

ОПЫТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Авторами предлагаются методика и алгоритмы оперативного диагностирования тяговых двигателей локомотивов, основанные на дублировании основного частотного канала дополнительным вейвлет-анализом с последующим принятием решения по методике нечеткой логики. Метод и соответствующие алгоритмы использованы при программировании контроллеров вибродиагностических систем.

Ключевые слова: диагностирование тяговых двигателей локомотивов, датчики, диагностический эксперимент, критерии качества диагностического эксперимента, адекватность, достоверность, диагностическая система.

Тяговые двигатели локомотивов являются основой всего подвижного состава на железнодорожном транспорте. Они должны обладать следующими свойствами.

1. Повышенная надежность. Уникальность железнодорожного транспорта заключается в том, что он является системой конвейерного типа: отказ любого элемента в транспортной цепочке приводит к отказу всей перевозочной системы: все поезда, следующие за остановившимся, вынуждены останавливаться до ликвидации неисправности [1, 2]. Способы восстановления движения могут быть разными, главными критериями при этом могут быть время остановки, стоимость восстановления, механизмы восстановления и т.д.

В любом случае основой надежности транспортного конвейера являются тяговые двигатели (ТД).

2. Унифицируемость. Любое транспортное средство содержит одно или несколько движителей. Они одинаковы, обладают свойством взаимозаменяемости и ремонтпригодности.

3. Модульность. ТД поддерживаются единой системой управления, обеспечивающей взаимодействие транспортных модулей для управления локомотивом в смысле максимальной эффективности движения, т.е. минимальных расходов на общую поездную задачу.

С позиций экономики возникает задача восстановления локомотивов с минимальным ущербом для транспортного конвейера. Одним из наиболее эффективных вариантов ее решения является вариант безразборной диагностики, т.е.

проверки технического состояния ТД непосредственно на локомотиве.

Существует два варианта оперативной диагностики ТД: бортовая и деповская. В первом варианте оперативное диагностирование производится непосредственно во время эксплуатации подвижного состава. Бортовая диагностика осуществляется непосредственно во время движения поезда и является помощником для поездных бригад. Например, это система контроля температуры буксовых подшипников и аналогичных им устройств. Это системы аварийного типа, которые должны останавливать дальнейшую эксплуатацию транспортного средства [3, 4].

Деповская диагностика осуществляется при временном удалении транспортной единицы из эксплуатации для оперативной проверки с целью ее возвращения или ремонта. Она требует более серьезной и дорогостоящей организации. В любом случае должен выполняться главный критерий: безопасность движения.

При организации деповской диагностики желательно обеспечить минимальное время отвлечения локомотива из эксплуатации. Это экономически оправданный критерий.

Основой научной проблемы является оперативная диагностика ТД. В основе предложенной и внедренной авторами системы диагностики лежит безразборная технология, суть которой состоит в следующем. Локомотив выводится из эксплуатации и в пункте диагностирования оборудуется датчиками. По окончании диагностического эксперимента локомотив или отправляется в дальнейшую эксплуатацию (оптимисти-

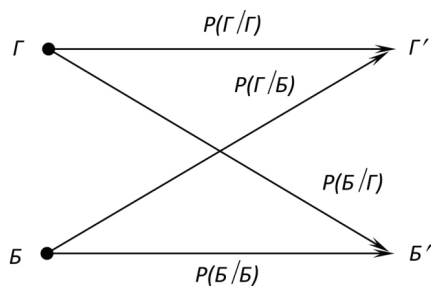


Рис. 1. Диаграмма состояний диагностирования

ческий прогноз), или отправляется на ремонт с дополнительными затратами, или подвергается дополнительной проверке [5, 6].

Математически процедура диагностирования может выглядеть в виде направленного графа, имеющего вид, приведенный на рис. 1.

Как видно из диаграммы, возможны четыре типа решения:

— исходно (априорно) исправный объект после испытаний признается исправным с вероятностью $P(Г/Г)$;

— априорно неисправное устройство после испытаний подтверждает свое состояние с вероятностью $P(Б/Б)$;

— годный объект после экспериментов признается неисправным с вероятностью $P(Б/Г)$;

— неисправное устройство после диагностирования ошибочно принимается годным с вероятностью $P(Г/Б)$.

Первые два решения правильны, другие два — ошибки. По аналогии с теорией связи решение об исправности объекта при его фактической неисправности назовем ошибкой I рода:

$$P_I = P(Г/Б). \quad (1)$$

Аналогично решение противоположного характера назовем ошибкой II рода:

$$P_{II} = P(Б/Г). \quad (2)$$

Очевидно, справедливы и следующие соотношения:

$$P(Г/Г) + P(Б/Г) = P(Г); \quad (3)$$

$$P(Б/Б) + P(Г/Б) = P(Б); \quad (4)$$

$$P(Г/Г) + P(Г/Б) = P(Г'); \quad (5)$$

$$P(Б/Б) + P(Б/Г) = P(Б'). \quad (6)$$

Исходя из этих соотношений, можно описать математическое ожидание диагностического эксперимента относительно объекта в виде: [7, 8]

$$P_A = [P(Г/Г) + P(Б/Г)] P(Г) + [P(Б/Б) + P(Г/Б)] P(Б). \quad (7)$$

То же относительно результатов диагностирования:

$$P'_A = [P(Г/Г) + P(Г/Б)] P(Г') + [P(Б/Б) + P(Б/Г)] P(Б'). \quad (8)$$

При отсутствии ошибок выражения (4) – (9) вырождаются в тождества:

$$P(Г/Г) = P(Г) = P(Г');$$

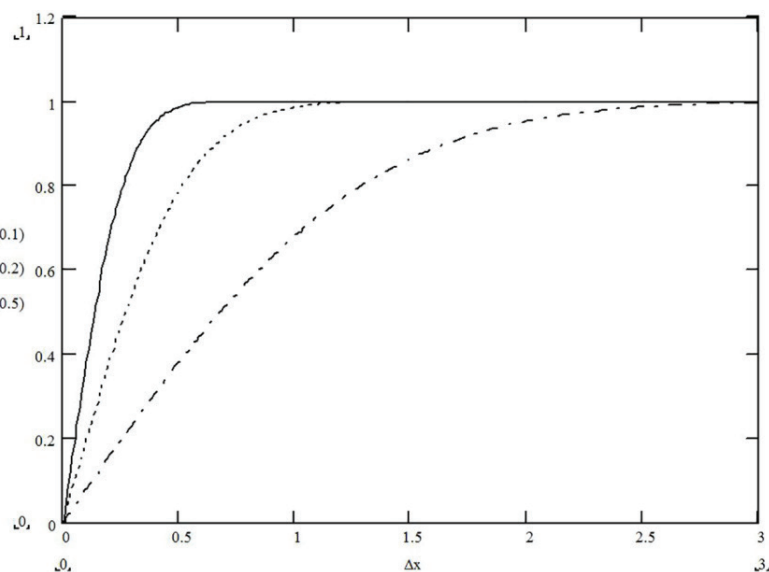
$$P(Б/Б) = P(Б) = P(Б'); \quad (9)$$

$$P_A = P'_A = P(Г) + P(Б) = 1.$$

Последнее выражение в (9) означает, что диагностический эксперимент абсолютно достоверен и адекватно отображает состояние объекта.

Для дальнейших исследований авторами дополнительно введены критерии качества диагностического эксперимента, для чего предложены количественные оценки в виде отношений.

Введем в рассмотрение следующие коэффициенты:

Рис. 2. Зависимости $P_A(x)$, нормальное распределение

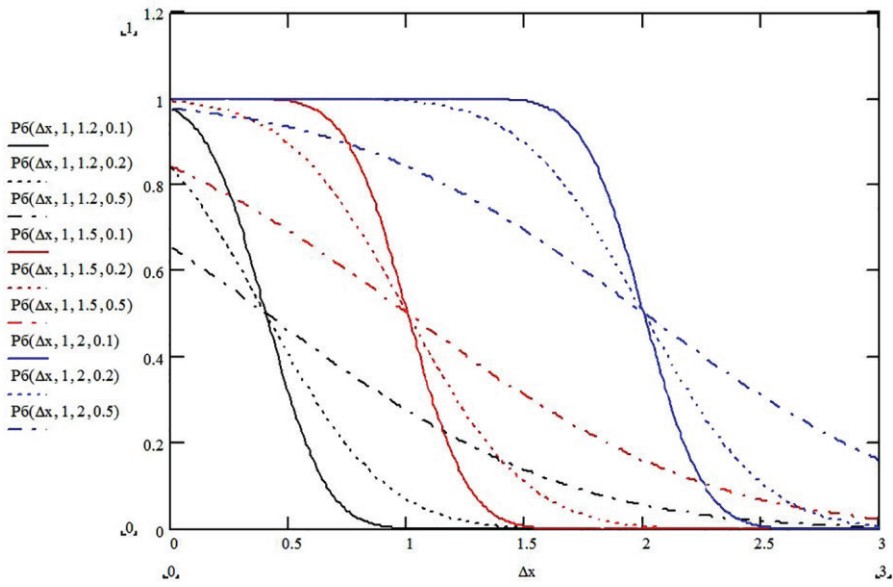


Рис. 3. Зависимости $P_B(x)$, распределение Вейбулла

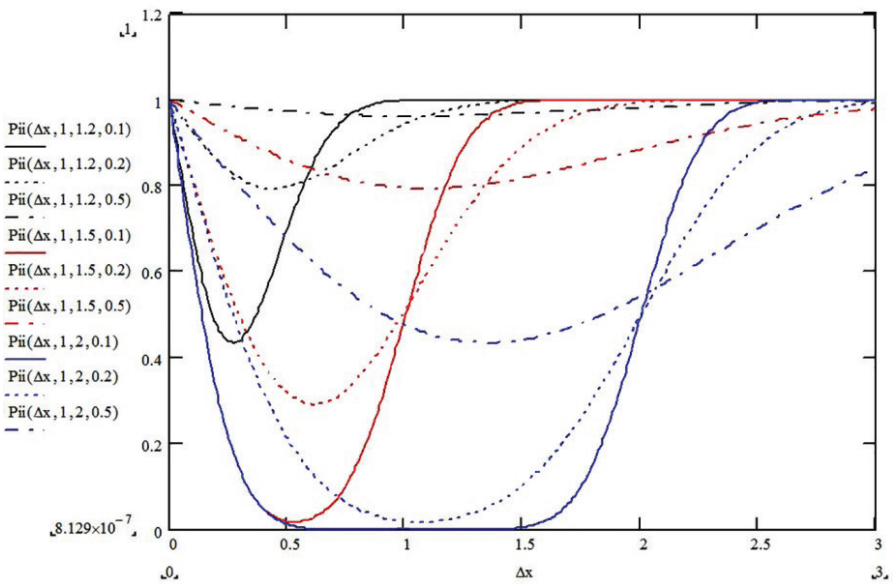


Рис. 4. Зависимости $P_N(\Delta x)$, нормальное распределение

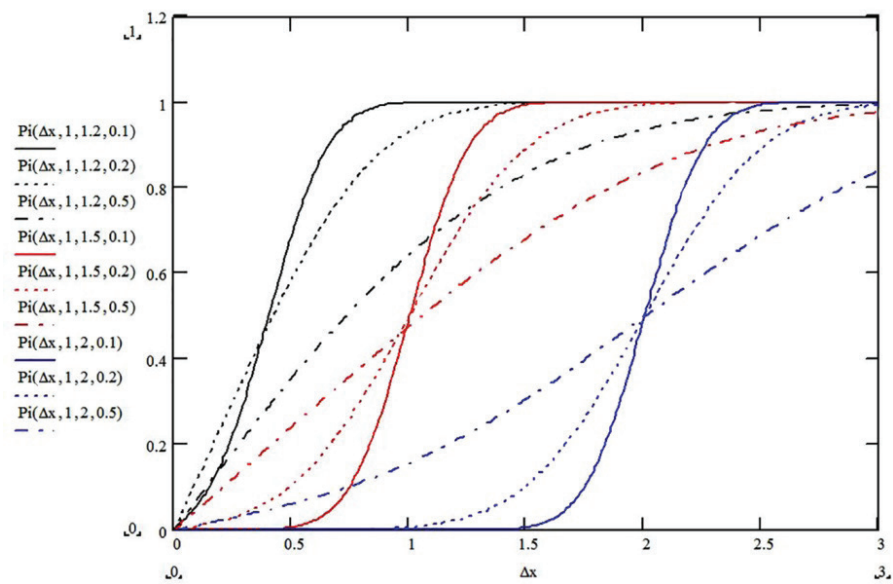


Рис. 5. Зависимости $P_I(\Delta x)$, распределение Вейбулла

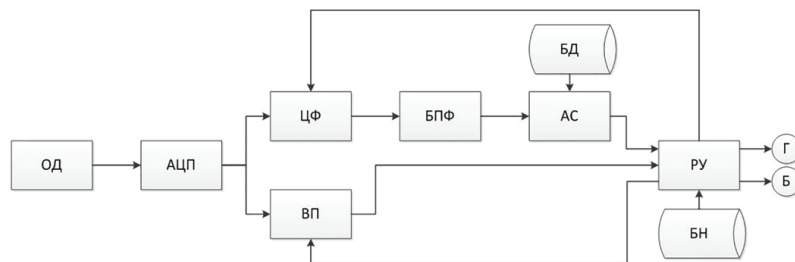


Рис. 6. Структура диагностического алгоритма

$$\mu_{\Gamma} = \frac{P(\Gamma/\Gamma)}{P(\Gamma/\text{Б})} = \frac{1 - P_{\text{II}}}{P_{\text{II}}} \cong \frac{1}{P_{\text{II}}}; \quad (10)$$

$$\mu_{\text{Б}} = \frac{P(\text{Б}/\text{Б})}{P(\text{Б}/\Gamma)} = \frac{1 - P_{\text{I}}}{P_{\text{I}}} \cong \frac{1}{P_{\text{I}}}, \quad (11)$$

коэффициенты ошибок:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{1}{\mu_{\Gamma}} \cong P_{\text{II}}; \quad (12)$$

$$\eta_{\text{Б}} = \frac{1}{\mu_{\text{Б}}} \cong P_{\text{I}}.$$

Коэффициенты ошибок практически совпадают с соответствующими вероятностями. Предположим, распределения $P_{\Gamma}(x)$ и $P_{\text{Б}}(x)$ нормальны, что соответствует наиболее общему случаю и соответствует теореме Ляпунова. Построим номограммы для коэффициентов достоверности при нормировании распределений относительно математических ожиданий:

$$P_{\Gamma}^*(x) = P_{\Gamma}(x) / m_{\Gamma}; \quad (13)$$

$$P_{\text{Б}}^*(x) = P_{\text{Б}}(x) / m_{\text{Б}}.$$

Сделаем расчет для $m_{\text{Б}} = (1,2; 1,5; 2) m_{\Gamma}$ и для дисперсий нормальных распределений $\sigma_{\Gamma/\text{Б}} = (0,1; 0,2; 0,5) m_{\Gamma/\text{Б}}$ в функции от значений Δx , считая границы симметричными относительно математического ожидания m_{Γ} . Соответствующие номограммы приведены на рис. 2–5.

На рис. 2 показаны зависимости $P_{\Gamma}^*(x)$ от ширины зоны Δx . Естественно, графики монотонно возрастают, причем для дисперсий, составляющих 0,1 и 0,2 от математического ожидания для корректного решения, достаточно $\Delta x = 0,5$, т.е. половины значения математического ожидания.

На рис. 3 приведены три семейства диаграмм, соответствующих значениям $m_{\text{Б}}$ соответственно 1,2; 1,5 и $2m_{\Gamma}$, причем чем меньше это значение, тем ближе к началу координат расположено соответствующее семейство. Из приведенных графиков видно, что значение $m_{\text{Б}} = 1,2m_{\Gamma}$ дает плохую достоверность вычисления $P_{\text{Б}}^*(x)$, поэтому желательно выбирать его не ниже $1,5m_{\text{Б}}$.

Наибольший интерес представляют зависимости вероятностей ошибок в функции Δx . На рис. 4 приведены зависимости $P_{\text{II}}(\Delta x)$, а на рис. 5 — $P_{\text{I}}(\Delta x)$. Видно, что на графиках присутствуют четко выраженные минимумы в интер-

валах Δx от 0,2 до 1,2. При каждом конкретном значении $m_{\text{Б}}$ и σ можно вычислить оптимальное значение Δx , дающее минимум погрешности. Отметим, что большим значениям дисперсии соответствует повышенное значение погрешности.

Целью проведенных авторами исследований является снижение дополнительных затрат путем безразборной технологии диагностирования. Она состоит в том, что после установки локомотива на проверку каждого из тяговых двигателей с использованием структурной и вычислительной избыточности дополнительно вводятся алгоритмы диагностирования, включающие, кроме спектрального анализа, вейвлет-преобразование и элементы нечеткой логики.

Общая структура диагностического алгоритма приведена на рис. 6. Здесь обозначено: ОД — объект диагностирования; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; Г — годен; Б — брак; БПФ — быстрое преобразование Фурье, ЦФ — цифровая фильтрация; АС — анализатор спектра; БН — библиотека неисправностей; ВП — вейвлет-преобразование; РУ — решающее устройство; БН — библиотека неисправностей [9, 10].

Как видно из рис. 6, сигнал от вибродатчиков оцифровывается, после чего обрабатывается по двум независимым каналам, соответствующим частотной обработке и вейвлет-преобразованию. По частотному каналу сигнал фильтруется цифровым фильтром, после чего преобразуется в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и пропускается через анализатор спектра. Второй канал настроен на одну из вейвлет-функций, после чего оба результата анализируются в решающем устройстве, работающем по принципу нечеткой логики. В результате формируется одно из двух суждений: годен или брак. Оба канала имеют обратные связи и опираются на накапливающуюся библиотеку неисправностей, что дает устройству функции искусственного интеллекта (адаптивные обратные связи) с элементами обучения [11, 12].

В результате дополнительных алгоритмических преобразований появилась возможность повышения качества диагностирования и снижения времени простоя локомотивов на новой технологии, основанной на структурной и алгоритмической избыточности. Оба канала обеспечиваются современными средствами цифровых систем и технологий и внедрены в практическую область.

Библиографический список

1. Шахов В. Г. Информационные технологии и алгоритмы в диагностировании железнодорожной техники. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 151 с. ISBN 978-5-91306-027-3.
2. Головаш А. Н., Шахов В. Г. Вероятностная модель оценки результатов диагностирования // Омский научный вестник. 2008. № 2 (68). С. 111–114.
3. Тэттэр А. Ю., Федоров И. В., Шахов В. Г. Методы обработки сигналов вибрации для повышения достоверности и глубин диагностирования // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 76–79.
4. Нгулу-А-Ндзели, В. Ю. Тэттэр, В. Г. Шахов. Диагностирование технических систем: сопоставительные алгоритмы // Т-СОММ: телекоммуникации и транспорт. 2018. № 9. С. 69–74. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10148.
5. Власьевский С. В., Кучумов В. А., Щербаков В. Г. Сравнение энергетической эффективности тягового электропривода электровозов переменного тока на основе коллекторных и асинхронных двигателей // Электротехника. 2017. № 9. С. 72–78.
6. Гордеев И. П., Гаранин М. А., Тарасов Е. М. Моделирование процессов в силовой цепи электровозов ВЛ 10 (ВЛ-10У) при последовательном соединении тяговых // Электротехника. 2017. № 3. С. 40–45.
7. Иньков Ю. М., Литовченко В. В., Феокистов В. П. Двухсистемный грузовой электровоз для железных дорог Российской Федерации // Электротехника. 2014. № 3. С. 57–63.
8. Калякулин А. Н. Диагностирование тяговых электродвигателей локомотивов с учетом диэлектрических свойств изоляции // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 3 ч. / отв. ред. И. И. Галиев. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2015. Ч. 1. С. 231–236. ISBN 978-5-949-41126-1.
9. Харламов В. В., Шкодун П. К., Шестаков И. В. Автоматизированная система комплексной диагностики состояния изоляции тяговых электродвигателей // Известия Транссиба. 2015. № 4. С. 62–67.

10. Тычков А. С., Калякулин А. Н. Особенности обработки результатов диагностики тяговых двигателей электровозов с использованием нейросетевых технологий // Вестник института тяги и подвижного состава. 2016. № 12. С. 39–42.

11. Gorbunov M., Pistek V., Kovtanets M. [et al.]. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives // Vibroengineering Procedia. 2017. Vol. 13. P. 159–164. DOI: 10.21595/vp.2017.19043.

12. Jiande Y., Wang H., Huang S. [et al.]. Disturbance Observer-Based Backstepping Control of PMSM for the Mine Traction Electric Locomotive // Mathematical Problems in Engineering. 2018. 7253210. 10 p. DOI: 10.1155/2018/7253210.

НГУЛУ-А-НДЗЕЛИ, соискатель по кафедре «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ТЭТТЭР Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения.

SPIN-код: 3893-0204

AuthorID (РИНЦ): 456255

ШАХОВ Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность» ОмГТУ.

AuthorID (РИНЦ): 512758

Адрес для переписки: becker20000@yahoo.fr

Для цитирования

Нгулу-А-Ндзели, Тэттэр В. Ю., Шахов В. Г. Опыт диагностирования тяговых двигателей локомотивов // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 67–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-67-71.

Статья поступила в редакцию 27.08.2018 г.

© Нгулу-А-Ндзели, В. Ю. Тэттэр, В. Г. Шахов