно при использовании программы, которая будет способна провести процедуру технической диагностики. Программа обязательно должна самообучаться, делать прогноз дальнейшего состояния изделия, проектировать и оптимизировать полученные данные.

В ходе разработки экспертной системы нужно преодолеть несколько фаз.

Первая — идентификации проекта (включает в себя определение проблемы, основные характеристики будущей системы, необходимые ресурсы для начала разработки и разработку техзадания).

Вторая — построение концептуальной модели проблемы и выделенных задач (на этом этапе большую роль играют знания и информация о работе каждого метода диагностики).

Третья — формализация задачи (в ходе этой фазы рассматриваются возможные инструменты для реализации экспертной системы, дорабатывается модель системы и выполняется структурирование знаний).

Четвертая — реализация (подбирается инструментарий, экспертная система переводится в формат инструментов ввода и вывода, выбирается модель объяснения вывода).

Пятая — тестирование (испытываются различные схемы выводов, тестируются все подсистемы, проводится отладка с помощью привлечения экспертов, не принимавших участие в разработке баз знаний).

Самыми важными следует считать первую и вторую фазы, ведь невнимательное отношение к ним может обернуться необходимостью возврата к началу проектирования [9, 17].

В связи с тем, что эта модель системы будет работать с данными, полученными с датчиков-преобразователей, следует использовать нечеткую экспертную систему. В вышеуказанные фазы следует добавить блок рассуждений, способный учитывать все правила нечеткой логики и применять методы работы с ней, и блок дефазификации, преобразующий множество в единственное значение, которое, в свою очередь, используется в последующих расчетах.

Другая статистическая модель системы профилактики металлоконструкций практически реализована в системе информационной поддержки оптимизации периодичности контроля состояния металлоконструкций.

Сам процесс принятия решений основан на модели объекта управления, что может быть определено как совокупность статических и динамических объектов. Процесс построения является не чем иным, как процессом выявления системы элементов, составляющих проблему, а также установления связей между ними и закономерностей их поведения.

Основой экспертной системы являются следующие виды работы:

- получение данных с датчиков;
- расчет показателей системы профилактики металлических конструкций;
- оптимизация периода профилактического восстановления металлоконструкции;
- оптимизация критического уровня линейного размера контрольной площадки;
- совместная оптимизация параметров режима профилактики;
- вывод результата [8, 18].

Вывод результата отправляется на экран компьютера. Его можно сохранить в таблицу или текстовый файл, который укажет пользователь.

Основой экспертной системы является база знаний. Одно из важнейших отличий экспертной системы от остальных существующих систем — ее принцип работы. Экспертная система использует базу знаний для решения определенных проблем в специфических областях. Такая система обычно использует математические методы (а не теоретические), т. к. их возможно применить к более обширным областям [10, 14].

Представляя конструкцию экспертной системы как стремящуюся к самоорганизации, расширяем ее, наращивая вокруг основы — динамической подсистемы — другие модули. Среди них — модуль диагностирования эффективности системы (расчет КПД в новых условиях функционирования), модуль диагностирования ситуации без изменения структуры существующей системы автоматического регулирования (для передачи в АСУ), модуль надежности (диагностирование структурных параметров) и др. Важный пункт комплексного подхода — учет взаимодействия разнохарактерных факторов, который обуславливает эффективность методов неразрушающего контроля. Такой подход помогает раскрыть принципы самоорганизации систем. Она определяется здесь через взаимодействие элементов систем, направленное на их сохранение как процесс, в ходе которого создается (воспроизводится) организация сложной системы [10].

Математическое понимание принципа самоорганизации систем основано на применении логических структур, описывающих «организующие» отношения между элементами систем, что позволяет оценивать процессы самоорганизации, используя системно-структурный анализ. Системно-структурный подход обоснования принципа самоорганизации системы (экспертной системы) основывается на заключении о том, что «авторегенеративной системой является тройка категорий — вещь, свойство, отношение, которые могут определяться только друг через друга». Исходя из этого положения, рассмотрим категорию отношения в качестве причинно-следственных связей, приводящих к согласованному поведению динамической подсистемы и других элементов экспертной системы. Более того, категорию отношения нужно рассматривать и в качестве организующих взаимодействий элементов внутри самой динамической подсистемы, т. е. она также может быть представлена как система самоорганизации. Это положение позволяет использовать динамическую подсистему в качестве идентификатора состояния технической системы [8].

Таким образом, явление самоорганизации здесь — реализация взаимоотношения динамической подсистемы как системы самоорганизации с другими модулями на основе математического моделирования их логических связей, изменяющихся во времени, в результате которых устанавливаются новые свойства элементов экспертной системы при наличии математического описания динамической подсистемы и отдельных элементов экспертной системы [19].

Методологическое обоснование выбора предлагаемой архитектуры экспертной системы можно представить следующим образом на рисунках 1 и 2.

Отличие данной архитектуры экспертной системы от уже известных — в связях между динамической подсистемой с свойствами объекта, которые могут изменяться в ходе диагностирования. Каждый изменяемый параметр влияет на подход, который система должна задействовать для наиболее обширного спектра диагностики [11, 20].

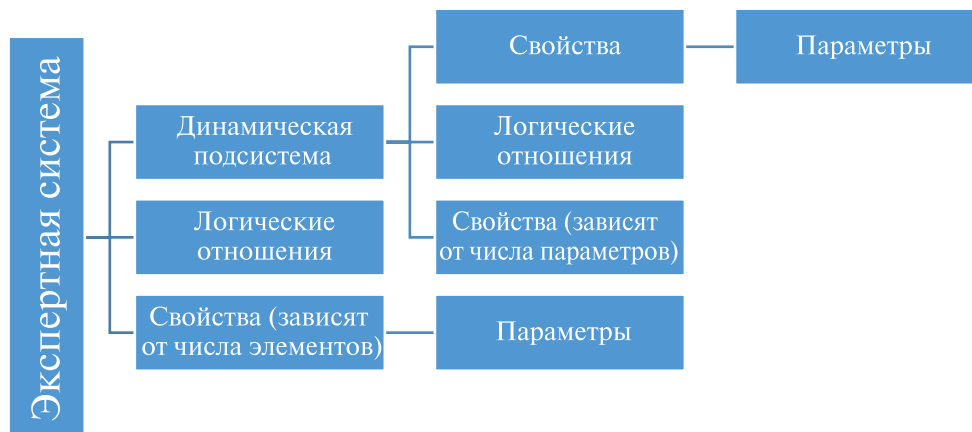


Рис. 1. Архитектура экспертной системы

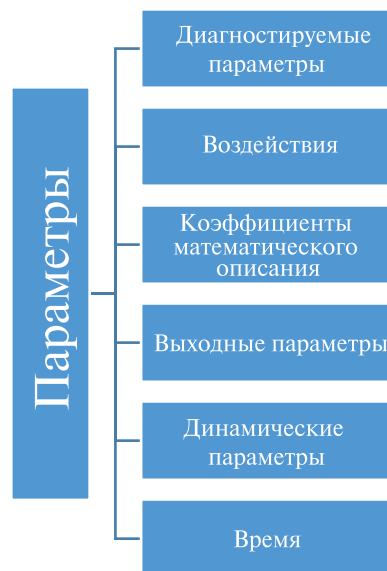


Рис. 2. Параметры, влияющие на работу экспертной системы

Уравнение, описывающее предложенную архитектуру экспертной системы, имеет следующий вид:

$$ES = \left( \left( D(P(t)(x_0(t), x_1(t), x_2(t), z(t), k(t), y(t), d(t))), R(t), P(t) \right) \right), \quad (1)$$

$$R(t), (P_i(t)(x_1(t), z_i(t), k_i(t), y_i(t))),$$

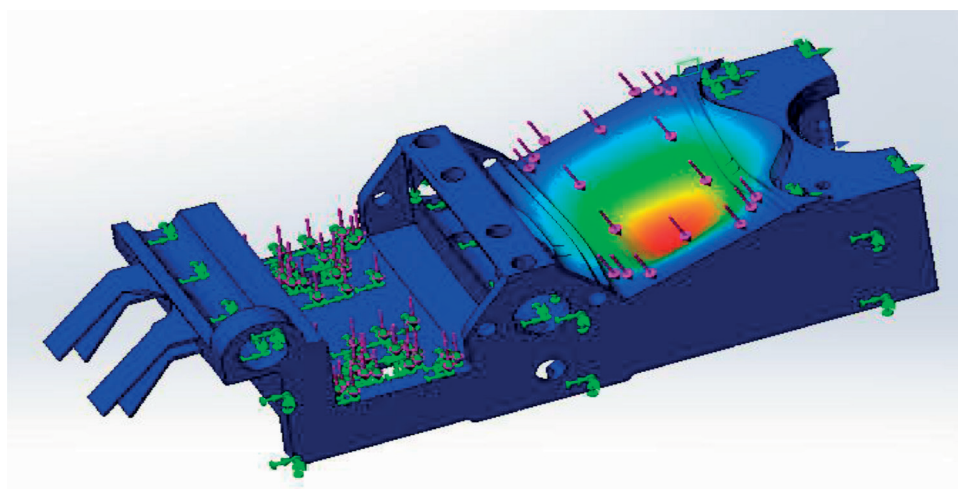
где  $ES$  — экспертная система;  $D$  — динамическая подсистема;  $P$  — свойства элементов экспертной системы;  $R$  — логические отношения;  $x$  — воздействия ( $x_0$  — воздействие исходного режима,  $x_1$  — воздействие внешнего характера,  $x_2$  — воздействие внутреннего характера);  $z$  — диагностируемые параметры;  $k$  — коэффициенты математического описания;  $y$  — выходные параметры;  $d$  — динамические параметры;  $t$  — время;  $i$  — число элементов экспертной системы.

У описанной выше архитектуры несколько различных используемых параметров, которые характеризуют изделие. Динамическая подсистема, зависящая от набора определенных параметров, становится гибкой, что позволяет проводить диагностику с более высокими показателями точности.

В качестве примера рассмотрим особенности организации процесса диагностирования тележки подвижного состава. Из-за риска деформации металла в процессе эксплуатации необходим контроль напряженно-деформированного состояния. Остановимся на основных параметрах, которые нужны, чтобы описать уравнение системы диагностирования и получить схему расположения напряжений как результат расчетов, внесенный в программный комплекс SolidWorks по раннее смоделированному сборочному чертежу надрессорной балки тележки КВЗ ЦНИИ М (рис. 3).

Выявленное местоположение с высоким риском образования напряженных участков указывает, какие именно места стоит подвергнуть более точному исследованию [9]. Реализация комплексной системы диагностирования проходит в несколько этапов. Сначала определяют возможное местонахождение высоких напряжений, что также включает в себя определение влияний внешней среды (они оказывают прямое воздействие на скорость возникновения опасных напряжений). Затем проводят сравнение по параметрам, указывающим на целесообразность применения того или иного метода контроля. Далее ведут сбор данных методом, выбранным на этапе сравнения. По внесенным протоколам расчета система вычисляет исходный результат и передает на экран рабочего компьютера или сохраняет в текстовый файл.

Время эксплуатации пассажирского вагона, на котором установлена балка, характеристики воздействия окружающей среды, динамические параметры (воздействие вибрации, случайных напряжений в ходе движения), характеристика исходного состояния конструкции (в зависимости от применяемого



**Рис. 3.** Схема расположения напряжений надрессорной балки пассажирского вагона



метода контроля), а также параметры, подвергаемые диагностике, составляют уравнение экспертной системы. Динамическая подсистема зависит от каждого изменяемого параметра и в свою очередь влияет на работу экспертной системы.

Экспертная система с вышеприведенной архитектурой охватывает больше одной единицы мониторинга, что позволяет с более обширной базой полученных данных передать результат на указанную метку приемника.

## Заключение

Исследование методов неразрушающего контроля в диагностике на железных дорогах — важный шаг в повышении безопасности движения и перевозке людей. Методы, применяемые в статичном положении предмета исследования, можно использовать и в динамике, и при написании программы на основе экспертной системы, которая объединит в себе множество алгоритмов и фактов о работе методов, а также вводные данные. Это уменьшит число ошибок, совершаемых человеком. Экспертная система способна объединить в себе скорость решения проблемы и высокую точность, ведь алгоритмы, на которых строится программа экспертной системы, не пропустят неточности из-за человеческого фактора. По этой особенности можно сравнить потенциальные возможности работы экспертной системы с уже внедренными и функционирующими стационарными системами мониторинга технических средств автоматизации на железнодорожном транспорте [13, 15]. Количество ошибок, допускаемых людьми, можно снизить только благодаря проверке расчетов.

Однако полностью заменять человека не обязательно: необходимы обслуживание и проверка точности работы программы. Следует объединить работу программы на основе экспертной системы и эксперта, который станет дополнительной ступенью проверки расчетов процессов принятия решений. Такой комплексный способ работы существенно снизит количество отказов и повысит безопасность — а значит, поможет решить одну из важнейших проблем на железной дороге.

## Библиографический список

1. Бруяка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А. Инженерный анализ в SNSYS Workbench: Учебное пособие. — Самара: СамГУ, 2010. — 271 с.
2. Bernard B. Munyazikwiye, Hamid R. Karimi, Kjell G. Robbersmyr Fuzzy logic approach to predict vehicle crash severity from acceleration data, 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), 18–20 Nov. 2015 Yilan, Taiwan. DOI: 10.1109/iFUZZY.2015.7391892.
3. Бутырский С. Н., Сорокин П. А. Оптимизация режима технического диагностирования металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. — С. 41–52.

4. *O.N. Kuzyakov, M. A. Andreeva.* Increasing accuracy of three-dimensional displacement control system applying fuzzy logic theory, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3–4 Oct. 2018 Vladivostok, Russia DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602490.
5. *Сорокин П.А., Селиверстов Г. В., Колясников А. А.* Способ автоматизированной диагностики металлоконструкций грузоподъемных кранов // Автоматизация и современные технологии. — 2001. — № 1. — С. 5–7.
6. *M. Babita, J. Amit, M. B. Srinivas.* A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 21–24 April 2008 Beijing, China DOI: 10.1109/CMD.2008.4580217.
7. *D. E. Tamir, H. N. Teodorescu, M. Last, A. Kandel.* Discrete complex fuzzy logic, 2012 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 6–8 Aug. 2012 Berkeley, CA, USA DOI: 10.1109/NAFIPS.2012.6291020.
8. *Болотова Л. С.* Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник/ ФГБОУ ВПО РГУИТП; ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». — М.: Финансы и статистика, 2012. — 664 с.
9. *Сорокин П. А., Селиверстов Г. В., Бутырский С. Н.* Патент РФ 23556034. МПК 7 G01 N21/88. Способ диагностики трещинообразования в металлоконструкциях / Опубл. 2009. Бюл. № 14.
10. *Гарипов В. С., Горелов С. Н., Веккер П. И., Никитенко К. С.* Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и канатов навесного самоподъемного крана // Строительная механика и расчет сооружений. — 2015. — № 4. — С. 4–11.
11. *Joseph C. Giarratano, Gary D. Riley.* Expert Systems: Principles and Programming, Edition 4th: Course Technology; 4 edition. — 288 с.
12. *C.S. Krishnamoorthy, S. Rajeev.* Artificial Intelligence and Expert Systems for engineers (New Directions in Civil Engineering) 1st Edition. — Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. — 320 p.
13. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 171 с.
14. *Лошкарев И. Ю., Чернышов А. С.* Неразрушающий контроль. Особенности методов неразрушающего контроля. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Под редакцией А. В. Павлова. — Саратов, 2013. — С. 184–186.
15. *Гроссе К. У.* Неразрушающий контроль и технология мониторинга технического состояния конструкций при контроле качества и надзоре за объектами строительства // Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. АлитИнформ. — Санкт-Петербург, 2012. — С. 62–77.
16. *Гончаров Б. Э.* Метод неразрушающего контроля. Акустико-эмиссионный контроль. Научная перспектива. — Уфа: Инфинити, 2016. — С. 132–133.
17. *Величко Е.И., Приходько М. Г., Нижник А. Е.* Контроль сварных соединений методами неразрушающего контроля. Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КУБГТУ». — Краснодар: КУБГТУ, 2016. — С. 57–66.
18. *Мозгачев А. В., Рыбина Г. В., Шанцер Д. И., Блохин Ю. М.* Динамические интеллектуальные системы на основе интегрированных экспертных систем. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — М.: «Научтехлитиздат», 2012. — С. 13–20.

19. Громов Ю. Ю., Аль-Тамими Н. Ю., Иванова О. Г., Родин В. В. Некоторые аспекты построения экспертной системы оценки устойчивости сетевых информационных систем. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — М.: «Научтехлитиздат», 2011. — С. 43–46.
20. Ручкин В. В., Романчук В. А., Фулин В. А., Пролыгина А. А. Экспертная система нечеткой кластеризации нейропроцессорных систем, Известия ТулГУ. Технические науки. — Тула: ТулГУ, 2014. — С. 162–167.

### **Yu. V. Alevetdinova**

*Department of «Land Transport and Technological Machines»,  
Russian University of Transport, Moscow*

### **TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEM OF ROLLING STOCK UNIT METALWORK**

The article is devoted to the study of diagnostic methods used in the dynamic operation of road construction machines. It describes existing methods that can further be used to create an expert diagnostics system. The intelligent systems' diagnostic methods (mainly non-destructive testing methods) considered in the article can improve the accuracy of diagnosing and predicting the metalwork condition.

The service life of metalwork depends on many factors, such as force impacts, load dynamics, environmental corrosive power, high temperature effects, etc. It is possible to extend the service life of products by increasing the accuracy and timeliness of diagnosis. The article discusses the expert system architecture visually showing the relationship between the subsystem and dynamically changing system properties. The proposed architecture allows for the most comprehensive analysis of complex technical systems' behavior, as well as for the prompt expert decisions. An integrated approach is suggested in the operation of expert systems where preference is given to theoretical, most often mathematical methods that are more generalized and less related to the subject area. Also, the author introduced a mathematical model that reflects the logic of the expert system decisions.

expert system, dynamics, non-destructive testing, synergistic approach, self-awareness, prediction, fuzzy logic

### **References**

1. Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., & Glazunova N. A. (2010) Inzhenernyy analiz v SNSYS Workbench [Engineering analysis in SNSYS Workbench]. Uchebnoye posobiye [Training manual]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 271 p. (In Russian)
2. Bernard B. Munyazikwiye, Hamid R. Karimi & Kjell G. Robbersmyr (2015) Fuzzy logic approach to predict vehicle crash severity from acceleration data, 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), 18–20 Nov. 2015. Yilan, Taiwan. DOI: 10.1109/iFUZZY.2015.7391892
3. Butyrskiy S. N. & Sorokin P. A. (2012) Optimizatsiya rezhima tekhnicheskogo diagnostirovaniya metallokonstruktsiy gruzopod'yemnykh mashin [Optimization of the technical diagnostic mode for hoisting machines metalwork]. *Bulletin of the Tula State University [Izvestiya TulGU]. Technical sciences.* Tula, TSU Publ., iss. 10, pp. 41–52. (In Russian)

4. *Kuzyakov O. N. & Andreeva M. A.* (2018) Increasing accuracy of three-dimensional displacement control system applying fuzzy logic theory, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3–4 Oct. 2018. Vladivostok, Russia. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602490
5. *Sorokin P. A., Seliverstov G. V. & Kolyasnikov A. A.* (2001) Sposob avtomatizirovannoy diagnostiki metallokonstruktsiy gruzopod'yemnykh kranov [A method for automated diagnostics of hoisting cranes metalwork]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii [Automation and Modern Technology]*, no. 1, pp. 5–7. (In Russian)
6. *Babita M., Amit J. & Srinivas M. B.* (2008) A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 21–24 April 2008 Beijing, China. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580217
7. *Tamir D. E., Teodorescu H. N., Last M. & Kandel A.* (2012) Discrete complex fuzzy logic, 2012 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 6–8 Aug. 2012 Berkeley, CA, USA. DOI: 10.1109/NAFIPS.2012.6291020
8. *Bolotova L. S.* (2012) Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii osnovannyye na znaniyakh [Artificial intelligence systems: knowledge-based models and technologies]. Textbook. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Russian State University of Innovative Technologies and Entrepreneurship (RGUITP); Federal State Institution “Research Institute of Information Technologies and Telecommunications” (GNII ITT Informika). Moscow, Finansy i statistika Publ., pp. 267–302. (In Russian)
9. *Sorokin P. A., Seliverstov G. V. & Butyrskiy S. N.* (2009) RF Patent 23556034. IPC7 G01 no. 21/88. Sposob diagnostiki treshchinoobrazovaniya v metallokonstruktsiyakh [A method for diagnosing crack formation in metalwork]. Publ. in 2009. Bul. no. 14. (In Russian)
10. *Garipov V. S., Gorelov S. N., Vekker P. I. & Nikitenko K. S.* (2015) Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy i kanatov navesnogo samopod'yemnogo krana [Analysis of the stress-strain state of metal structures and ropes of a mounted self-elevating crane]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and structural analysis]*, no. 4, pp. 4–11. (In Russian)
11. *Joseph C. Giarratano & Gary D. Riley.* Expert Systems: Principles and Programming, Edition 4th: Course Technology; 4 edition. 288 p.
12. *Krishnamoorthy C. S. & Rajeev S.* (1996) Artificial Intelligence and Expert Systems for engineers (New Directions in Civil Engineering) 1st Edition. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2018, 320 p.
13. *Efanov D. V.* (2016) Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices: monograph]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 171, pp. (In Russian)
14. *Loshkarev I. Yu. & Chernyshov A. S.* (2013) Nerazrushayushchiy kontrol'. Osobennosti metodov nerazrushayushchego kontrolya. Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Non-destructive testing. Specific features of non-destructive testing methods. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Edited by A. V. Pavlov. Saratov, pp. 184–186. (In Russian)
15. *Grosse C. U.* (2012) Non-destructive testing and technology for monitoring the technical condition of structures for quality control and supervision of construction sites. *Alitinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures*. St. Petersburg, ALITinform Publ., pp. 62–77. (In Russian)
16. *Goncharov B. E.* (2016) Metod nerazrushayushchego kontrolya. Akustiko-emissionnyy kontrol' [Non-destructive testing method. Acoustic emission testing]. *Nauchnaya perspektiva [The scientific perspective]*. Ufa, Infinity Publ., p. 132–133. (In Russian)

17. *Velichko E. I., Prikhod'ko M. G. & Nizhnik A. E.* (2016) Kontrol' svarnykh soyedineniy metodami nerazrushayushchego kontrolya [Testing of welded joints by NDT methods]. *Nauchnyye trudy KubGTU [KubSTU Research papers]*. Krasnodar, KubSTU Publ., pp. 57–66. (In Russian)
18. *Mozgachev A. V., Rybina G. V., Shantser D. I. & Blokhin Yu. M.* (2012) Dinamicheskiye intellektual'nyye sistemy na osnove integrirovannykh ekspertnykh sistem. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika [Dynamic intelligent systems based on integrated expert systems. Devices and systems. Management, control, diagnostics]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., pp. 13–20. (In Russian)
19. *Gromov Yu. Yu., Al'-Tamimi N. Yu., Ivanova O. G. & Rodin V. V.* (2011) Nekotoryye aspekty postroyeniya ekspertnoy sistemy otsenki ustoychivosti setevykh informatsionnykh sistem. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika [Certain aspects of building an expert system for assessing the stability of network information systems. Devices and systems. Management, control, diagnostics]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., pp. 43–46. (In Russian)
20. *Ruchkin V. V., Romanchuk V. A., Fulin V. A. & Prolygina A. A.* (2014) Ekspertnaya sistema nechetkoy klasterizatsii neyroprotsessornykh sistem [Expert system of fuzzy clustering of neuroprocessor systems]. *News of the Tula State University [Izvestiya TulGU]*. Tula, TSU Publ., pp. 162–167. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым  
Поступила в редакцию 06.06.2019, принята к публикации 30.08.2019*

*АЛЕВЕТДИНОВА Юлия Викторовна* — ассистент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта;  
e-mail: [yulialevetdinova@gmail.com](mailto:yulialevetdinova@gmail.com)

© Алеветдинова Ю. В., 2020