

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА ВВЕДЕНИЕМ МНОГОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ

В.П. Смирнов

Функционирование технологического процесса перегона железной дороги (ПЖД) с расчетным подъемом можно схематично представить как систему, состоящую из восьми

ми последовательно соединенных элементов, отказы которых принято считать независимыми (рис. 1,а).

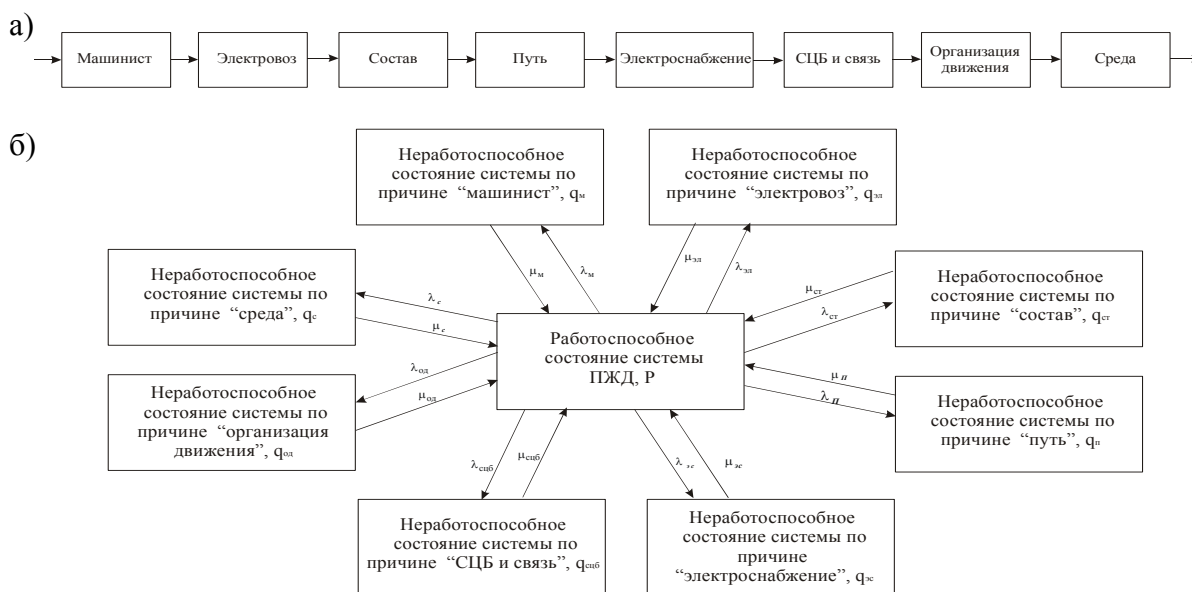


Рис. 1 а, б: схема (а) и граф состояний функционирования восьмизлементной системы перегона железной дороги (б)

Представив технологический процесс ПЖД глобальной кибернетической системой, с позиций теории вероятностей, можно рассматривать его функционирование как поток событий (отправление поезда с промежуточной станции, проследование сигналов, остановки поезда по техническим, технологическим и другим причинам и т.д.), наступающих поочередно одно за другим в случайные моменты времени, квалифицируя его как простейший марковский процесс с некоторым допущением, можно считать, что он обладает всеми свойствами случайного простейшего процесса: стационарностью; отсутствием последствия; ординарностью. Марковские процессы, протекающие в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем характеризуются вероятностями состояний $P(t)$, $q_i(t)$ в любой момент времени t , которые определяются системой дифференциальных уравнений Колмогорова. Она состав-

ляется по мнемоническому правилу с использованием графа состояний (рис. 1,б)

$$\frac{dP(t)}{dt} = -P(t) \sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{i=1}^n \mu_i q_i(t),$$

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = \lambda_i P(t) - \mu_i q_i(t). \quad (2.1)$$

Эту систему решают при условиях, задающих вероятности состояний в начальный момент времени $t=0$, и выполнении нормировочного условия

$$P + \sum_{i=1}^n q_i(t) = 1. \quad (2.2)$$

Если потоки событий, переводящие системы из состояния в состояние, стационарны ($\lambda_i, \mu_i = const$), общее число состояний конечно и состояний без выхода нет, то существует предельный режим функционирования системы, характеризуемый предельными (финальными) вероятностями

$$q_i = \lim_{t \rightarrow \infty} q(t), \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2.3)$$

Для установившегося режима функционирования технологической системы будем иметь следующее решение системы уравнений (2.1)

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_m}{\mu_m} + \frac{\lambda_{эл}}{\mu_{эл}} + \frac{\lambda_{ст}}{\mu_{ст}} + \frac{\lambda_n}{\mu_n} + \frac{\lambda_{эс}}{\mu_{эс}} + \frac{\lambda_{сцб}}{\mu_{сцб}} + \frac{\lambda_{од}}{\mu_{од}} + \frac{\lambda_c}{\mu_c}}, \\ q_m &= \frac{\lambda_m}{\mu_m} \cdot P, q_{эл} = \frac{\lambda_{эл}}{\mu_{эл}} \cdot P, q_{ст} = \frac{\lambda_{ст}}{\mu_{ст}} \cdot P, q_n = \frac{\lambda_n}{\mu_n} \cdot P, \\ q_{эс} &= \frac{\lambda_{эс}}{\mu_{эс}} \cdot P, q_{сцб} = \frac{\lambda_{сцб}}{\mu_{сцб}} \cdot P, q_{од} = \frac{\lambda_{од}}{\mu_{од}} \cdot P, q_c = \frac{\lambda_c}{\mu_c} \cdot P, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где P – вероятность безотказной работы; q_i – вероятность отказов системы по соответствующим причинам: q_m – машиниста (локомотивной бригады); $q_{эл}$ – электровоза; $q_{ст}$ – состава; q_n – пути; $q_{эс}$ – электроснабжения; $q_{сцб}$ – СЦБ и связи; $q_{од}$ – организации движения; q_c – среды.

Интенсивности отказов λ_i и восстановлений μ_i ПЖД по соответствующим причинам

$$\lambda_i = \frac{1}{t_{\lambda}^i}; \quad \mu_i = \frac{1}{t_{\mu}^i}, \quad i = m, \text{эл}, \text{ст}, n, \text{эс}, \text{сцб}, \text{од}, c, \quad (2.5)$$

где $\overline{t_{\lambda}^m}, \overline{t_{\lambda}^{эл}}, \overline{t_{\lambda}^{ст}}, \overline{t_{\lambda}^n}, \overline{t_{\lambda}^{эс}}, \overline{t_{\lambda}^{сцб}}, \overline{t_{\lambda}^{од}}, \overline{t_{\lambda}^c}$ – средняя продолжительность работы системы ПЖД до отказа по соответствующим причинам (наработка на отказ);

$\overline{t_{\mu}^m}, \overline{t_{\mu}^{эл}}, \overline{t_{\mu}^{ст}}, \overline{t_{\mu}^n}, \overline{t_{\mu}^{эс}}, \overline{t_{\mu}^{сцб}}, \overline{t_{\mu}^{од}}, \overline{t_{\mu}^c}$ – средняя продолжительность нахождения системы в состоянии соответствующих отказов.

Как показывают статистические данные об отказах перегонов с расчетными подъемами железных дорог Восточного региона наиболее уязвимыми элементами в глобальной системе ПЖД являются сложнейшая энергетическая кибернетическая система «электровоз», состоящая из тысяч деталей и не менее сложная биологическая кибернетическая система «машинист» (локомотивная бригада) существенно, до 40-50% и более, изменяющая, согласно исследований ученых РГУПС во главе с проф. В.Г. Козубенко, свою работоспособность (надежность функционирования) в течение суток.

При расчете надежности на основании исследований проф. МГУПС (МИИТ) И.П. Исаева и его школы электровоз рассматривают как систему с несколькими возможными состояниями. Поток отказов электровоза считают простейшим, марковским процессом, и он обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последствия.

Надежность электровоза определяют по схеме нахождения его в одном из двух возможных состояний: работоспособном или неработоспособном. Считают, что при этой схеме электровоз выполняет плановое задание по перевозкам за время $t = t' - t_0$ при любой из следующих ситуаций (рис. 2): электровоз находится в рабочем состоянии к моменту времени t_0 выдачи его на контрольный пункт и не откажет за время t ; электровоз неисправен к моменту времени t_0 , но восстанавливается за время $\tau_0 < t$ и не откажет за оставшееся время $t - \tau_0$ еще достаточное для выполнения задания по перевозкам; после первого и последующих отказов на перегоне электровоз не требует межпоездного ремонта и восстанавливается за время меньшее допустимого времени простоя на перегоне τ_d .

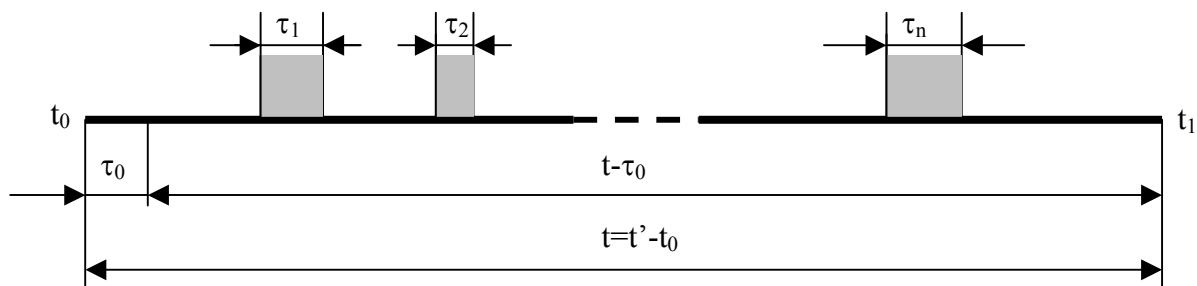


Рис. 2. Схема возможных ситуаций при нахождении электровоза на линии

Применительно к этим ситуациям вероятность того, что задание по перевозкам не будет сорвано из-за ненадежности электроваза, оценивают вероятностью нормального функционирования электроваза

$$P_{\text{нф}}(t) = P_0 P(t) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n [1 - P(t)]^k \gamma^k(\tau_k) \right\}, \quad (2.6)$$

где: P_0 – вероятность готовности электроваза к моменту выдачи его на контрольный пункт; $P(t)$ – вероятность безотказной работы электроваза за время t ; $\gamma(\tau_k)$ – вероятность восстановления работоспособного состояния электроваза за допустимое время простоя на перегоне τ_k ; n – количество отказов электроваза за время t ; k – порядковый номер отказа ($1 \leq k \leq n$).

Формула (2.6) применена при условиях, что $\sum_{k=1}^n \tau_k \ll t$ и $\gamma(\tau_k) \approx \gamma(\tau_k)$.

При среднем времени работы между отказами $T_0 = \frac{1}{\lambda}$ и среднем времени восстановления работоспособности электроваза на линии $T_b = \frac{1}{\mu}$ вероятность его безотказной работы

$$P(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_b} + \left(1 - \frac{T_0}{T_0 + T_b} \right) \cdot e^{-\frac{T_0 + T_b}{T_0 T_b} t}. \quad (2.7)$$

При установившемся режиме эксплуатации, то есть при $t \rightarrow \infty$ стационарное значение $P(t)$, равное P_0 , представляет собой коэффициент готовности локомотива $P_0 = K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b}$.

Вероятность исправного состояния локомотива в любой момент времени при установившемся режиме эксплуатации определяется его коэффициентом готовности. Поскольку допустимое время восстановления работоспособного состояния электроваза на линии ограничено 0,25-0,50 ч, то полагая

$P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}}$ и пренебрегая вторым слагаемым формулы (2.6) получим

$$P_{\text{нф}}(t) = P_0 P(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_b} \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Определим надежность нормального функционирования электроваза ВЛ85 при движении по расчетному подъему с поездом

массой 4000 т в течение получаса до промежуточной станции при включенных в штатном режиме работы всех шести силовых блоках СБ (в силовой блок входят выпрямительно-инверторный преобразователь, сглаживающий реактор и два тяговых двигателя). При этом ток двигателей $I_{\text{ТД1}} = 900$ А, коэффициент использования двигателей

$$K_{\text{И1}} = \frac{I_1}{I_{\infty}} = \frac{900}{843} = 1,07.$$

На основании данных о надежности при этой нагрузке двигателей, параметр потока отказов электроваза, $\omega_1 = 100$ отказов/ 10^6 км. Это соответствует наработке на отказ $T_{01} = 300$ ч. В стационарном режиме работы $\omega_1 = \lambda_1$. Тогда $\lambda_1 = 1/T_{01} = 1/300 = 0,0033 \text{ ч}^{-1}$ (рис. 3). Через полчаса работы в штатном режиме ($T_{\text{с1}} = 0$)

$$P_{\text{нф1}} = P_0 \cdot P(t) = \frac{T_{01}}{T_{01} + T_{\text{с1}}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{01}}} = e^{-\lambda_1 t} = e^{-0,0033 \cdot 0,5} = 0,9983$$

При отключении одного предаварийного СБ по сигналу системы контроля температуры без остановки поезда ($T_{\text{Б2}} = 0$) нагрузка двигателей возрастает до 1000 А ($K_{\text{И2}} = \frac{I_2}{I_{\infty}} = \frac{1000}{843} = 1,19$). Этому режиму работы соответствует $\omega_2 = \lambda_2 = 0,0044 \text{ ч}^{-1}$.

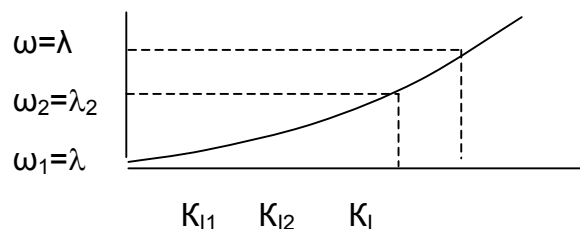


Рис. 3

$$P_{\text{нф}} = P_0 P(t) = \frac{T_{02}}{T_{02} + T_{\text{Б2}}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{02}}} = e^{-\frac{t}{T_{02}}} = e^{-\lambda_2 t} = e^{-0,0044 \cdot 0,5} = 0,9978.$$

Таким образом, введение системы контроля температуры обеспечивает высокий уровень функциональной надежности как электроваза, так и всей системы «Перегон железной дороги».