

УДК 656.25:621.318

**Б. М. Бондаренко**, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматике, телемеханики и связи Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

**В. В. Лагута**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике, телемеханики и связи Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

**С. А. Разгонов**, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем и технологий Академии таможенной службы Украины

### ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ В СИСТЕМАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ ПО АКУСТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

*Рассматриваются методы предварительного анализа звуковых сигналов для выделения устойчивых признаков классификации состояний реле, применяемых в системах железнодорожной автоматики. Предложен алгоритм описания звукового сигнала на основе этих признаков.*

*Розглядаються методи попереднього аналізу звукових сигналів для виділення стійких ознак класифікації станів реле, що застосовуються в системах залізничної автоматики. Запропоновано алгоритм опису звукового сигналу на основі цих ознак.*

*The paper deals with methods of preliminary analysis of sound signals to extract stable features in classifying the relay used in railway automation systems. The algorithm of the description of a sound signal on the basis of these attributes is offered.*

**Ключевые слова.** Периоды ремонта релейной аппаратуры, акустическая диагностика электромагнитного реле, признаки распознавания, методы обработки акустического сигнала.

**Введение.** Безопасность движения на железнодорожном транспорте обеспечивается устройствами железнодорожной автоматики первого класса надежности, основу которых составляют электромагнитные реле. Опыт эксплуатации подтверждает факт их надежной работы: ресурс реле типов НМШ, НР и др. превышает 40 лет, вероятность опасных отказов минимизирована за счет особенностей конструкции.

Реле первого класса надежности не имеют элементов встроенного контроля и диагностики, поэтому технологией предусмотрен обязательный периодический контроль их электрических, временных и механических параметров [1].

К недостаткам существующей технологии следует отнести отсутствие автоматизации измерений и назначения периодичности ремонта для всего парка реле с учетом наиболее тяжелых по уровню тока режимов работы контактов, тогда как 70 % реле работают в облегченном режиме и не нуждаются в регулировке с открытием герметичного кожуха.

Сегодня ремонтно-технические участки используют морально устаревшее, дорогостоящее оборудование с низкой точностью измерения, что приводит к высокой субъективности полученных результатов и значительным затратам времени на проверку реле.

© Б. М. Бондаренко, В. В. Лагута, С. А. Разгонов, 2013

---

Существующие стенды для измерения параметров реле имеют значительный вес и габариты, они не являются автоматизированными и также нуждаются в раскрытии герметичного блока прибора. Так, на проверку параметров одного реле и запись результатов измерения в среднем уходит более 120 минут, при этом журналы параметров специалистами заполняются вручную, что снижает объективность контроля [2].

С другой стороны, во многих странах, которые используют электромагнитные реле в железнодорожной автоматике, решаются вопросы контроля электрических и временных параметров электромагнитных реле с помощью различных автоматизированных устройств и систем без вскрытия герметичного кожуха с автоматизированным сохранением результатов проверок. Однако такими устройствами не предусмотрен контроль механической системы реле. Существующие разработки для определения механических параметров реле без раскрытия его герметичного блока являются единичными экземплярами и не приобрели широкого применения из-за низкой точности измерений, сложности их конструкций и использования.

Таким образом, сегодня существует необходимость в усовершенствовании технологии обслуживания, контроле механических параметров реле путем разработки новых подходов по созданию автоматизированных диагностических комплексов, что позволит повысить надежность и безопасность движения на железнодорожном транспорте.

Проблема автоматической диагностики работоспособности реле в целом, в том числе и возможность измерения механических параметров реле железнодорожной автоматики, непосредственно связана с возможностью измерения хода якоря электромагнитного реле в процессе его работы [3]. Для решения этой задачи были предложены различные методы и устройства [4–7].

Основной проблемой при использовании бесконтактных датчиков для проверки механических параметров реле является недостаточная точность получаемых результатов.

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля диагностирования радиоэлементов, в том числе и реле, являются акустические методы [8–10]. Звуковой сигнал, воспроизводимый реле в процессе его переключения, представляет собой сумму нескольких гармонических составляющих с различными свойствами. Любой звуковой сигнал имеет своеобразную тональность, которая определяется частотой, соответствующей максимальной амплитуде в его спектре.

Использование акустического метода диагностики реле во время его проверки по нескольким каналам измерения предложено авторами данного исследования [11, 12]. В основу измерительно-диагностического комплекса положен процесс цифровой фильтрации [13]. Комплекс позволяет определять параметры сигнала, в соответствии со значениями которых оценивают состояние (износ) реле. Задача идентификации состояний элементов с использованием звуковых сигналов решается методами распознавания образов [14–16]. Во всех случаях необходимо сформировать признаки для распознавания, что связано с экспериментальными исследованиями [17–19]. Существует два метода идентификации сигналов: на основе частотного (спектрального) анализа и с использованием пространственных характеристик распределения сигналов. При спектральном анализе состояние реле оценивается показателями, для которых известны предельные значения интервалов, типичных для оборудования без дефекта [10, 20].

**Постановка задачи.** Диагностика релейных элементов систем управления с помощью акустических сигналов позволяет повысить точность распознавания неисправностей. Важной задачей в решении этого вопроса является задача выделения устойчивых признаков для проведения процедуры распознавания [8].

Цель исследования – анализ звукового сигнала, воспроизводимого реле в процессе идентификации его состояния, разработка рекомендаций по формированию независимых показателей состояний релейных элементов железнодорожной автоматики с применением акустического сигнала.

**Результаты исследования.** Метод идентификации состояний реле по воспроизводимому

им звуковому сигналу заключается в формировании независимых признаков распознавания, характеризующихся разнообразием свойств и способностью изменяться в зависимости от среды, состояния источника для дальнейшей классификации. Одному источнику могут соответствовать разные сигналы относительно выбранных характеристик (показателей) звука. Звуковой сигнал можно охарактеризовать параметрами, не зависящими от состояния источника звука, которые позволяют распознать и классифицировать сигнал. Указанные физические параметры принято называть фонетическим кодом, для нахождения которого необходимо провести предварительный анализ (обработку) звукового сигнала для получения его признаков, образующих независимую информацию о сигнале.

Целью акустической диагностики реле является выявление развития отказа ранее его появления. Для этого необходимо иметь временную и спектральную зависимость работы дефектных и бездефектных объектов контроля, а для обеспечения достоверных результатов применять статистические методы моделирования. В соответствии с вероятностным подходом все отклонения от нормы рассматриваются как случайные величины. Трудности реализации метода акустической диагностики при эксплуатации реле заключаются в получении точной информации о конкретном механическом параметре, достаточной для достоверного описания распределения вероятностей выхода этого параметра за пределы допустимого изменения величины.

Признанным способом накопления информации и определения основных диагностических оценок является метод экспертных оценок как весомый результат накопленного опыта специалистами. На этой основе складываются перечни основных неисправностей, представленных в эксплуатационной документации в виде таблиц типичных неисправностей.

Обычно используют физико-статистические модели, описывающие взаимосвязь  $Y$ -нормированных параметров объекта, диагностирующие степень износа или разрегулирования и  $X$ -параметров сигнала (амплитуды определенной составляющей, мощности сигнала и т. п.). Тогда метод статистической идентификации будет заключаться в том, чтобы принимать те или другие решения, исходя из вероятностей случайной величины  $X$ , по которой можно судить об исправности прибора.

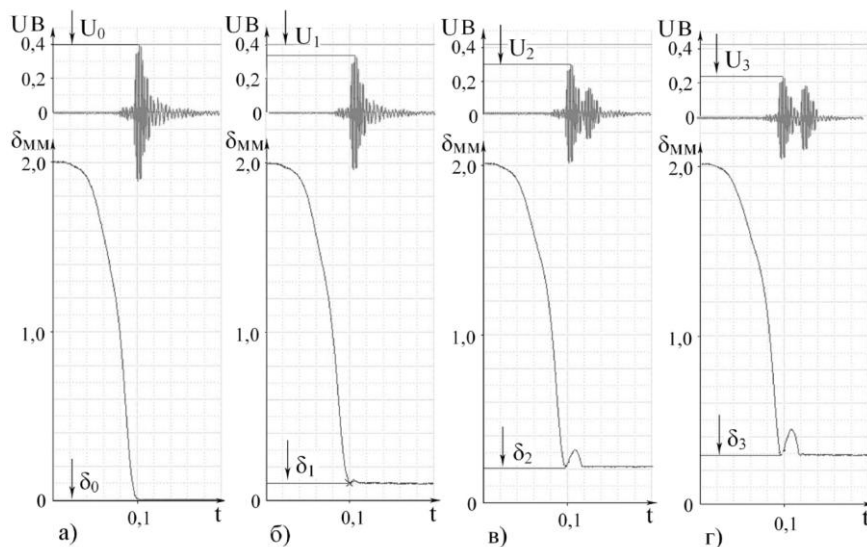


Рис. 1. Акустические характеристики работы электромагнитного реле при разной высоте антимагнитного штифта  $\delta$  мм: а)  $\delta_0 = 0,0$  мм; б)  $\delta_1 = 0,1$  мм; в)  $\delta_2 = 0,2$  мм; г)  $\delta_3 = 0,3$  мм  
Важным механическим параметром электромагнитного реле является высота анти-

магнитного штифта, которую можно использовать для диагностики механического состояния объекта. Его малая высота замедляет время отпадания якоря реле и может стать причиной системных отказов.

На рис. 1 а–г изображены временные переходные характеристики работы электромагнитного реле типа НМШ2-900 при разной высоте антимангнитного штифта. Временные характеристики сопоставлены с движением якоря при срабатывании реле. На каждом из рисунков амплитуды акустических сигналов отличаются одна от другой в зависимости от высоты штифта  $\delta 0$ – $\delta 3$ .

После получения временных характеристик сигнала проводится идентификация состояния прибора по принятым признакам.

Для идентификации состояния реле методом распознавания образов используются специальные алгоритмы [13].

На сегодняшний день не существует общепризнанного метода обработки звуковых сигналов [15–17, 19]. Звуковой сигнал обычно рассматривается последовательно, состоящей из стационарных и переходных компонентов, классифицируемых в соответствии с сочетанием или характером изменения сегментных признаков. Выбранные признаки должны отражать свойства сформированного акустического сигнала и гармоник, составляющих звук. Как правило, обработку сигнала производят последовательно, анализируя сигнал на интервалах времени длительностью в 15–20 мс. Результаты анализа представляются в виде вектора  $u$ , в котором его координаты  $u_k$  есть выбранные признаки, образующие передаточную характеристику звукового тракта и параметры источников его возбуждения в рассматриваемый момент времени [20, 21].

Компонентами вектора  $u_k$  для рассматриваемого интервала анализа берутся значения автокорреляционной функции:

$$u_k = R \ k = \sum_{i=1}^{N-k} y_i \times y_{i+k}, \ k = 0 \dots N-1,$$

где  $y_i$  – дискретные значения оцифрованного сигнала;  $i = 0, 1, 2 \dots N-1$ .

Сглаженный по частоте энергетический спектр звукового сигнала на дискретной сетке частот  $\omega_m$  также может быть взят в качестве признаков

$$u_m = Q \ \omega_m = R \ 0 \times g \ 0 + 2 \sum_{i=1}^m R \ i \times g \ i \times \cos \ \omega_m \times i \times \pi, \ m = 1 \dots N-1,$$

где  $\omega_m = 2\pi \times \nu \times \Delta t$  – относительная частота;  $\nu$  – звуковая частота;  $\Delta t$  – период дискретизации;  $g(k)$  – импульсная (весовая) функция;  $Q \ \omega_m$  – сглаженный спектр сигнала.

Рассмотренный энергетический спектр  $Q \ \omega_m$  образует устойчивые по отношению к особым свойствам признаки, обеспечивающие высокую эффективность распознавания при незначительных вычислениях [20, 21].

Последовательность дискретных значений  $y_i$  анализируемого звукового сигнала получают с выхода принимающего устройства. Интервал дискретизации может составлять 20 мкс. Оцифрованный акустический сигнал сглаживается по формуле:

$$y_i = \frac{\sum_{k=-3}^3 y_{i-k}}{16}, \quad i = 3, \dots, N-3$$

несколько раз [22], и каждый раз вычисляются следующие параметры:

–  $H_v$  – рассматриваемая частота сигнала в текущий момент времени. Определяется

---

подсчетом максимумов, который определяется по условиям:

$$y_i - y_{i-1} > 0 \text{ и } y_i - y_{i+1} > 0;$$

–  $D_1, D_2, D_3$  – количество импульсов длительностью, превышающей соответственно 250, 400, 550 мкс. Вычисляется анализом длительности интервалов между максимумами сигнала;

–  $Y_0$  – средняя громкость сигнала. Вычисляется подсчетом  $y_i$ , превышающих некоторое пороговое значение  $\bar{y}$ ;

–  $E_v$  – энергия сигнала в полосах частот  $\nu = \{200, 300, 500, 700, 900, 1100, 1500, 2500\}$  Гц;

–  $\Omega_1, \Omega_2$  – средние частоты формант. Определяются анализом максимумов энергий  $E_v$  в диапазонах частот 200–900 Гц и 700–2500 Гц соответственно.

На основе перечисленных признаков могут быть сформированы бинарные признаки, характеризующие фонетические свойства звукового сигнала.

Признаками состояний электромагнитного реле могут также служить значения пик-факторов, которые характеризуют высокочастотный диапазон частот исследуемого акустического сигнала. Пик-фактор определяется отношением пикового значения к среднеквадратичному значению частоты колебания реле в определенном диапазоне частот. Пик-фактор реагирует на появление отдельных коротких импульсов, связанных с появлением локального дефекта (залипание реле, искрение контактов и т. п.). Поскольку импульсы короткие, они возбуждают высокочастотные составляющие. Ширина полосы частот для фильтрации сигнала берется равной 1/3 октавы. Необходимо, чтобы частотная полоса захватывала диапазон собственных частот акустического сигнала реле.

С целью выявления наиболее информативной полосы частот для расчета пик-фактора проводилась серия экспериментов, в которых использовалось новое реле и несколько реле с различными дефектами. Проведенные исследования показали, что значения пик-фактора наиболее чувствительны в полосе частот 8,5–12 кГц. В результате обработки экспериментальных данных получены величины пик-факторов, которые могут быть использованы в качестве признаков для классификации дефектов реле.

Использование пик-фактора целесообразно в процессе диагностики локальных дефектов, обусловленных высокочастотными составляющими в сигнале. Общий износ реле характеризуется увеличением среднеквадратического значения колебаний реле, что приводит к уменьшению значения пик-фактора. Последнее необходимо учитывать при формировании диагностических признаков и дальнейшего их использования.

**Выводы.** Предложенные в статье признаки распознавания состояний электромагнитного реле по его воспроизводимому акустическому сигналу позволяют увеличить скорость проведения диагностики, повысить достоверность классификации состояний реле и в целом улучшить систему содержания систем железнодорожной автоматики.

Сформированные признаки классификации могут быть применены при разработке как автономных систем распознавания неисправностей реле, так и в системах диагностики реального времени.

Результаты исследований дают возможность применять классифицированные значения пик-факторов работы реле при акустической диагностике в системе с другими автоматизированными методами диагностики неразрушающего контроля, что значительно может повысить надежность систем железнодорожной автоматики и в целом снизить эксплуатационные затраты.

#### Литература

1. Инструкция по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (ЦШ/4616). – М. : Транспорт, 1989. – 80 с.
2. Типовые нормы времени на проверку и ремонт аппаратуры СЦБ в РТУ Главного управления сигнализации, связи и вычислительной техники : сб. норм. док. ; ред. М. И. Ройтман [нормативное производственно-практическое издание]. – М. : Союзбланкоиздат, 1990. – 56 с.

- 
3. Совершенствование методов обслуживания и эксплуатации устройств СЦБ : [отчет по НИР / ЦНИИ МПС. – 553-У-76-78]. – Свердловск, 1978. – 162 с.
  4. Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2 : [отчет по НИР ДИИТ – 353/3803]. – Днепропетровск, 1983. – 54 с.
  5. Кизяков В. Я. Измерительно-вычислительный комплекс для контроля и измерения параметров электромагнитных реле / В. Я. Кизяков, А. Н. Байдуж // Совершенствование и повышение надежности железнодорожных систем автоматики, телемеханики и связи : межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск, 1990. – С. 41–48.
  6. Разгонов А. П. Стенд для автоматической проверки параметров реле СЦБ / А. П. Разгонов, А. Н. Байдуж // Автоматика, телемеханика и связь. – 1991. – № 2. – С. 13–16.
  7. Грачев Г. Н. Автоматизированный комплекс ремонтно-технологического участка для проверки реле и релейных блоков / Г. Н. Грачев, К. О. Коложный, Ю. А. Липовецкий // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 5. – С. 19–21.
  8. Ljung L. System Identification: Theory for the User [Text] / L. Ljung. – NJ : Prentice-Hall, 1987. – P. 278–280.
  9. Коллакот Р. А. Диагностирование технического оборудования / Коллакот Р. А. ; [пер. с англ.] ; ред. Ю. Н. Мясников. – Л. : Судостроение, 1980.
  10. Контроль шума в промышленности ; [пер. с англ. ] ; ред. Дж. Д. Верба. – Л. : Судостроение, 1981. – 312 с.
  11. Бондаренко Б. М. Методы проверки реле с помощью измерительного диагностического комплекса / Б. М. Бондаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті : зб. наук. праць. – Харків : УкрДАЗТ. – 2009. – № 4. – С. 127–133.
  12. Морозов Г. Л. Віброшумова діагностика електромагнітного реле / Г. Л. Морозов, А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ. – 2010. – № 32. – С. 206–211.
  13. Клюкин П. И. Акустические измерения в судостроении / П. И. Клюкин, А. Е. Колесников. – Л. : Судостроение, 1966.
  14. Растринин Л. Н. Метод коллективного распознавания / Л. Н. Растринин, Р. Х. Эрнштейн. – М. : Энергоатомиздат, 1981.
  15. Быков Н. М. Методы и средства измерения и преобразования информации в системах машинного распознавания речи : дис. ... канд. техн. наук. / Н. М. Быков. – Винница : ВПИ, 1985. – 243 с.
  16. Bykov N. M. Development of effective strategy of pattern recognition / N. M. Bykov, I. V. Kuzmin, A. I. Yakovenko // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4225. – P. 76–83.
  17. Методы автоматического распознавания речи : в 2-х книгах / ред. У. Ли. – М. : Мир, 1983. – Т. 1. – 200 с.
  18. Ковтун В. В. Вибір інформативних ознак в задачі ідентифікації диктора // Матеріали Міжнародної конференції з індуктивного моделювання. – Львів, 20–25 травня 2002 : в 4 т. – Львів : ДНДІ, 2002. – Т. 1. – Ч. 2 – С. 280–287.
  19. Алексеев А. С. Количественный анализ систем признаков и методов идентификации [Электронный ресурс] / А. С. Алексеев, Е. Е. Федоров // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – Режим доступа : [http://www.iai.dn.ua/public/JournalAI\\_2005\\_3/Razdel7/02\\_Alekseev\\_Fedorov.pdf](http://www.iai.dn.ua/public/JournalAI_2005_3/Razdel7/02_Alekseev_Fedorov.pdf).
  20. Рабинер Л. Р. Цифровая обработка речевых сигналов / Л. Р. Рабинер, Р. В. Шафер. – М. : Радио и связь, 1981. – 495 с.
  21. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложение / Марпл-мл. С. Л. ; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1990.
  22. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов ; [пер. с англ. Б. Гоулд] ; ред. Ю. И. Александров. – М. : Мир, 1982. – 848 с.