

Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов

А. П. Семенов¹, И. К. Лакин², И. Ю. Хромов³✉

¹ Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта, г. Омск, Российская Федерация

² АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, Российская Федерация

³ Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉ KhromovIYu@yandex.ru

Резюме

В статье предложен метод анализа информационной эффективности систем технического диагностирования, по которому рассчитана информационная эффективность основных видов систем диагностирования оборудования локомотивов. Системы технического диагностирования по принципу действия соответствуют законам диалектического познания объективной реальности, в том числе понятиям И. Канта «вещь в себе» (ноуменальный мир) и «вещь для нас» (феноменальный мир). Ноуменальный мир обладает энтропией, феноменальный – информацией. Отличие диагностирования заключается в наличии нескольких асимптотически достигаемых уровней знаний – об исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта диагностирования. Таким образом, диагностирование всегда осуществляется в условиях ограниченности информации – наличия энтропии. Системы технического диагностирования должны строиться как автоматизированные цифровые информационные системы с использованием в составе микропроцессоров и (или) компьютеров. Поэтому в работе рассматриваются автоматизированные системы технического диагностирования. Их информативность можно оценить через коэффициент эффективности как отношение информативности таких систем к энтропии объекта диагностирования. При оценке информационной эффективности автоматизированных систем технического диагностирования следует учитывать вероятность наступления отказов и стоимость их устранения (восстановления работоспособности). Разработана соответствующая методика, согласно которой произведена оценка информационной эффективности различных систем диагностирования. Доказано, что эффективность бортовых автоматизированных систем технического диагностирования даже после доработки конструкции локомотива полностью не исключает использование деповских стационарных и переносных систем диагностирования, в том числе автоматизированных реостатных испытаний, вибродиагностики и испытательно-наладочных стендов отдельных узлов локомотивов. Статья полезна тем, что может использоваться в качестве методических рекомендаций при разработке системы технического обслуживания и ремонта сложных систем с оптимизацией применения автоматизированных систем технического диагностирования.

Ключевые слова

информационная энтропия, системы технического диагностирования локомотивов, техническое обслуживание и ремонт, оптимизация систем диагностирования

Для цитирования

Семенов А.П. Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 42–53. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).42-53

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.08.2020, поступила после рецензирования: 22.08.2020, принята к публикации: 05.10.2020

Information entropy of systems of technical diagnostics of locomotives

A. P. Semenov¹, I. K. Lakin², I. Yu. Khromov³✉

¹ The Scientific Research Institute of Technology, Control and Diagnostics of Railway Transport, Omsk, the Russian Federation

² The Railroad Centre of Adaptation of New Developments of Krasnoyarsk Railway, Krasnoyarsk, the Russian Federation

³ The Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, the Russian Federation

✉ KhromovIYu@yandex.ru

Abstract

The article proposes a method of analyzing the information effectiveness of technical diagnostic systems. According to the proposed method, the information efficiency of the main types of locomotive diagnostic systems has been calculated. Systems of technical diagnostics are subject to the laws of dialectical cognition of objective reality, including the concepts of I. Kant “thing in itself” (noumenal world) and “thing for us” (phenomenal world). The noumenal world possesses entropy, the phenomenal world possesses information. The difference in diagnosis lies in the presence of several asymptotically achieved levels of knowledge: the good condi-

tion, performability and correct functioning of the unit under test. Thus, diagnosis is always carried out in conditions of limited information – the presence of entropy. Systems of technical diagnostics should be built as digital information systems using microprocessors and/or computers. Therefore, the article discusses automated systems of technical diagnostics. The information of the automated systems of technical diagnostics can be assessed through the efficiency factor as the ratio of informativity of automated systems of technical diagnostics to the entropy of the diagnostic object. When evaluating the information efficiency of automated systems of technical diagnostics, one should take into account the probability of each failure and the cost of eliminating it (restoring performance). The corresponding methodology was developed, according to which the information efficiency of various diagnostic systems was evaluated. It is proved that the effectiveness of on-board automated systems of technical diagnostics even after modification of the locomotive design does not completely exclude the use of depot stationary and portable diagnostics systems, including automated rheostat tests, vibration diagnostics and test and repairing stands of individual locomotive assemblies. The article's advantages lay in the fact that it can be used as guidelines for developing a system for maintenance and repair of complex systems with optimization of the use of automated systems of technical diagnostics.

Keywords

information entropy, locomotive diagnostic systems, maintenance and repair, optimization of diagnostic systems

For citation

Semenov A. P., Lakin I.K., Khromov I.Yu. Informatsionnaya entropiya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya lokomotivov [Information entropy of systems of technical diagnostics of locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 42–53. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).42-53

Article Info

Received: 15.08.2020, Revised: 22.08.2020, Accepted: 05.10.2020

Методический подход к исследованию информационной эффективности систем технического диагностирования

Задача определения состояния объекта исследования по его внешним признакам стояла еще в Древней Греции и Древнем Риме [1]. Сам термин «диагностика» дословно значит «способный распознавать» ($\delta\iota\alpha\gamma\nu\omega\sigma\tau\iota\kappa\omicron\varsigma$, *diagnosticos*) [2]. Первоначально методы диагностирования, распознавания состояния объекта исследования развивались применительно к медицине, о чем гласит латинская поговорка «*Bene dignoscitur, bene curatur*» – «Хорошо распознается – хорошо лечится». Применительно к технике – «что хорошо диагностируется, то хорошо обслуживается». Главной проблемой диагностики было принятие решения о техническом состоянии объекта (изначально – о здоровье или болезни человека) по ограниченному и не всегда достоверному набору диагностических параметров. Попытка познать непознаваемое (трудно познаваемое) и привела к появлению другой древнегреческой поговорки «Я знаю, что ничего не знаю» (*scio me nihil scire* или *scio me nescire*) – приписывается Сократу или Демокриту.

Наиболее полно проблему познания объективной реальности (ноуменального мира N – «вещи в себе») по ее внешним проявлениям (феноменальному миру F – «вещь для нас») описал в своих трудах великий немецкий философ И. Кант в конце XVIII в., фактически заложив современную теорию познания [3]. В 1781 г. вышел главный труд философа – «Критика чистого разума», в котором он исследует познавательные способности человека. Утверждение И. Канта «мысль без содержания пуста, созерцания без понятий слепы» является основой научно-

практического исследования, в том числе диагностирования, т. е. надо иметь методику и алгоритмы диагностирования на основании объективных данных об объекте исследования: «Чтобы иллюстрировать образно какое-нибудь наивысшее понятие рассудка, мы пользуемся чувственным примером в виде воспроизведения какого-нибудь представления во времени». В немецкой классической философии фактически были заложены основы диалектических методов познания, которые имеют непосредственное отношение к технической диагностике (рис., а): текущий уровень знаний $i_F(t)$ с возможными отклонениями из-за ошибок асимптотически стремится к максимально достижимому уровню знаний I_F , который в силу ограниченности методов и чувств познания может отличаться от максимально возможного уровня знаний I_N на величину Δ . Разницу Δ (между «вещью в себе» и «вещью для нас») можно оценить коэффициентом достижимости знаний о ноуменальном мире $k_{F/N}$.

$$I_F = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n ik\Delta t = \int_1^{\infty} ikdt, \quad (1)$$

$$\Delta = I_N - I_F, \quad (2)$$

$$k_{F/N} = I_F / I_N. \quad (3)$$

Процесс диагностирования соответствует гносеологическому подходу к познанию: диагноз тем точнее, чем дольше и по большему числу параметров диагностируется объект. Однако у любой системы диагностирования есть три предела информа-

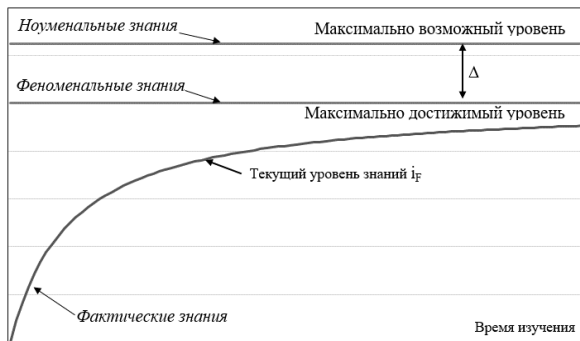
тивности: при проверке исправности Δ_{II} , проверке работоспособности $\Delta_{P/II}$ и проверке правильности функционирования $\Delta_{P/\Phi}$. Тогда знания об объекте диагностирования можно представить формулой

$$I_{II/P/\Phi} = \lim_{n \rightarrow T_{\max}} \sum_{k=0}^{T_{\max}} ik\Delta t = \int_1^{T_{\max}} ikdt, \quad (4)$$

где T_{\max} – максимально допустимое время диагностирования; $I_{II/P/\Phi}$ – информация одного из трех видов диагностирования: I_{II} , I_P , I_{Φ} .

Время проверки правильности функционирования t_{Φ} определяется временем эксплуатации объекта: при $t_{\Phi} \rightarrow \infty$ уровень информации о правильном функционировании I_{Φ} приближается к уровню информации о работоспособности I_P :

$$I_P = \lim_{t_{\Phi} \rightarrow \infty} I_{\Phi} \quad (5)$$



а



б

Рис. 1. Условный график познания ноуменального мира:

а – гносеологическое понимание процесса познания;
б – уровни технического диагностирования

Fig. 1. Conditional schedule of cognition of the noumenal world:

а – epistemological understanding of the process of cognition; б – levels of technical diagnostics

Формула (5) имеет ограничение по интенсивности потока отказов объекта диагностирования. Например, если на момент времени t_1 произошел штатный вход в рекуперацию, то это не значит, что на момент времени $t_1 \gg t_2$ система рекуперации будет исправна из-за наличия интенсивности отказов системы даже в нерабочем режиме.

Аналогично процессу познания эффективность системы диагностирования можно оценить коэффициентом информативности автоматизированной системы технического диагностирования (АСТД) k через отношение знаний о работоспособности I_P объекта к информации об исправности I_{II} , информации о правильном функционировании I_{Φ} к информации о работоспособности I_P :

$$k_{P/II} = I_P / I_{II} \quad (6)$$

$$k_{II/\Phi} = I_{\Phi} / I_P \quad (7)$$

Из приведенных формул видно, что главное отличие процесса диагностирования от общего процесса познания – это ограниченность времени постановки диагноза t максимально допустимым временем диагностирования T_{\max} : $t \leq T_{\max}$. Поэтому дополнительно для оценки системы диагностирования целесообразно ввести коэффициент достижения полной информации о правильном функционировании, работоспособности и исправности за ограниченное время T_{\max} в сравнении с теоретически возможным уровнем информации при неограниченном времени T_{∞} :

$$kt_{II/P/\Phi} = I_{II/P/\Phi}(T_{\max}) / I_{II/P/\Phi}(T_{\infty}) \quad (8)$$

Недостаток формулы (8) – это отсутствие учета стоимости последствий того или иного отказа, т. е. затрат на восстановление работоспособности и потерь перевозочного процесса от отказа. Далее будет предложен алгоритм устранения этого недостатка.

Переход от философских понятий «вещь в себе» (ноуменальный мир) и «вещь для нас» (феноменальный мир) к строгим математическим методам был осуществлен в XX в. в рамках создания теории информации [4] и теории обработки сигналов [5]. Большой вклад в развитие теории информации внесли Г. Найквист, Р. Хартли, К. Шеннон [6] и др. По сути, задача распознавания сигнала, посланного источником, очень близка к задаче диагностирования (она же – задача по феноменальному признаку распознать ноуменальный объект).

Одно из основных понятий теории информации – «энтропия» (информационная энтропия, энтропия Шеннона) – мера неопределенности некоторой си-

стемы [6, 7]. При этом в основу положена логарифмическая мера информации I (мера Хартли):

$$I = K \times \log_2(N), \quad (9)$$

где N – количество символов в используемом алфавите; K – длина сообщения; $M = N^K$ – количество вариантов сообщения.

Рассмотрим три примера применительно к задаче диагностирования.

1. Если у объекта диагностирования два состояния – исправен / неисправен, то количество информации будет равно

$$I_1 = 1 \times \log_2(2) = 1; N = 2^1 = 2; M = 2^1 = 2. \quad (10)$$

2. Если у объекта диагностирования есть 32 элемента, один из которых может быть неисправен, то количество информации будет равно

$$I_2 = 1 \times \log_2(32) = 5; N = 2^5 = 32; M = 32^1 = 32. \quad (11)$$

3. Если у объекта диагностирования есть 32 элемента, три из которых одновременно могут быть неисправны (например, в случае зависимых отказов), то количество информации будет равно

$$I_3 = 3 \times \log_2(32) = 15;$$

$$N = 2^{15} = 32768; M = 32^3 = 1024. \quad (12)$$

В самом общем случае диагноз по итогам диагностирования может содержать информацию: объект исправен (работоспособен, правильно функционирует) или объект неисправен (неработоспособен, неправильно функционирует). В этом случае энтропия диагностики I (мера Хартли по формуле (9)) будет вычисляться как $I = K \times \log_2(N) = 1 \times \log_2(2) = 1$. В задачи диагностирования входит не только задача определения технического состояния, но и локализация места отказа, поэтому состояние «не исправно» распадается на N возможных отказов. Локомотив состоит из оборудования и узлов, которые делятся на детали, каждая из них также может состоять из конечного числа элементов. Однако отдельный элемент может иметь самое разное число неисправностей: в общем случае число неисправных состояний локомотива стремится к бесконечности $N \rightarrow \infty$:

$$I = \log_2(N) \rightarrow \log_2(\infty) \rightarrow \infty \quad (13)$$

Таким образом, число диагнозов теоретически стремится к бесконечности. Поэтому более удобен статистический подход к определению энтропии объекта диагностирования: число вариантов отказов всегда ограничено числом их наличия на практике. При интенсивности отказов, например, в 200 на 1 млн км пробега за время эксплуатации локомотива (40 лет) у него произойдет $T = 4,8$ млн км 200 отк. / млн км = 960 отказов.

В этом случае энтропия составит $H_\Sigma = \log_2(960) = 9,9$. Если бортовая система диагностирования будет распознавать 700 из них, то

информативность системы технического диагностирования (СТД) будет вычисляться как $I_{ACTD} = \log_2(760) = 9,45$, а коэффициент эффективности СТД – по формуле (3) составит $k_{F/N} = I_{ACTD} / H_\Sigma = 9,45 / 9,9 = 0,954$. Даже если все отказы будут разными, то на парке в 3 тыс. секций теоретически возможно до 3 млн видов отказов с энтропией $H_\Sigma = \log_2(3000000) = 21,5$. На практике число видов отказов существенно меньше. Таким образом, задача исчисления энтропии технического состояния локомотива для АСТД решается.

Вероятность возникновения тех или иных видов отказов может существенно отличаться, поэтому приведенные расчеты не будут отражать реальную эффективность АСТД. Мера Хартли является частным случаем (для равновероятных событий) широко распространенной формулы Шеннона [8], согласно которой энтропия технического состояния локомотива $H_\Sigma(N)$ и количество информации АСТД I_{ACTD} («информативность источника», приходящаяся на один сигнал) рассчитывается по формуле:

$$H(A) = I = - \sum_{i=0}^N P_i \times \log(p_i), \quad (14)$$

где p_i – вероятность i -го события при условии, что

$$\sum_{i=0}^N P_i \leq 1.$$

Понятие количества информации I применительно к системам диагностирования позволяет оценить эффективность той или иной системы диагностирования. Приведем несколько примеров.

1. Система безотказна – есть одно событие «исправное состояние» ($i = 1$), вероятность наступления которого $p_i = 1$, тогда объем полезной информации равен нулю $I_1 = 1 \times \log_2(1) = 1 \times 0 = 0$. Эффективность СТД $k_{ACTD} = 0$.

2. Система за заданный период эксплуатации исправна с вероятностью $p_0 = 0,8$, при этом могут наступить 4 отказа с вероятностью $p_1 = 0,1$, $p_2 = 0,05$, $p_3 = 0,03$, $p_4 = 0,02$. Тогда $I_2 = 0,8 \cdot 0,32 + 0,1 \cdot 3,32 + 0,05 \cdot 4,32 + 0,03 \cdot 5,06 + 0,02 \cdot 5,64 = 1,07$. Если, например, АСТД распознает все состояния, кроме последнего, то эффективность АСТД будет равна $k_{ACTD} = 0 = 0,898 / 1,07 = 0,894$.

3. Если по предыдущему примеру в расчете не учитывать исправное состояние, тогда: $p_1 = 0,5$, $p_2 = 0,25$, $p_3 = 0,15$, $p_4 = 0,1$. Тогда $I_3 = 0,5 \cdot 1 + 0,25 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2,74 + 0,1 \cdot 3,32 = 1,74$, а $k_{ACTD} = 0 = 1,411 / 1,743 = 0,809$.

Следовательно, так как вероятность исправного состояния много больше суммы вероятностей неисправных состояний, то информативность систем диагностирования лучше оценивать без учета исправного состояния. Это соответствует утверждению теории информации, что максимальная информативность (максимальная энтропия) наступает при равновозможности всех возможных исходов.

Итак, понятия «энтропия» и «информативность» следует использовать при оценке эффективности систем диагностирования без учета вероятности исправного состояния.

При техническом диагностировании (в том числе согласно ГОСТ [9]) надежность локомотива оценивается трудоемкостью и материалоемкостью восстановления работоспособного состояния C , поэтому формулу Шеннона в исходном виде использовать не целесообразно. Рассмотрим пример (табл. 1). Пусть имеется объект диагностирования, у которого вероятность исправного состояния за заданный период эксплуатации $P_0 = 0,8$ и имеется семь отказов различной вероятности появления $P_1 - P_7$. Тогда в примере информативность системы по формуле Шеннона составит $I = 1,115$.

Предлагается учесть стоимость восстановления работоспособности по каждому отказу i (см. табл. 1) $C_i \in [C_0, C_7]$ как произведение вероятности отказа на приведенную стоимость восстановления работоспособности по формуле

$$P_{C_i} = P_i \times C_i / S, \quad (15)$$

где $S = \sum_0^7 C_i$ – суммарная стоимость ремонтов (15);

$$\sum_0^7 P_i \times C_i / S = 1. \quad (16)$$

При расчете по предложенной формуле (15) в рассмотренном примере энтропия системы возрастает с $H_\Sigma = 1,115$ до $H_\Sigma = 2,466$. Если в примере (см. табл. 1) АСТД распознает, например, отказы с 4 по 7, то ее информативность будет равна:

– по формуле Шеннона

$$I_{АСТД} = 0,07 + 0,07 + 0,02 + 0,02 = 0,176,$$

$$k_{АСТД} = 0,176 / 1,115 = 0,157;$$

– по формуле (14) –

$$I_{АСТД} = 0,22 + 0,50 + 0,38 + 0,53 = 1,63,$$

$$k_{АСТД} = 0,1627 / 2,466 = 0,66.$$

Теоретически низкая информативность СТД ($k_{АСТД} = 0,157$) оказывается существенно выше ($k_{АСТД} = 0,659$), так как стоимость восстановления после отказов 4–7 высокая. Таким образом, при расчете информативности по предложенной формуле эффективность СТД будет оцениваться более объективно, так как будет учитываться стоимость восстановления системы.

В качестве цены восстановления работоспособности целесообразно брать не цену произошедшего отказа C_{ni} , а стоимость более опасного отказа C_{oi} , который удалось предотвратить, за вычетом стоимости устранения предотказа:

$$C = C_{oi} - C_{ni}. \quad (17)$$

Тогда эффективность СТД можно оценить как отношение информативности СТД $I_{АСТД}$ к полной энтропии H_Σ .

Аналогичный подход можно было реализовать, если рассмотреть вероятность появления отказа i и его стоимость C_i как два независимых источника информации по формуле теории информации [4]:

$$H(i \cap C_i) = H(i) + H(C_i). \quad (18)$$

Далее приведены результаты расчета по приведенной формуле (табл. 2):

$$I_\Sigma = I_{pi} + I_{C_i} = 1,115 + 1,464 = 2,579. \quad (19)$$

Результаты расчета отличаются.

Вариант 1:

$$I_i = P_i \times C_{si} \times \log_2(P_i \times C_{si}) =$$

Таблица 1. Пример определения информативности системы технического диагностирования
Table 1. An example of determining the information content of a technical diagnostics system

| N | P | Log2 | -P×Log2 | C | P·C | P·C/S | log ₂ | -P×C×log ₂ |
|---|--------|--------|---------|--------|-----|-------|------------------|-----------------------|
| 0 | 0,8 | -0,322 | 0,2575 | 10 | 8 | 0,040 | -4,63 | 0,187 |
| 1 | 0,1 | -3,322 | 0,3322 | 100 | 10 | 0,051 | -4,31 | 0,218 |
| 2 | 0,05 | -4,322 | 0,2161 | 200 | 10 | 0,051 | -4,31 | 0,218 |
| 3 | 0,025 | -5,322 | 0,1330 | 400 | 10 | 0,051 | -4,31 | 0,218 |
| 4 | 0,01 | -6,644 | 0,0664 | 1 000 | 10 | 0,051 | -4,31 | 0,218 |
| 5 | 0,01 | -6,644 | 0,0664 | 5 000 | 50 | 0,253 | -1,99 | 0,501 |
| 6 | 0,0025 | -8,644 | 0,0216 | 10 000 | 25 | 0,126 | -2,99 | 0,377 |
| 7 | 0,0025 | -8,644 | 0,0216 | 30 000 | 75 | 0,379 | -1,40 | 0,531 |
| Σ | 1 | – | 1,1150 | 46 710 | 198 | 1 | – | 2,466 |

$$= P_i \times C_{si} \times \log_2(P_i) + P_i \times C_{si} \times \log_2(C_{si}) \quad (20)$$

Вариант 2:

$$I_i = P_i \times \log_2(P_i) + C_{si} \times \log_2(C_{si}). \quad (21)$$

Следует выбрать один из двух вариантов – формулы (20) и (21).

Таблица 2. Расчет информативности системы технического диагностирования по двум независимым процессам
Table 2. Calculation of the informativity of the technical diagnostics system for two independent processes

| N | P | I_{pi} | C | C/S | I_{Ci} |
|----------|--------|----------|--------|---------|----------|
| 0 | 0,8 | 0,2575 | 10 | 0,00021 | 0,003 |
| 1 | 0,1 | 0,3322 | 100 | 0,00214 | 0,019 |
| 2 | 0,05 | 0,2161 | 200 | 0,00428 | 0,034 |
| 3 | 0,025 | 0,1330 | 400 | 0,00856 | 0,059 |
| 4 | 0,01 | 0,0664 | 1 000 | 0,02141 | 0,119 |
| 5 | 0,01 | 0,0664 | 5 000 | 0,10704 | 0,345 |
| 6 | 0,0025 | 0,0216 | 10 000 | 0,21409 | 0,476 |
| 7 | 0,0025 | 0,0216 | 30 000 | 0,64226 | 0,410 |
| Σ | 1 | 1,1150 | 46 710 | 1 | 1,464 |

По свойствам формулы Шеннона максимальная информативность I получается при равновероятности событий и одинаковой стоимости восстановления работоспособности. При существенном росте стоимости одного из отказов i получаем, что в первом варианте информативность системы стремится к информативности этого отказа $I_{\Sigma} \rightarrow I_i$, а во втором – к информативности по вероятности $I_{\Sigma} \rightarrow I_p$. В рассмотренном примере – это $I_p = 1,115$.

$$I_{\Sigma} = \lim_{C_i \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=0}^N (P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right) \times \log(P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right))) \right) = P_i \times \log(P_i), \quad (22)$$

$$I_{\Sigma} = \lim_{C_i \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=0}^N (P_i \times \log(P_i) + \left(\frac{C_i}{S}\right) \times \log\left(\frac{C_i}{S}\right)) \right] = \sum (P_i \times \log(P_i)) = I_p. \quad (23)$$

В первом случае при существенной разности стоимости восстановления информативность СТД падает, что логично: высокая стоимость отдельно взятого отказа может свидетельствовать о неравномерном разбиении объекта диагностирования на элементы. Во втором случае информативность системы становится независимой от стоимости, что не соответствует решаемой задаче.

Итак, эффективность СТД k по формуле (8) следует оценивать как отношение информативности СТД к общей энтропии технического состояния объекта с учетом стоимости восстановления системы:

$$k_{АСТД} = I_{АСТД} / I_{\Sigma} = \left[\sum_{i=0}^N z_i (P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right) \times \log(P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right))) \right] / \left[\sum_{i=0}^N z_i \times (P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right) \times \log(P_i \times \left(\frac{C_i}{S}\right))) \right], \quad (24)$$

где $z_i = \{0,1\}$ – наличие в СТД диагностирования i -го отказа.

В предлагаемой формуле стоимость восстановления C_i можно брать в абсолютных и относительных значениях. Рассмотрим пример. Пусть СТД диагностирует микропроцессорную систему управления (МСУ), состоящую из 5 однотипных входных плат, микропроцессорной платы и трех выходных

Таблица 3. Пример расчета эффективности системы технического диагностирования
Table 3. An example of calculating the effectiveness of the technical diagnostics system

| N | Отказ | P | I_p | C | C_i | z_i | I_{Σ} | $I_{АСТД}$ |
|--|-----------|-------|-------|------|-------|-------|--------------|------------|
| 0 | Исправен | 0,75 | 0,311 | 0,01 | 0,004 | 1 | 0,02684 | 0,02684 |
| 1 | Процессор | 0,1 | 0,332 | 1 | 0,433 | 0 | 0,19610 | 0,00000 |
| 2 | Вход 1 | 0,024 | 0,129 | 0,2 | 0,087 | 1 | 0,01852 | 0,01852 |
| 3 | Вход 2 | 0,024 | 0,129 | 0,2 | 0,087 | 1 | 0,01852 | 0,01852 |
| 4 | Вход 3 | 0,024 | 0,129 | 0,2 | 0,087 | 1 | 0,01852 | 0,01852 |
| 5 | Вход 4 | 0,024 | 0,129 | 0,2 | 0,087 | 1 | 0,01852 | 0,01852 |
| 6 | Вход 5 | 0,024 | 0,129 | 0,2 | 0,087 | 1 | 0,01852 | 0,01852 |
| 7 | Выход 1 | 0,01 | 0,066 | 0,1 | 0,043 | 1 | 0,00484 | 0,00484 |
| 8 | Выход 2 | 0,01 | 0,066 | 0,1 | 0,043 | 1 | 0,00484 | 0,00484 |
| 9 | Выход 3 | 0,01 | 0,066 | 0,1 | 0,043 | 1 | 0,00484 | 0,00484 |
| Σ | – | 1 | 1,488 | 2,31 | 1 | – | 0,330 | 0,134 |
| Коэффициент эффективности системы технического диагностирования $k_{АСТД} = I_{АСТД} / I_{\Sigma}$ | | | | | | | 0,406 | |

плат. Самый дорогой среднестатистический ремонт у микропроцессорной платы, который принимается за 1. Если считать, что СТД распознает все отказы, кроме отказа микропроцессорной платы, то для вероятностей отказов (табл. 3) эффективность СТД будет равна 0,406.

Если привести стоимость в абсолютных единицах (например, умножить на среднестатистическую стоимость ремонта микропроцессорной платы 5 600 руб.), то данные об информативности и эффективности СТД не изменятся.

Ранее отмечалось, что высокая вероятность исправного состояния снижает информативность системы. При использовании формулы (23) это негативное свойство нивелируется за счет низкой стоимости сопровождения исправного состояния. Принимать стоимость исправного состояния равным нулю нельзя из-за отсутствия логарифма нуля. Если бы СТД, наоборот, распознавала только отказ микропроцессорной платы, то ее эффективность была бы равна 0,676.

В предлагаемой методике оценки информационной эффективности АСТД для оборудования k выполняется анализ его конструкции z_k , входных

X_k и выходных Y_k сигналов и статистики отказов с учетом стоимости их устранения. В результате рассчитывается диагностическая энтропия $H(k)$ оборудования k по предложенным и обоснованным формулам (22)–(24). Далее производится анализ существующих видов АСТД $j \in J$ этого оборудования. Отдельно рассматриваются встроенные, бортовые и стационарные АСТД k и их информативность I_{kj} по отношению к оборудованию k . В результате определяется информативность АСТД по предложенному коэффициенту информативности по формуле 8:

$$K_{АСТД_{kj}} = I_{kj} / H(k).$$

Также устанавливается общая информативность всех АСТД k -го оборудования $K_{АСТД_k}$ по формуле

$$K_{АСТД_k} = I_k / H(k).$$

После обработки данных по каждому виду оборудования определяется общая информативность систем диагностирования локомотива $K_{АСТД_0}$ по формуле

$$K_{АСТД_0} = I_0 / H(0).$$

Таблица 4. Информативность МСУД

Table 4. Information content of the microprocessor control and diagnostic system

| N | Диагностирование | λ | P_i | C_i | C_{ij} | z_i | H_i | $I_{АСТД}$ |
|---|---------------------------|-----------|--------|-------|----------|-------|--------|------------|
| 0 | Работоспособность | – | 0,3679 | 0,01 | 0,0011 | 0,9 | 0,0047 | 0,0042 |
| 1 | Механическое оборудование | 2,2 | 0,1042 | 1,20 | 0,1362 | 0,1 | 0,0871 | 0,0087 |
| 2 | ТЭД | 2,06 | 0,0979 | 3,00 | 0,3405 | 0,31 | 0,1635 | 0,0507 |
| 3 | ВИП и МСУД | 1,88 | 0,0897 | 0,70 | 0,0795 | 0,8 | 0,0508 | 0,0407 |
| 4 | Электрооборудование | 9,74 | 0,3855 | 1,00 | 0,1135 | 0,5 | 0,1975 | 0,0988 |
| 5 | Вспом. машины | 0,32 | 0,0159 | 1,10 | 0,1249 | 0,8 | 0,0178 | 0,0142 |
| 6 | Тормоза и пневматика | 3,36 | 0,1546 | 0,50 | 0,0568 | 0,7 | 0,0600 | 0,0420 |
| 7 | Приборы безопасности | 0,38 | 0,0188 | 0,50 | 0,0568 | 0,9 | 0,0105 | 0,0095 |
| 8 | Вентиляция | 0,06 | 0,0030 | 0,80 | 0,0908 | 0,5 | 0,0032 | 0,0016 |
| Σ | – | – | – | – | 1 | – | 0,595 | 0,270 |
| Коэффициент эффективности системы технического диагностирования $k_{АСТД_\Sigma}$ | | | | | | | 0,454 | |

Примечание. λ_i – интенсивность отказов (число отказов на 1 млн км). P_i – вероятность наступления отказа между двумя плановыми заходами в локомотивное депо на ремонт в объеме ТР-1 (50 тыс. км), для экспоненциального закона распределения случайной величины – $P_i = e^{-\lambda \times a} - e^{-\lambda \times b} = e^{-\lambda \times 0,00} - e^{-\lambda \times 0,05} = 1 - e^{-\lambda \times 0,05}$ (30), где a и b – начало и конец участка наблюдения при $a = 0$ млн км, $b = 0,05$ млн км. Вероятность исправного состояния P_0 соответствует вероятности того, что ни один отказ не наступит – $P_0 = (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times (1 - P_2) \times \dots = \prod (1 - P_i)$ (31). C_i – относительно ТЭД стоимость восстановления работоспособности. C_{ij} – удельная стоимость восстановления работоспособности – $\sum C_{ij} = 1$. z_i – способность АСТД распознать предотказ – $z_i \in [0,1]$. H_i и H_Σ – энтропия отказа и всех ожидаемых отказов. $I_{АСТД_i}$ и $I_{АСТД}$ – информативность отказа и АСТД в целом. $k_{АСТД}$ – коэффициент информативности АСТД как отношение информативности АСТД и энтропии системы – $k_{АСТД} = I_{АСТД} / H_\Sigma$.

Информативность бортового диагностирования

Бортовые АСТД являются встроенными по отношению к локомотиву в целом и внешними по отношению к каждому виду оборудования локомотива. Бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) осуществляют автоматический опрос имеющихся на локомотиве датчиков, анализируют параметры и динамику их изменения на допустимость, диагностируют техническое состояние локомотива и наличие рисков наступления отказа (предотказные состояния). В том или ином виде системы диагностирования имели место еще на паровозах. В современном понимании диагностика появилась на электровозах серии ВЛ80Р [10, 11], имеющих полностью электронную систему управления на базе силового тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) [12] и электронного блока управления БУ-ВИП [11, 13–15]. Именно опыт проектирования и эксплуатации ВЛ80Р и ВЛ85 позволил создать комплексную систему управления и бортового технического диагностирования МСУД электровозов переменного тока серий ЭС5К.

В статье посчитана информативность современной бортовой АСТД электровозов переменного тока серии ЭС5К. В расчетах приняты статистические данные компании «Кловер» [16]. Исходные данные и результаты расчета приведены далее (табл. 4).

Таким образом, вероятность работоспособности ЭС5К между двумя ТР-1 по исходным данным [16] и результатам расчета составляет всего 37 %, что однозначно свидетельствует о недостаточности существующей системы технического обслуживания и ремонта. Эффективность бортовой АСТД электровозов серий ЭС5К достаточно низкая ($k_{АСТД\Sigma} = 0,45$), т. е. необходимо наличие деповских переносных и стационарных АСТД.

Информативность аппаратно-программного комплекса «Борт»

Эффективность диагностической функциональности МСУД можно повысить за счет дополнительного микропроцессорного оборудования локомоти-

вов. Для тепловозов – это системы учета топлива: аппаратно-программный комплекс «Борт» (АПК «Борт»), АСК ВИС, РПДА и др.

Рассмотрим пример. АПК «Борт» [17] разработки Научно-исследовательского института технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта (НИИТКД) [18] предназначен для диагностирования и контроля теплотехнического состояния дизель-генераторных установок (ДГУ) тепловозов серии ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ, ТЭМ2, ТЭМ3, ТЭМ18 и магистральных тепловозов 2ТЭ10, 2ТЭ116.

В группе компаний «ЛокоТех» накоплен большой опыт использования АПК «Борт» для диагностирования технического состояния ДГУ тепловозов серии ТЭ10МК на северном широтном ходе Восточного полигона (БАМ) [19]. АПК «Борт» оказался незаменимой бортовой АСТД для тепловозов старых серий. Результаты расчета эффективности диагностической функциональности АПК «Борт» приведены в таблице 2.6 [19]. В качестве исходной информации взяты данные компании «Кловер» [16].

Итак, энтропия ДГУ $H = 0,758$ существенно выше, чем у электровоза в целом (см. табл. 4), что связано с низкой его надежностью. Таким образом, актуальность бортовой АСТД для ДГУ – самая актуальная задача. АПК «Борт» обладает диагностической эффективностью $k_{АСТД} = 0,571$, что выше, чем диагностическая эффективность МСУД. Диагностическую информативность АПК «Борт» можно повысить за счет установки дополнительных датчиков, в том числе датчиков виброускорения в различных частях ДГУ.

Информативность автоматизированных реостатных испытаний

Для сравнения с бортовой системой диагностирования ДГУ произведен расчет эффективности диагностирования стационарной автоматизированной системы реостатных испытаний на примере системы «Кипарис» производства НИИТКД [18].

Таблица 5. Информативность Комплекса «Кипарис»

Table 5. Informativity of the Kiparis Complex

| N | Диагностирование | λ | P_i | C_i | $C_{i/}$ | z_i | H_i | $I_{АСТД}$ |
|--|---------------------------|-----------|--------|-------|----------|-------|--------|------------|
| 0 | Работоспособность | – | 0,1353 | 0,03 | 0,0012 | 0,95 | 0,0020 | 0,0019 |
| 1 | Система охлаждения | 17,78 | 0,5889 | 1,00 | 0,0400 | 0,95 | 0,1273 | 0,1209 |
| 2 | Масляная система | 6,22 | 0,2674 | 2,50 | 0,0999 | 0,95 | 0,1396 | 0,1326 |
| 3 | Турбокомпрессор | 5,33 | 0,2341 | 4,00 | 0,1598 | 0,9 | 0,1773 | 0,1596 |
| 4 | Топливная аппаратура | 4,44 | 0,1993 | 3,00 | 0,1199 | 0,9 | 0,1287 | 0,1158 |
| 5 | Цилиндро-поршневая группа | 0,89 | 0,0435 | 4,00 | 0,1598 | 0,9 | 0,0498 | 0,0448 |
| 6 | Система управления ДГУ | 4,44 | 0,1993 | 0,50 | 0,0200 | 0,9 | 0,0317 | 0,0286 |
| 7 | Механическая подсистема | 0,89 | 0,0435 | 10,00 | 0,3995 | 0,5 | 0,1016 | 0,0508 |
| Σ | – | – | – | – | 1 | – | 0,758 | 0,655 |
| Коэффициент эффективности системы технического диагностирования $k_{АСТД\Sigma}$ | | | | | | | 0,864 | |

Комплекс производственный автоматизированных реостатных испытаний типа «Кипарис-5» (далее – Комплекс) предназначен для проведения автоматизированных реостатных испытаний ДГУ тепловозов с диагностированием их технического состояния.

Комплекс представляет собой аналого-цифровую информационно-измерительную систему, управляющую нагрузочным реостатом и ДГУ тепловоза с непрерывным мониторингом в режиме online тока нагрузки, напряжения и мощности тягового генератора, частоты вращения коленчатого вала дизеля при установленной позиции контроллера машиниста, температуры воды и масла, давления масла и топлива, с возможностью аналитической обработки и длительного хранения информации. Далее приведен расчет информативности Комплекса (табл. 5).

Таким образом, возможности Комплекса существенно выше – $k_{\text{КИПАРИС}} = 0,864$ (АПК «Борт» $k_{\text{БОРТ}} = 0,571$), но его применение требует дополнительных затрат ресурсов и времени. Коэффициент эффективности Комплекса $k_{\text{КИПАРИС}} \ll 1$, поэтому остается необходимость в стендовом оборудовании для наладки и испытания отдельных узлов ДГУ.

Цифровой локомотив

Другой распространенный вид бортовой АСТД – это система автоведения УСАВП [20] производства «АВП Технология» [21]. Для автоведения поезда УСАВП, как и любая бортовая МСУ, опрашивает датчики, наличием которых как раз и определяется информативность системы.

Диагностической функциональностью обладают и приборы безопасности, прежде всего Клуб-У [22], а также системы Блок, ЕСМ БС и др. Дополнительная информативность достигается в случае применения технологии «Электронный бортовой журнал формы ТУ-152» [23]. Также следует учесть наличие встроенных систем диагностирования в оборудова-

нии локомотивов, например, в ВИП, преобразователе собственных нужд и др. Комплексное использование диагностической функциональности всех бортовых микропроцессорных систем может существенно повысить информативность бортовой АСТД.

Ниже приведен расчет возможной информативности бортовой АСТД (табл. 6). При расчете учитывался зарубежный опыт бортового диагностирования [1, 24, 19]. Главное отличие от ранее приведенных данных (см. табл. 4) – возросшее значение z_i .

Следовательно, информативность бортовой АСТД можно повысить с существующего $k_{\text{АСТД}_\Sigma} = 0,454$ до теоретически допустимого $k_{\text{АСТД}_\Sigma} = 0,777$. Полностью отказаться от деповских АСТД невозможно. Для достижения $k_{\text{АСТД}_\Sigma} = 0,777$ необходимо обеспечить измерение следующих параметров оборудования локомотива (без учета ДГУ):

- виброускорение, виброскорость, виброперемещение основных узлов локомотива (ДГУ, буксы, экипажная часть, ТЭД щеткодержатели и др.);
- температура нагрева основных узлов локомотива;
- мощность;
- уровень и качество смазки;
- токи якоря, обмотки возбуждения каждого ТЭД;
- напряжение на каждом ТЭД;
- частота вращения якоря (ротора) каждой электрической машины;
- искрение на коллекторе;
- сила нажатия щеткодержателей;
- биение коллектора (через виброускорения);
- скорость срабатывания электрических аппаратов;
- сила нажатия электрических аппаратов;
- сопротивление изоляции;
- количество циклов включения – отключения

Таблица 6. Возможная информативность УСАВП с МСУД

Table 6. Possible informativity of the universal system of the automatic train operation with the microprocessor control and diagnostic system

| N | Диагностирование | λ | P_i | C_i | C_{il} | z_i | H_i | $I_{\text{АСТД}}$ |
|--|---------------------------|-----------|--------|-------|----------|-------|--------|-------------------|
| 0 | Работоспособность | – | 0,3679 | 0,01 | 0,0011 | 0,95 | 0,0047 | 0,0045 |
| 1 | Механическое оборудование | 2,2 | 0,1042 | 1,20 | 0,1362 | 0,5 | 0,0871 | 0,0436 |
| 2 | ТЭД | 2,06 | 0,0979 | 3,00 | 0,3405 | 0,8 | 0,1635 | 0,1308 |
| 3 | ВИП и МСУД | 1,88 | 0,0897 | 0,70 | 0,0795 | 0,9 | 0,0508 | 0,0458 |
| 4 | Электрооборудование | 9,74 | 0,3855 | 1,00 | 0,1135 | 0,8 | 0,1975 | 0,1580 |
| 5 | Вспомогательные машины | 0,32 | 0,0159 | 1,10 | 0,1249 | 0,8 | 0,0178 | 0,0142 |
| 6 | Тормоза и пневматика | 3,36 | 0,1546 | 0,50 | 0,0568 | 0,9 | 0,0600 | 0,0540 |
| 7 | Приборы безопасности | 0,38 | 0,0188 | 0,50 | 0,0568 | 0,9 | 0,0105 | 0,0095 |
| 8 | Вентиляция | 0,06 | 0,0030 | 0,80 | 0,0908 | 0,7 | 0,0032 | 0,0023 |
| Σ | – | – | – | – | 1 | – | 0,595 | 0,463 |
| Коэффициент эффективности системы технического диагностирования $k_{\text{АСТД}_\Sigma}$ | | | | | | | 0,777 | |

Таблица 7. Информативность вибродиагностики КМБ
Table 7. Informative value of the vibrodiagnostics of the wheel motor block

| N | Диагностирование | λ | P_i | C_i | $C_{i/}$ | z_i | H_i | I_{ACTD} |
|--|-------------------|-----------|--------|-------|----------|-------|--------|------------|
| 0 | Работоспособность | – | 0,7788 | 0,01 | 0,0009 | 0,98 | 0,0072 | 0,0071 |
| 1 | Шестеренки | 1 | 0,0488 | 1,00 | 0,0884 | 0,95 | 0,0339 | 0,0322 |
| 2 | БЗК | 0,75 | 0,0368 | 2,00 | 0,1768 | 0,95 | 0,0473 | 0,0449 |
| 3 | МЯП | 1,25 | 0,0606 | 2,00 | 0,1768 | 0,98 | 0,0701 | 0,0687 |
| 4 | Щёткодержатели | 0,5 | 0,0247 | 0,50 | 0,0442 | 0,8 | 0,0107 | 0,0086 |
| 5 | Коллектор | 0,25 | 0,0124 | 3,00 | 0,2653 | 0,9 | 0,0272 | 0,0245 |
| 6 | МОП | 0,5 | 0,0247 | 1,00 | 0,0884 | 0,9 | 0,0193 | 0,0174 |
| 7 | Буксы | 0,5 | 0,0247 | 1,00 | 0,0884 | 0,9 | 0,0193 | 0,0174 |
| 8 | Подвеска | 0,25 | 0,0124 | 0,80 | 0,0707 | 0,5 | 0,0089 | 0,0045 |
| Σ | – | – | – | – | 1 | – | 0,244 | 0,225 |
| Коэффициент эффективности системы технического диагностирования $k_{\text{Прогноз}}$ | | | | | | | 0,923 | |

(ресурс);

- коммутируемый электрическими аппаратами ток;
- температура и давление воздушных потоков;
- сила нажатия в тормозной системе;
- динамика изменения силы нажатия в тормозной системе;
- объем торможения;
- длина и скорость выхода штока;
- динамика изменения давления в тормозной системе.

Параметры для диагностирования ДГУ являются типовыми для всех ДГУ промышленного применения и отдельно не приводятся.

Выше уже указывалось, что одним из источников бортовой диагностической информации был и остается сам машинист. Несмотря на необходимость автоматизации учета замечаний машиниста [23] пока основным является бумажный бортовой журнал формы ТУ-152. В настоящее время за машинистом остаются следующие функции диагностирования, которые в дальнейшем должны быть автоматизированы:

- толчки, вибрация, другие динамические аномалии;
- посторонние запахи, вспышки; условия возникновения срабатываний защит, в том числе быстрого действующего выключателя;
- снижение мощности привода;
- повышенное боксование.

Вибродиагностирование

Как было показано, отсутствие мониторинга виброускорений снижает эффективность бортовых АСТД. Комплекс оперативного диагностирования «Прогноз» (далее – Прогноз) производства НИИТКД [18] диагностирует механическое состояние узлов локомотивов путем измерения электрических сигналов датчиков вибрации, измерения частоты вращения узлов и механизмов. Комплексная математическая обработка результатов измерения в различных режимах позволяет провести диагностику. Далее приведен расчет эффективности Прогноза (табл. 7).

Итак, информативность деповской АСТД ($k_{\text{Прогноз}} = 0,923$) существенно выше бортовых АСТД, поэтому можно считать диагностирование проверкой исправности, а не работоспособности. Дальнейшее совершенствование комплекса Прогноз возможно как за счет повышения класса вибродатчиков и их числа, так и за счет совершенствования математических алгоритмов диагностирования.

Заключение

Системы технического диагностирования подчиняются законам диалектического познания объективной реальности. Отличие заключается в наличии нескольких асимптотически достигаемых уровнях знаний: об исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта диагностирования. Таким образом, диагностирование всегда осуществляется в условиях ограниченности информации.

Системы диагностирования должны строиться как цифровые информационные системы, при этом автоматизированные системы – с использованием современных микропроцессоров и (или) компьютеров. Поэтому следует говорить не об АСТД, а об АСТД.

Информативность АСТД можно оценить через коэффициент эффективности АСТД как отношение информативности АСТД к энтропии объекта диагностирования. При оценке эффективности АСТД следует учитывать вероятность наступления каждого из отказов и стоимость его устранения (восстановления работоспособности). Разработана соответствующая методика, согласно которой произведена оценка информационной эффективности различных систем диагностирования.

Эффективность бортовых АСТД даже после доработки конструкции локомотива полностью не исключает использование деповских стационарных и переносных систем диагностирования, в том числе автоматизированных реостатных испытаний, вибродиагностики и испытательно-наладочных стендов отдельных узлов локомотивов.

Список литературы

1. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М. : РУТ (МИИТ), 2016. 211 с.
2. Иностранные слова в русском языке [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikijournal.org/wiki/Иностранные_слова_в_русском_языке (дата обращения 17.08.2020).
3. Асмус В.Ф. Иммануил Кант. М. : Высшая школа, 2005. 439 с.
4. Информации теория // Энциклопедия Кругосвет : сайт URL: https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/matematika/INFORMATSII_TEORIYA.html (дата обращения 17.08.2020).
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. М. : Бином-Пресс, 2006 г. 656 с.
6. Теорема Шеннона – Хартли // Википедия : сайт. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона_—_Хартли (дата обращения 17.08.2020).
7. Энтропия и количество информации [Электронный ресурс]. URL: <http://victor-safronov.ru/systems-analysis/lectures/zhivickaya/12.html> (дата обращения 17.08.2020).
8. Информационная энтропия // Loginom : сайт. URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/inform-entropy.html> (дата обращения 17.08.2020).
9. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. Введ. 2017-03-01. М. : Изд-во стандартов, 2015. 30 с.
10. Раков В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956–1975 гг.). М. : Транспорт, 1999. 443 с.
11. Шабалин Н.Г., Горбань В.Н., Донской А.Л. Электронное оборудование электровоза ВЛ80Р: ремонт и техническое обслуживание. М. : Транспорт, 1984. 183 с.
12. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-4000М-УХЛ2. Технические условия ТУ16-91 ИЖРФ 435 511.021 ТУ.
13. Иньков Ю.М. Феоктистов В.П., Шабалин Н.Г. Диагностирование локомотивов методом статистического последовательного анализа энергозатрат по поездкам // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : тр. первой междунар. науч.-практ. конф. М. : ТМХ-Сервис, 2014. С. 158–160.
14. Иньков Ю.М., Феоктистов В.П., Шабалин Н.Г. Эксплуатация и ремонт электроподвижного состава магистральных железных дорог : учеб. пособ. М. : Изд-во МЭИ, 2011. 384 с.
15. Шабалин Н.Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1999. 171 с.
16. Узлы и агрегаты локомотивов с указанием существующих данных телеметрии и необходимых для оценки технического состояния и вероятности отказа. Аналитический анализ. Казань : Кlover, 2020.
17. Аппаратно-программный комплекс «БОРТ». Омск : НИИТКД, 2005. 604 с.
18. Аппаратно-программный комплекс «БОРТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://niitkd.com/locomotivnoe/ekspluatatsiya/apparatno-programmnyy-kompleks-bort-detail> (дата обращения 17.08.2020).
19. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой и др. М. : Локомотивные Технологии, 2015. 212 с.
20. Пособие машинисту по эксплуатации систем автоведения и РПДА пассажирских электровозов. М. : АВП Технологии, 2012. 119 с.
21. АВП Технологии. : официальный сайт. URL: <https://www.avpt.ru/> (дата обращения 17.08.2020).
22. Розенберг Е.Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов : дис. ... д-ра техн. наук. М. : (МИИТ) МПС РФ. 317 с.
23. Информационно-аналитическая система АСУ ЗМ [Электронный ресурс]. URL: <http://scbist.com/wiki/25678-asuzm.html> (дата обращения: 17.08.2015).
24. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М. : МИИТ, 2017. 180 с.

References

1. Lakin I.I. Monitoring technical condition of locomotives according to data of hardware-software complexes. Ph.D. (Engineering) diss., MIIT Publ., 2016, 211 p.
2. Inostrannye slova v russkom yazyke [Foreign words in the Russian language] [Electronic media]. URL: https://ru.wikijournal.org/wiki/Иностранные_слова_в_русском_языке (Accessed August 17, 2020).
3. Asmus V.F. Immanuel Kant [Immanuel Kant]. Vysshaya shkola Publ., 2005, 439 p.
4. Informatsii teoriya. Sait “Entsiklopediya Krugosvet” [Information theory. The “Entsiklopediya Krugosvet” website] [Electronic media]. URL: https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/matematika/INFORMATSII_TEORIYA.html (Accessed August 17, 2020).
5. Lyons R. Tsifrovaya obrabotka signalov: Vtoroe izdanie [Digital signal processing: Second edition]. Binom-Press Publ., 2006, 656 p.
6. Teorema Shennona – Khartli [Shannon – Hartley’s Theorem] [Electronic media]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона_—_Хартли (Accessed August 17, 2020).

7. Entropiya i kolichestvo informatsii [Entropy and quantity of information] [Electronic media]. URL: <http://victor-safronov.ru/systems-analysis/lectures/zhivickaya/12.html> (Accessed August 17, 2020).
8. Informatsionnaya entropiya. Sait "Loginom" [Information entropy. The "Loginom" website] [Electronic media]. URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/inform-entropy.html> (Accessed August 17, 2020).
9. GOST 27.002-2015 Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya [Reliability in technology. Terms and Definitions]. Intr. 2017-03-01, Izd-vo standartov Publ., 2015. 30 p.
10. Rakov V.A. Lokomotivy otechestvennykh zheleznnykh dorog (1956–1975) [The locomotives of the national railways (1956 – 1975)]. Transport Publ., 1999, 443 p.
11. Shabalin N.G., Gorban' V.N., Donskoi A.L. Elektronnoe oborudovanie elektrovoza VL80R: Remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Electronic equipment of the VL80R electric locomotive: Repair and maintenance]. Transport Publ., 1984, 183 p.
12. Preobrazovatel' vpyramitel'no-invertornyi VIP-4000M-UHL2. Tekhnicheskie usloviya TU16-91 IZHFR 435 511.021 TU [The rectifier-inverter converter VIP-4000M-UHL2. Technical specifications TU16-91 IZHFR 435 511.021 TU].
13. In'kov Yu.M., Feoktistov V.P., Shabalin N.G. Diagnostirovanie lokomotivov metodom statisticheskogo posledovatel'nogo analiza energozatrat po poezdкам [Diagnostics of locomotives using statistical sequential analysis of energy consumption by trips]. Trudy pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov" [Proceedings of the first international scientific and practical conference "Prospects of locomotive service development"]. TMKh-Service LLC Publ., 2014. Pp. 158–160.
14. In'kov Yu.M., Feoktistov V.P., Shabalin N.G. Eksploatatsiya i remont elektropodvizhnogo sostava magistral'nykh zheleznnykh dorog [Operation and repair of electric rolling stock of railway mainlines]. MEI Publ., 2011, 384 p.
15. Shabalin N.G. Organizatsiya eksploatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya tyagovogo podvizhnogo sostava s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii [Organization of operation and maintenance of traction rolling stock using modern information technologies. Ph.D. (Engineering) diss.]. Krasnoyarsk, 1999, 171 p.
16. Uzly i agregaty lokomotivov s ukazaniem sushchestvuyushchikh dannykh telemetrii i neobkhodimykh dlya otsenki tekhnicheskogo so-stoyaniya i veroyatnosti otkaza. Analiticheskii analiz [Locomotive components and assemblies with indication of existing telemetry data and data necessary for assessing the technical condition and probability of failure. The analytical analysis]. Kazan', Clover Publ., 2020.
17. Apparatno-programmnyi kompleks "BORT" [Software and hardware complex "BORT"]. Omsk, NIITKD Publ., 2005, 604 p.
18. Apparatno-programmnyi kompleks "BORT" [Software and hardware complex "BORT"] [Electronic media]. URL: <http://niitkd.com/lokomotivnoe/eksploatatsiya/apparatno-programmnyy-kompleks-bort-detail> (Accessed August 17, 2020).
19. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N., Lyangasov S.L., et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov eksploatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika [Monitoring of technical condition and operation modes of locomotives. Theory and practice]. Lokomotivnye Tekhnologii LLC Publ., 2015, 212 p.
20. Posobie mashinistu po eksploatatsii sistem avtovedeniya i RPDA passazhirskikh elektrovozov [Driver's manual on the operation of the automatic driving systems and recorders of parameters of movement and automatic driving of passenger electric locomotives]. Moscow, AVP Tekhnologiya Publ., 2012, 119 p.
21. AVP Tekhnologiya. Ofitsial'nyi sait OOO "AVP Tekhnologiya" [AVP Technology. The official web site of AVP Technology OOO] [Electronic media]. URL: <https://www.avpt.ru/> (Accessed August 17, 2020).
22. Rozenberg E.N. Mnogourovnevaya sistema upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov. Dissertatsiya na soiskanie uchyonoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Multilevel train control and safety system. D.Sc. (Engineering) diss.], (MIIT) MPS RF Publ., 2006, 317 p.
23. Informatsionno-analiticheskaya sistema ASU ZM [Information and analytical system "Automatic control system. Comments from train drivers"] [Electronic media]. URL: <http://scbist.com/wiki/25678-asu-zm.html> (Accessed August 17, 2020).
24. Abolmasov A.A. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyah servisnogo obsluzhivaniya. Dissertatsiya na soiskanie uchyonoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Managing the technical condition of traction rolling stock in service maintenance conditions. Ph.D. (Engineering) diss.], MIIT Publ., 2017, 180 p.

Информация об авторах

Семенов Александр Павлович – канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «НИИ Технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта», г. Омск, e-mail: corp@niitkd.ru

Лакин Игорь Капитонович – д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, e-mail: i.k.lakin@dcv.ru

Хромов Игорь Юрьевич – аспирант, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта РУТ(МИИТ), г. Москва, e-mail: KhromovIYu@yandex.ru

Information about the authors

Alexander P. Semenov – Ph.D. (Eng), General Director of JSC Research Institute of Railway Technology, Control and Diagnostics, Omsk, e-mail: corp@niitkd.ru

Igor' K. Lakin – D.Sc. (Eng), professor, First Deputy General Director of JSC Railroad Centre of Adaptation of New Developments of Krasnoyarsk Railway, Krasnoyarsk, e-mail: i.k.lakin@dcv.ru

Igor' Yu. Khromov – postgraduate of the Department Electric trains and locomotives, Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, e-mail: KhromovIYu@yandex.ru