

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 627.42.07.:00458.5

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, В. М. ЧУМАКОВ, Белорусская железная дорога, г. Минск

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ТИПЕ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩИХСЯ БУКС

Рассмотрены признаки распознавания роликовых и кассетных букс вагонных колес в классах нормально греющихся и перегретых букс. Оценена информативность выявления греющихся букс и достоверность измерительной информации в условиях движения поездов. Исследовано распределение плотностей вероятностей значений превышения температуры для роликовых и кассетных букс. Определены оптимальные пороговые значения температуры при обнаружении перегретых букс и минимизация вероятности ошибки распознавания греющихся буксовых узлов. Формализованы показатели качества работы комплексов КТСМ для комплектования баз информационно-измерительных данных в системе АСК ПС.

Для буксовых узлов вагонных колес в условиях эксплуатации характерны разрывы и сколы бортов внутренних колец подшипников, проворот их на шейке оси, разрушение сепараторов, обводнение и загрязнение смазки (песок, металлическая пыль и стружка) и др. Все перечисленные виды неисправностей приводят к нагреву шейки вагонной оси и деталей буксового узла в процессе движения поезда.

Для объективной оценки точности и достоверности измерения энергии инфракрасного излучения буксовых узлов грузовых вагонов в движении разработана методика оценки влияния информации о типе буксового узла вагонов на точность автоматической классификации греющихся букс [1].

До настоящего времени информативность различных признаков распознавания греющихся букс периферийной аппаратурой автоматического контроля букс в целом исследовалась без учёта типа контролируемых буксовых узлов и типа вагонов. Опыт эксплуатации аппаратуры обнаружения перегретых букс показал, что это приводит к дополнительным потерям информационной способности аппаратуры, которые выражаются в увеличении вероятности ошибки распознавания греющихся букс, т. е. приводят к дополнительным необоснованным остановкам поездов на перегоне (из-за ложных показаний аппаратуры) и пропускам аварийно греющихся букс. Это происходит потому, что допустимый нагрев кассетных букс с подшипниками конического типа в 1,5–1,8 раза выше нагрева роликовых букс, и при настройке аппаратуры на обнаружение перегретых роликовых букс часть исправных, но имеющих повышенный нагрев, кассетных букс при автоматическом распознавании может быть отнесена к классу перегретых букс [2].

Постоянно растущее число вагонов с кассетными буксами актуализировало разработку методики оценки влияния информации о типе буксовых узлов вагонов на точность автоматической классификации греющихся букс, выполненной на основе законов распределения плотности вероятности признака распознавания роликовых и кассетных букс в классах нормально греющихся и перегретых букс.

Под информативностью признака распознавания греющихся букс подразумевается его способность к правильной классификации букс, т. е. способность признака правильно классифицировать всё множество контролируемых букс на два подмножества (класса): нормально греющихся (Н) и перегретых (П) букс [3]. При обозначении априорной вероятности нормально греющейся буксы $P(H)$, вероятности перегретой $P(\Pi)$, можно формализовать вероятность правильного отнесения нормально греющихся букс к классу нормально греющихся букс, как $P(H/H)$, а вероятность правильного отнесения перегретой буксы к классу перегретых букс $P(\Pi/\Pi)$. Тогда вероятность правильной классификации букс $P_{ПКБ}$ будет иметь вид:

$$P_{ПКБ} = P(H)P(H/H) + P(\Pi)P(\Pi/\Pi).$$

Однако в практике аппаратного контроля букс информативность признака принято характеризовать вероятностью ошибки при классификации букс. Если считать, что вероятности правильного и неправильного отнесения нормально греющихся (перегретых) букс к классу нормально греющихся (перегретых) букс образуют полную совокупность событий, то вероятность ошибки при автоматическом распознавании греющихся букс

$$P_{ош} = P(H)[1 - P(H/H)] + P(\Pi)[1 - P(\Pi/\Pi)].$$

Вероятность $[1 - P(H/H)]$ принято называть вероятностью «ложной тревоги» $P_{лт}$, т. е. вероятностью ошибочного отнесения нормально греющейся буксы к классу перегретых букс, а вероятность $[1 - P(\Pi/\Pi)]$ – вероятностью пропуска перегретой буксы, или вероятностью ошибочного отнесения перегретой буксы к классу нормально греющихся букс.

Для того чтобы оценить, насколько полно реализованы в аппаратуре контроля букс информативные возможности признака распознавания, необходимо знать его потенциальную (предельную) информативность.

Превышение температуры корпуса буксы над температурой окружающей среды $\Delta T_{кб}$ зависит от солнечной радиации, термического сопротивления его при передаче тепла от подшипника к корпусу, наличия влаги на поверхности буксы и других факторов. Целесообразно исследовать распределение плотностей ве-

роятностей $P(\Delta T_{кб})$ значений превышения температуры $\Delta T_{кб}$ для роликовых и кассетных букс.

Распределение плотностей вероятностей $P(\Delta T_{кб})$ реальных значений превышения температуры корпуса буксы над температурой окружающей среды $\Delta T_{кб}$ для нормальных (кривая 1) и перегретых (кривая 2) роликовых букс с подшипниками качения, а также для перегретых букс кассетного типа (кривая 3) показано на рисунке 1.

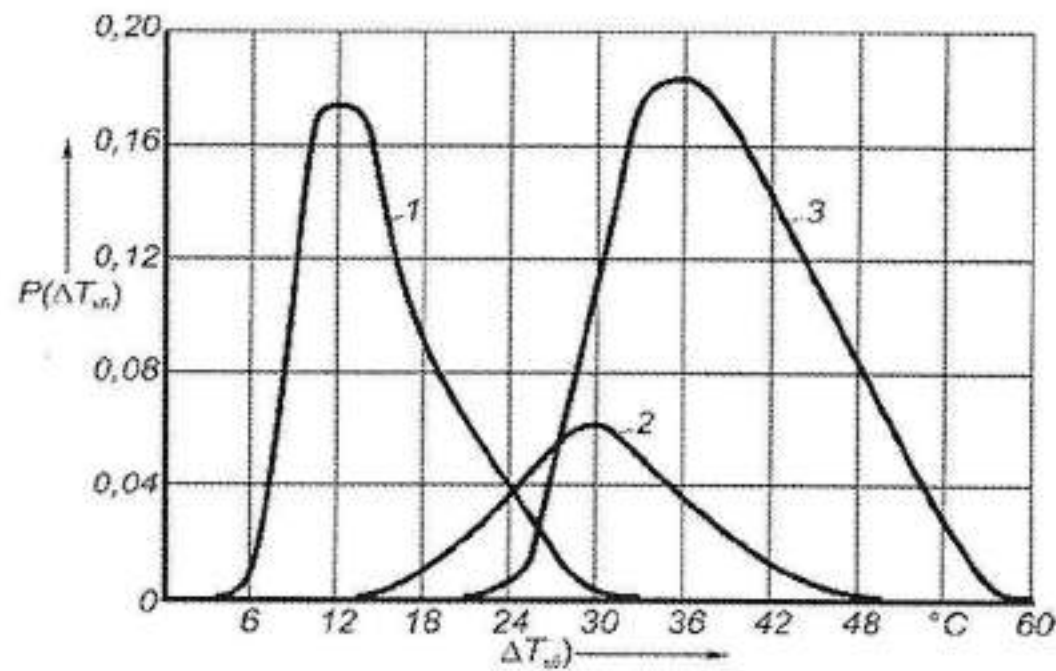


Рисунок 1 – Распределение значений $P(\Delta T_{кб})$ для роликовых букс с подшипниками качения и букс кассетного типа с коническими подшипниками

Установлено, что множества значений $P(\Delta T_{кб})$ для нормально работающих и перегретых роликовых букс имеют зону пересечения от 14 до 32 °С. Множества значений $P(\Delta T_{кб})$ для перегретых букс кассетного типа также присутствуют в указанной зоне пересечений. Это говорит о невозможности безошибочного распознавания перегретых букс по значению $\Delta T_{кб}$. При нахождении измеренного значения $\Delta T_{кб}$ в этой зоне, определенное количество перегретых букс будет не обнаружено, и наоборот, определенное количество нормально греющихся букс будет принято за перегретые [1].

Из изложенного следует, что требуемая достоверность обнаружения перегретых букс будет успешной лишь при использовании совокупности статистических и инструментальных методов обработки результатов измерений.

Способность правильно классифицировать всё множество контролируемых букс на два подмножества (класса) базируется на точном распознавании нормально греющихся (Н) и перегретых (П) букс.

Под потенциальной информативностью признака принято считать минимум ошибки при распознавании, которая может быть достигнута в условиях отсутствия помех с использованием максимального количества априорной информации о признаке распознавания. В этом случае

$$P_{ош} = P(Н)P_{лт} + P(П)P_{пр}, \quad (1)$$

где $P_{ош}$ – вероятность ошибки при автоматическом распознавании греющихся букс; $P_{лт}$ – вероятность ложной тревоги; $P_{пр}$ – вероятность пропуска перегретой буксы.

Закон распределения плотности вероятности признака нормально греющихся букс в этом случае

$$W_{11}(X_i) = P(Н_p)W_{11p}(X_i) + P(Н_k)W_{11k}(X_i), \quad (2)$$

$$\text{где } \left. \begin{matrix} P(Н_p), \\ P(Н_k) \end{matrix} \right\}, \left. \begin{matrix} W_{11p}(X_i), \\ W_{11k}(X_i) \end{matrix} \right\} - \text{вероятности появления ро-$$

ликовых и кассетных букс в классе нормально греющихся букс и законы распределения плотности вероятности признака распознавания (X_i) нормально греющихся роликовых и кассетных букс, а признак распознавания перегретых букс

$$W_{12}(X_i) = P(П_p)W_{12p}(X_i) + P(П_k)W_{12k}(X_i), \quad (3)$$

$$\text{где } \left. \begin{matrix} P(П_p), \\ P(П_k) \end{matrix} \right\}, \left. \begin{matrix} W_{12p}(X_i), \\ W_{12k}(X_i) \end{matrix} \right\} - \text{вероятности появления ролико-$$

вых и кассетных букс в классе перегретых букс и законы распределения плотности вероятности признака распознавания (X_i) перегретых роликовых и кассетных букс [4].

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (1), получим вероятности ошибок распознавания с учётом того, что множества нормально греющихся и перегретых букс состоят из подмножества букс с разного типа подшипниками:

$$P_{ош}(X_i) = P(Н) \left[P(Н_p) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11p}(X_i) dX_i + P(Н_k) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P(П) \left[P(П_k) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12k}(X_i) dX_i + P(П_p) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12p}(X_i) dX_i \right].$$

Взяв от полученного выражения производную и приравняв её к нулю, получим уравнение

$$P(Н) \left[P(Н_p)W_{11p}(X_i) + P(Н_k)W_{11k}(X_i) \right] - \\ - P(П) \left[P(П_k)W_{12k}(X_i) + P(П_p)W_{12p}(X_i) \right] = 0,$$

корнем которого является пороговое значение признака X_{i0} , минимизирующее вероятность ошибок при условии, что тип буксового узла не распознаётся.

Обозначим: $P_{пкр}$ – вероятность того, что нормально греющаяся роликовая букса отнесена к кассетным буксам; $P_{прк}$ – вероятность того, что нормально греющаяся кассетная букса отнесена к роликовым; $P_{пкп}$ – вероятность того, что перегретая кассетная букса отнесена к роликовым; $P_{пкк}$ – вероятность того, что перегретая роликовая букса отнесена к кассетным и найдем общую вероятность ошибочного решения

$$P_{ош}(X_{i1}, X_{i2}) = P_p P(Н_p) P_{пкр}(X_{i1}, X_{i2}) + P_k P(Н_k) P_{прк}(X_{i1}, X_{i2}) + \\ + P_k P(П_k) P_{пкк}(X_{i1}, X_{i2}) + P_p P(П_p) P_{пкп}(X_{i1}, X_{i2}). \quad (4)$$

Используя уравнения (3) и (4) и опустив промежуточные преобразования, получим систему уравнений

$$P_{ош}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}) = P_p P(Н_p) \left[K_1 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11p}(X_j) dX_j \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11p}(X_i) dX_i + K_2 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11p}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_k P(Н_k) \left[K_3 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11k}(X_j) dX_j \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11k}(X_i) dX_i + K_4 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_k P(П_k) \left[K_5 \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12k}(X_i) dX_i + K_6 \left[1 - \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{12k}(X_j) dX_j \right] \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_p P(П_p) \left[K_7 \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12p}(X_i) dX_i + K_8 \left[1 - \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{12p}(X_j) dX_j \right] \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12p}(X_i) dX_i \right], \quad (5)$$

где $\left. \begin{matrix} W_{пр}(X_j), \\ W_{пр}(X_j) \end{matrix} \right\}$ – распределения плотности вероятности признака селекции типа подшипника для нормально греющихся и перегретых роликовых букс соответственно;

$\left. \begin{matrix} W_{нк}(X_j), \\ W_{нк}(X_j) \end{matrix} \right\}$ – то же для кассетных букс.

Корни системы уравнений (5) являются пороговыми значениями разделяющих функций, минимизирующих вероятность суммарной ошибки при распознавании греющихся букс. Данная система полученных уравнений позволяет одновременно находить оптимальные пороговые значения признаков при обнаружении перегретых букс и их селекции по типам и минимизировать вероятность ошибки распознавания греющихся букс:

На рисунке 2 показана рассчитанная по формуле (5) динамика оптимального порога обнаружения перегретых букс при увеличении числа кассетных букс в поездах и отсутствии распознавания их по типу (кривая 1).

Видно, как по мере роста вероятности появления кассетной буксы оптимальный порог распознавания смещается от оптимального порога обнаружения перегретых роликовых букс (кривая 2) к оптимальному порогу обнаружения перегретых кассетных букс (кривая 3), которые не зависят от изменения соотношений кассетных букс и роликовых букс в поездах.

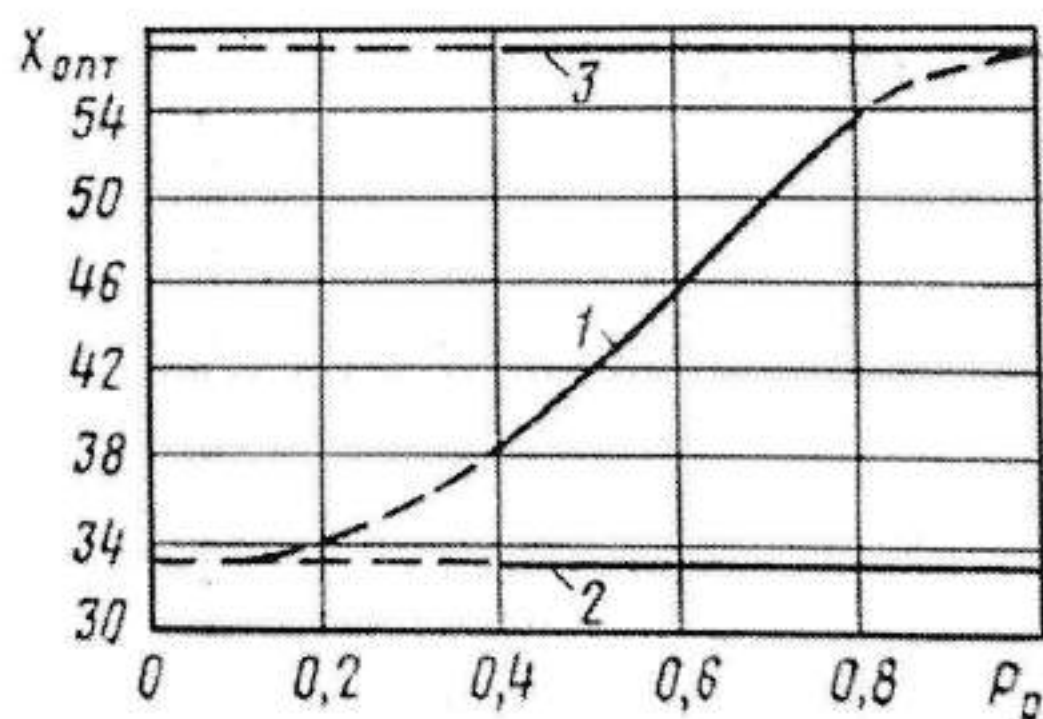


Рисунок 2 – Влияние вероятности появления кассетной буксы на порог обнаружения перегретых букс при отсутствии информации о типе буксы (1), оптимальный порог обнаружения для роликовых букс (2) и кассетных букс (3)

Результаты выполненных исследований позволили установить, что при автоматическом обнаружении перегретых букс целесообразно проводить селекцию букс по их типу, поскольку учёт информации о типе буксы уменьшает вероятность ошибки при выявлении перегретых букс почти в 2 раза. Более адекватная оценка состояния разнотипных буксовых узлов возможна при комбинированном использовании браковочных значений температур и инструментальных методов определения типа буксовых узлов.

В настоящее время на Белорусской железной дороге внедряется аппаратура нового поколения КТСМ-03, имеющая ряд инновационных технических решений, в том числе повышенный уровень классификации типов буксовых узлов. Применен процессор

ARM Cortex-M4, 32 бит, 168 МГц, а также ПЗУ – 2 Мбайт и ОЗУ – 16 Мбайт. Аппаратура функционирует в системе Ethernet RS232 со скоростью передачи до 115200 бит/с. На рисунке 3 представлена схема ориентации напольных камер КНМ-05, применяемых в комплексах КТСМ-02, и камер КНМ-90, используемых в комплексах КТСМ-03 [1, 4].

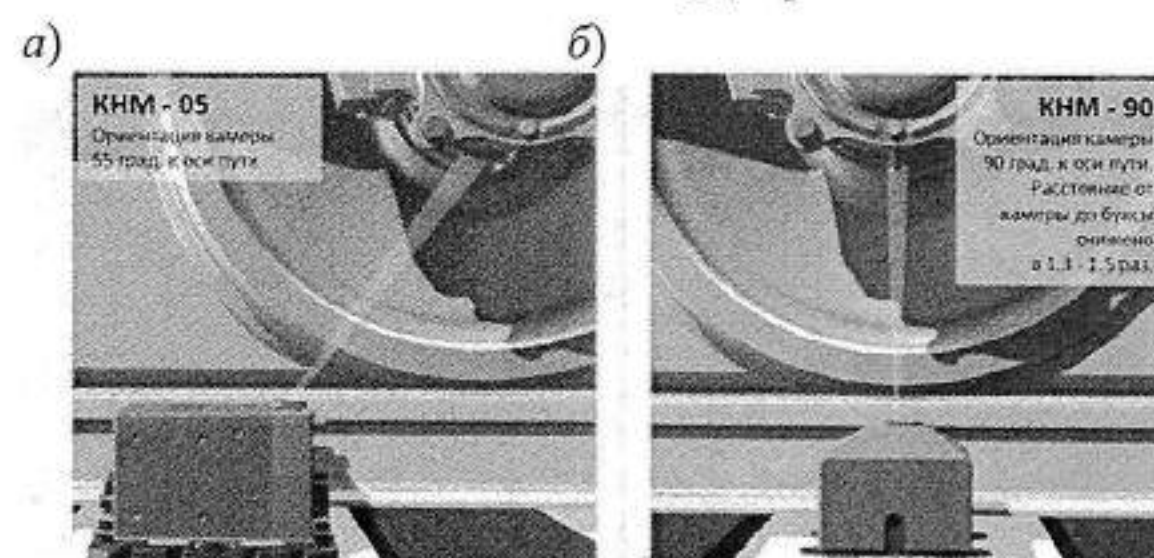


Рисунок 3 – Ориентация напольных камер КНМ-05 (а) и камер КНМ-90 (б) на контролируемую зону буксовых узлов

Установлено, что приемники инфракрасного излучения камер КНМ-90 приближены к наиболее информативной зоне контроля букс. Расстояние от напольной камеры до буксы снижено в 1,3–1,5 раза.

На рисунке 4 показаны зоны сканирования температуры буксовых узлов камерами КНМ-90 в комплексах КТСМ-02 и КТСМ-03.

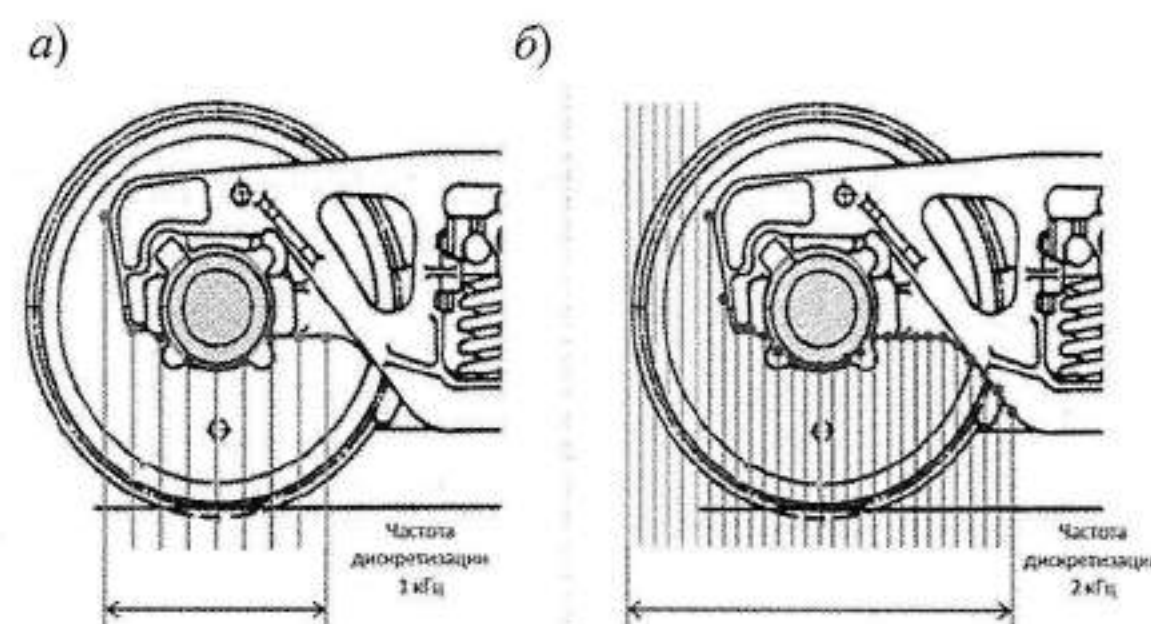


Рисунок 4 – Зоны сканирования температуры буксовых узлов камерами КНМ-90 в комплексах: а – КТСМ-02; б – КТСМ-03

Отмечено, что увеличение частоты дискретизации сигналов считывания инфракрасного излучения безынерционным приемником фотонного типа с 1 до 2 кГц, а также ориентация приемников инфракрасного излучения на наиболее информативную зону контролируемой буксы существенно повышает точность измерения температуры буксовых узлов. Применен новый алгоритм распознавания кассетных букс и идентификации подвижного состава [1, 5].

Для практического применения и формирования баз информационно-измерительных данных в системе АСК ПС более пригодны показатели, по которым оценивается качество работы комплексов КТСМ. К ряду этих показателей относятся «выявляемость» перегретых букс (η), «подтверждаемость» (достоверность) показаний аппаратуры (β) и вероятность необоснованных остановок поезда из-за ложных показаний аппаратуры (α). Перечисленные показатели связаны с уже рассмотренными показателями ($P_{лт}$, $P_{пр}$) и между собой [6, 7].

Под «выявляемостью» перегретых букс принято считать выраженное в процентах отношение числа выявленных аппаратурой действительно (подтвержденных осмотром) перегретых букс N_v к общему количеству перегретых букс $N_{\text{фп}}$, обнаруженных в поездах за определенный интервал времени, т. е.

$$\eta = \frac{N_v}{N_{\text{фп}}} \cdot 100 = \frac{N_{\text{фп}} - N_{\text{пр}}}{N_{\text{фп}}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{фп}}}\right), \quad (6)$$

где $N_{\text{пр}}$ – число пропущенных аппаратурой перегретых букс.

При большом числе проконтролированных букс отношение $N_{\text{пр}} / N_{\text{фп}}$ стремится к вероятности пропуска перегретой буксы $P_{\text{пр}}$ и выражение (6) можно записать в виде

$$\eta = (1 - P_{\text{пр}}) \cdot 100. \quad (7)$$

Соотношение (7) устанавливает связь между эксплуатационным показателем «выявляемости» и «теоретическим» показателем – вероятностью пропуска перегретой буксы.

«Подтверждаемость» показаний – это отношение числа выявленных аппаратурой фактически перегретых букс N_v к общему числу букс, показанных аппаратурой как перегретые $N_{\text{пок}}$

$$\beta = \frac{N_v}{N_{\text{пок}}} \cdot 100 = \frac{N_v}{N_v + N_{\text{лт}}} \cdot 100, \quad (8)$$

где $N_{\text{лт}}$ – число нормально греющихся букс, показанных аппаратурой как перегретые.

Число выявленных аппаратурой перегретых букс

$$N_v = P(\Pi)\eta N_o, \quad (9)$$

где N_o – общее число букс, проконтролированных аппаратурой за определённый интервал времени.

Число ложных показаний аппаратуры

$$N_{\text{лт}} = P(H)P_{\text{лт}}N_o. \quad (10)$$

Подставляя (8) и (9) в (10), после преобразований получим соотношение между показателями «подтверждаемости» и «теоретическими» показателями информативности:

$$\beta = \frac{(1 - P_{\text{пр}}) \cdot 100}{1 - P_{\text{пр}} + \frac{P_{\text{лт}}}{\lambda_o}} = \frac{\eta}{\eta + \frac{P_{\text{лт}}}{\lambda_o}} \cdot 100.$$

Получено 22.08.2025

V. V. Burchenkov, V. M. Chumakov Assessment of the influence of information about the type of axle boxes of freight cars on the accuracy of measurements of the temperature of heating axle boxes.

The article considers the features of recognition of roller and cassette axle boxes of wagon wheels in the classes of normally heated and overheated axle boxes. The information content of detection of heated axle boxes and the reliability of measurement information under train movement conditions are estimated. The distribution of probability densities of temperature excess values for roller and cassette axle boxes is investigated. Determination of optimal threshold temperature values when detecting overheated axle boxes and minimization of the probability of error in recognizing heated roller and cassette axle boxes. The performance indicators of the KTSM complexes for completing the databases of information and measurement data in the ASC PS system are formalized.

Вероятность необоснованной остановки поездов зависит от вероятности «ложной тревоги» и длины составов, находящихся в обращении на контролируемом участке пути. Эта вероятность необоснованной остановки поездов связана с эксплуатационными показателями «выявляемости» и «подтверждаемости» следующим соотношением:

$$\alpha = m \frac{1 - \beta}{\beta} \lambda_o \eta \cdot 100. \quad (11)$$

Приведенные формулы рекомендованы к использованию в статистических отчетах для участков Белорусской железной дороги, оснащенных комплексами КТСМ-01Д и КТСМ-02 с продленным сроком службы [8].

Список литературы

- 1 **Бурченков, В. В.** Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава : монография / В. В. Бурченков ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 254 с.
- 2 **Иванова, Т. В.** Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона / Т. В. Иванова, Д. Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 1(49). – С. 46–47.
- 3 **Борjak, К. Ф.** Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава / К. Ф. Борjak, С. Л. Волков, Е. С. Шпат // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 2. – С. 50–53.
- 4 **Миронов, А. А.** Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСК ПС / А. А. Миронов // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 1. – С. 38–41.
- 5 **Гондорov, В. А.** Современные средства диагностики подвижного состава на ходу поезда / В. А. Гондорov // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 36–37.
- 6 СТП БЧ 19.314-2022 Средства теплового контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда. Размещение, установка и эксплуатация. – Введ. 10.08.2022. – Минск : БЖД, 2022.
- 7 Автоматизированная система контроля подвижного состава АСК ПС. Центральный пост АСК ПС. Программное обеспечение ПО ЦП АСК ПС Руководство системного программиста / Инфотекс. – Екатеринбург, 2006. – 25 с.
- 8 **Поборцев, П. Н.** Порядок пользования автоматизированной системой контроля подвижного состава (АСК ПС) от устройств ДИСК, КТСМ Белорусской железной дороги / П. Н. Поборцев, З. А. Стаховская. – Минск : Белорус. ж. д., 2008. – 76 с.