

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНІКА, ЗВ'ЯЗОК

УДК 656.2.08

Мойсеєнко В.І. к.т.н., професор (УкрДАЗТ)

МОДЕЛЮВАННЯ СТАНІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

Постановка проблеми. Питання про стани в яких може перебувати залізнична транспортна система в процесі її функціонування є одним з найбільш важливим науковим завданням. Від його вирішення залежить подальший напрямок досліджень безпеки залізничного транспорту. Деякі фахівці проводять паралель з основними положеннями теорії надійності, вводячи для характеристики безпеки поняття захисного стану.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Прикладом такого підходу може слугувати схема станів залізничної автоматики, яка наведена у відомчих нормативних документах з безпеки залізничної автоматики Російської Федерації [1]. У відповідності до цього документа система залізничної автоматики, рисунок 1, може знаходитися у неушкодженому, працездатному, непрацездатному захисному, непрацездатному небезпечному та граничному станах.

При аналізі залізничної транспортної системи, необхідно приймати до уваги наступні особливості:

- безперервність технологічного процесу роботи залізничного транспорту у часі та просторі;
- можливість здійснення перевезень при ушкодженнях окремих складових інфраструктури;
- можливість підтримання на відповідному рівні основних параметрів;
- глобальний характер технологічного процесу перевезень.

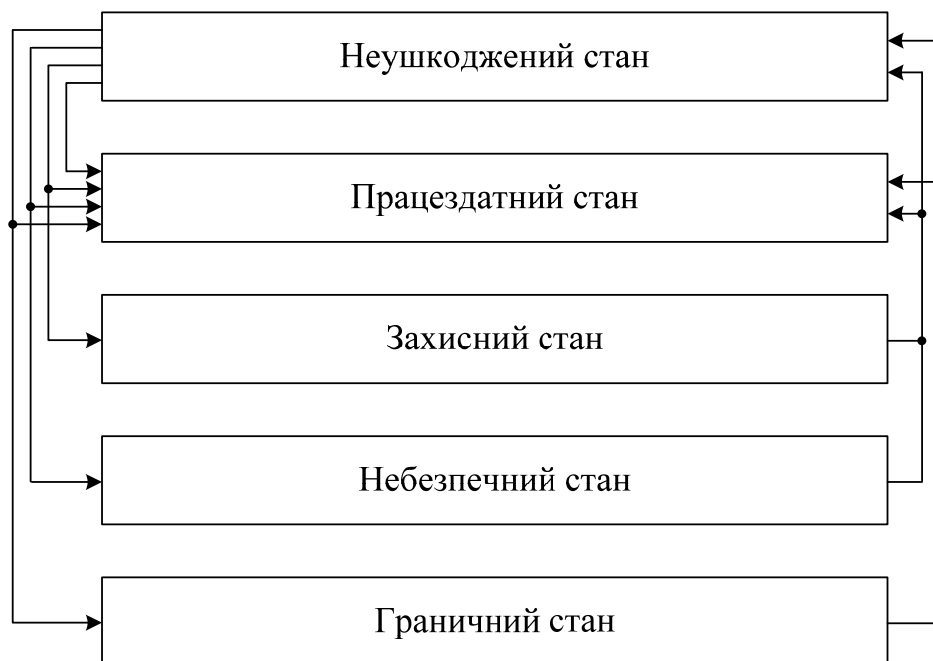


Рисунок 1 – Схема основних станів системи залізничної автоматики

Найбільш близьким до питання, що розглядається, є підхід, який викладено у працях [2,3]. Згідно з ним множина станів процесу руху поїздів підрозділяється на множину штатних $S_{ш}$, нештатних безпечних $S_{н.б.}$ та нештатних небезпечних $S_{н.н.}$, рисунок 2.

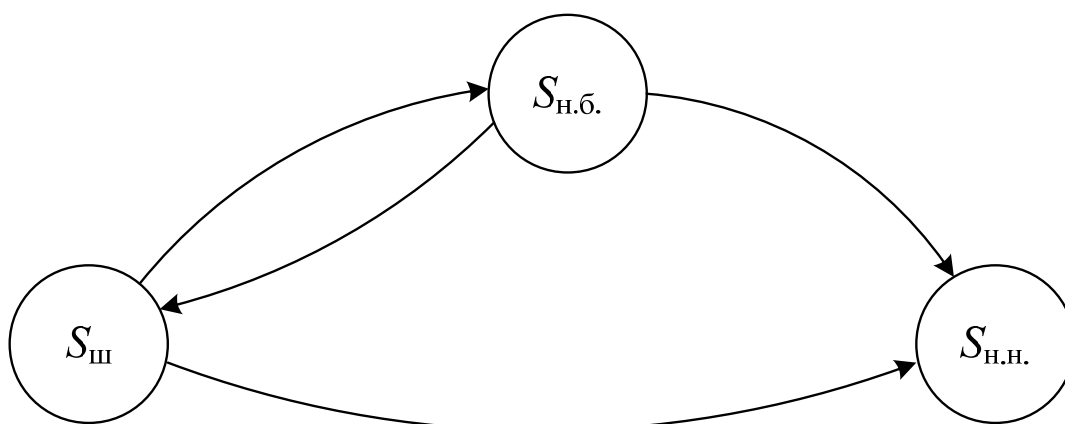


Рисунок.2 – Граф-схема станів процесу руху поїздів

З штатного стану процес руху поїздів може перейти у нештатний безпечний, або небезпечний стан, з якого перехід у другі стани неможливий.

Такий підхід, не в повній мірі відображає особливості функціонування залізничного транспорту.

Мета статті. Моделювання станів транспортної системи, з урахуванням особливостей технологічного процесу функціонування залізничного транспорту.

Основний матеріал дослідження. Наведена граф-схема не розглядає як окремі технологічні роботи, пов'язані з плановим ремонтом або відновленням технічних засобів після ушкоджень. У зв'язку з цим пропонується наступний перелік станів:

- штатний;
- нештатний запланований, безпечний;
- нештатний не запланований, безпечний;
- нештатний небезпечний;

Нештатний запланований безпечний стан характеризує систему при проведенні профілактичних або ремонтних робіт, при цьому рух поїздів продовжується з відповідними обмеженнями по швидкості.

Система може переходити з штатного стану $S_{ш}$ до нештатного запланованого $S_{н.з.}$, або нештатного не запланованого $S_{н.н.}$. З нештатного не запланованого можливо повернення у нештатне заплановане і далі у штатний стан, рисунок 3.

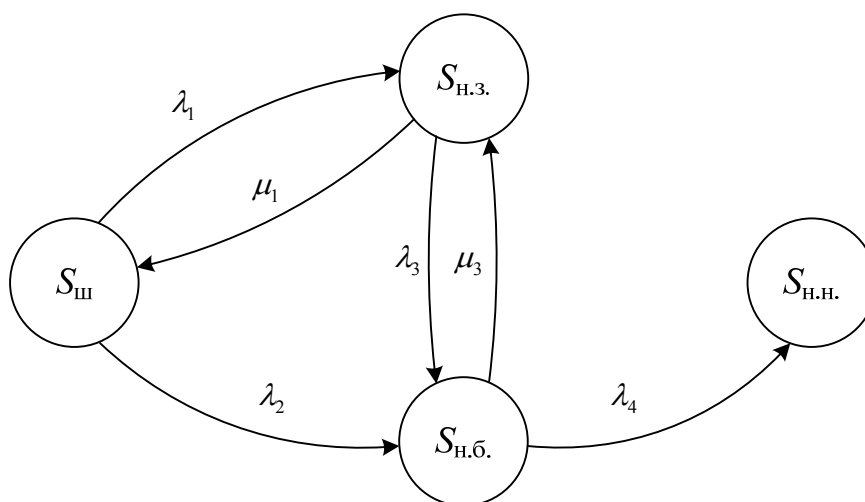


Рисунок 3 – Граф-схема станів транспортної системи

Послідовність переходів $S_{ш} \rightarrow S_{н.з.} \rightarrow S_{ш}$ відповідає плановим профілактичним роботам, ушкодження, його виявлення персоналом та усунення описується послідовністю

$$S_{ш} \rightarrow S_{н.б.} \rightarrow S_{н.з.} \rightarrow S_{ш}.$$

Небезпечні алгоритми переходів завершуються у стані $S_{н.п.}$:

$$S_{ш} \rightarrow S_{н.з.} \rightarrow S_{н.б.} \rightarrow S_{н.п.}, \text{ або } S_{ш} \rightarrow S_{н.б.} \rightarrow S_{н.п.}.$$

Таким чином кількість станів системи дорівнює чотирьом, з них небезпечним є тільки $S_{н.п.}$.

Безпечне функціонування системи можливе лише у станах $S_{ш}$, $S_{н.з.}$ та $S_{н.б.}$. Воно характеризується функцією безпеки $Q(t)$, яка зв'язана з функцією $R(t)$ співвідношенням:

$$Q(t)+R(t)=1 \quad (1)$$

Для синтезованого графа запишемо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) \\ P_1'(t) = \lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_3)P_1(t) + \mu_3 P_2(t) \\ P_2'(t) = \lambda_2 P_0(t) + \lambda_3 P_1(t) - (\lambda_4 + \mu_3)P_2(t) \\ P_3'(t) = \lambda_4 P_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

Після використання перетворень Лапласа до системи рівнянь (2), отримаємо:

$$\begin{cases} Z\bar{P}_0(t) - P_0(0) = -(\lambda_1 + \lambda_2)\bar{P}_0(Z) + \mu_1\bar{P}_1(Z) \\ Z\bar{P}_1(t) - P_1(0) = \lambda_1\bar{P}_0(Z) - (\mu_1 + \lambda_3)\bar{P}_1(Z) + \mu_3\bar{P}_2(Z) \\ Z\bar{P}_2(t) - P_2(0) = \lambda_2\bar{P}_0(Z) + \lambda_3\bar{P}_1(Z) - (\lambda_4 + \mu_3)\bar{P}_2(Z) \end{cases}, \quad (3)$$

де $\bar{P}_k(Z) = \int_0^{\infty} e^{-Zt} P_k(t) dt$ - зображення по Лапласу вірогідності $P_k(t)$.

$P_k'(t) \xrightarrow{\cdot} Z\bar{P}_k(Z) - P_k(0)$ - перетворення Лапласа для похідної від функції $P(t)$.

Для рішення системи рівнянь (3) запишемо початкові умови:

$$P_0(0) = 1, \quad P_k(0) = 0, \quad k = 1, 3.$$

Тоді система рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} (Z + \lambda_1 + \lambda_2)\bar{P}_0(Z) - \mu_1\bar{P}_1(Z) = 1 \\ -\lambda_1\bar{P}_0(Z) + (Z + \lambda_3 + \mu_1)\bar{P}_1(Z) - \mu_3\bar{P}_2(Z) = 0 \\ -\lambda_2\bar{P}_0(Z) - \lambda_3\bar{P}_1(Z) + (Z + \lambda_4 + \mu_3)\bar{P}_2(Z) = 0 \\ Z\bar{P}_3(Z) = \lambda_4\bar{P}_2(Z) \end{cases} \quad (4)$$

Після елементарних перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} (Z + \lambda_1 + \lambda_2)\bar{P}_0(Z) - \mu_1\bar{P}_1(Z) = 1 \\ \bar{P}_0(Z) = \frac{1 + \mu_1 \left(\frac{\lambda_2\mu_3 + \lambda_1 Z + \lambda_1\lambda_4 + \lambda_1\lambda_3}{\lambda_2 Z + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_2\mu_1 + \lambda_1\lambda_3} \cdot \bar{P}_1(Z) \right)}{Z + \lambda_1 + \lambda_2} \\ \bar{P}_1(Z) = \frac{\lambda_2\mu_3 + \lambda_1 Z + \lambda_1\lambda_4 + \lambda_1\mu_3}{\lambda_2 Z + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_2\mu_1 + \lambda_1\lambda_3} \cdot \bar{P}_2(Z) \\ \bar{P}_3(Z) = \frac{\lambda_4}{Z} \bar{P}_2(Z) \end{cases} \quad (5)$$

Остаточно:

$$\bar{P}_3(Z) = \frac{\lambda_2\lambda_4 Z + \lambda_4 c}{Z(Z^3 + a_1 Z^2 + a_2 Z + a_3)},$$

де $a_1 = b + \lambda_4 + \mu_3$;

$b = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1$;

$a_2 = b\lambda_4 + (b - \lambda_3)\mu_3 + \lambda_1\mu_1$;

$a_3 = c\lambda_4$;

$c = \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_2\mu_1$.

Функція ризиків запишеться у вигляді:

$$\bar{R}(Z) = \frac{1}{Z} - \bar{P}_3(Z) \quad (6)$$

Зображення функції $\bar{R}(Z)$ доцільно шукати методом підстановок:

$$\bar{P}_3(Z) = \frac{\lambda_2 \lambda_4}{(Z - Z_1)(Z - Z_2)(Z - Z_3)} + \frac{\lambda_4 c}{Z(Z - Z_1)(Z - Z_2)(Z - Z_3)}, \quad (7)$$

де $c = \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \mu_1$.

Знайдемо оригінал для кожного з членів суми:

$$\bar{I}_1(Z) = \frac{\lambda_2 \lambda_4}{(Z - Z_1)(Z - Z_2)(Z - Z_3)}$$

$$I_1(Z) = \frac{\lambda_2 \lambda_4}{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_3 - Z_2)} \left[(Z_3 - Z_2)e^{Z_1 t} + (Z_1 - Z_3)e^{Z_2 t} + (Z_2 - Z_1)e^{Z_3 t} \right] \quad (8)$$

$$\bar{I}_2(Z) = \frac{\lambda_4 c}{Z(Z - Z_1)(Z - Z_2)(Z - Z_3)} = \frac{\lambda_4 c}{ZP(Z)},$$

де $c = \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \mu_1$.

Припустимо, що $P(Z)$ має різні корені, тоді після деяких перетворень запишемо вираз для $R(t)$:

$$R(t) = \frac{\lambda_4}{(Z_1 - Z_2)(Z_1 - Z_3)(Z_3 - Z_2)} \times$$

$$\times \left[\left(\lambda_2 + \frac{c}{Z_1} \right) (Z_3 - Z_2) e^{Z_1 t} + \left(\lambda_2 + \frac{c}{Z_2} \right) (Z_1 - Z_3) e^{Z_2 t} + \left(\lambda_2 + \frac{c}{Z_3} \right) (Z_2 - Z_1) e^{Z_3 t} \right]. \quad (9)$$

Знаючи зображення функції $\bar{R}(Z)$ можна знайти математичне очікування часу роботи системи до появи транспортної події:

$$\bar{T}_1 = M[T] = \lim_{Z \rightarrow 0} \bar{R}(Z),$$

$$\bar{R}(Z) = \frac{1}{Z} - \bar{P}_3(Z) = \frac{Z^2 + a_1 Z + a_2 - \lambda_2 \lambda_4}{Z^3 + a_1 Z^2 + a_2 Z + a_3}, \quad (10)$$

$$\bar{T}_1 = \lim_{Z \rightarrow 0} \bar{R}(Z) = \frac{a_2 - \lambda_2 \lambda_4}{a_3} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_1) \lambda_4 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) \mu_3 - \lambda_1 \mu_1}{\lambda_4 (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \mu_1)}. \quad (11)$$

Скориставшись даними статистичної звітності [7] визначимо чисельні значення параметрів μ та λ . При визначенні чисельних значень параметрів $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ та μ_1, μ_3 було використано метод експертних оцінок у зв'язку з відсутністю статистичних даних офіційної звітності. Відповідно до (11) час напрацювання транспортної системи залізниць України до небезпечної події для інцидентів та порушень у 2006 році дорівнює 9 годинам. Середнє значення похибки не перевищує 12%, що для системи, яка розглядається є задовільним.

Висновки. Автором вперше до станів процесу перевезень введений запланований безпечний стан, який враховує всі види ремонтних, профілактичних та відновлювальних робіт після ушкоджень.

Запропонована граф-модель станів транспортної системи для якої розроблена математична модель яка дозволила оцінити параметри небезпечних подій.

Отримані результати дозволяють здійснювати аналіз стану процесу перевезень та розробляти рекомендації щодо поліпшення рівня безпеки.

Список літератури

1. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики ОСТ 32.17-92 Санкт-Петербург 1992
2. В.М. Лисенков Статистическая теория безопасности движения поездов М.:ВИНИТИ РАН. 1999-330с.
3. Комплекси технічних засобів систем керування рухом поїздів. Функціональна безпека і надійність. ДСТУ 4178-2003 Київ-Держстандарт України 2003-31с.
4. В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков Модели и алгоритмы оптимизации надежности сложных систем
5. Остап О.П., Ушанін В.М., Андрійко І.М., Маковійчук І.Р. Технічна діагностика і ресурс конструкцій після довготривалої експлуатації// Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Київ-Львів: Центр"Леотест-Медіум"-1999-с.3-8
6. Г. Корн, Т. Корн Справочник по математике для научных работников. М.: Наука 1978-832с.
7. Аналіз стану безпеки руху поїздів на залізницях України. Київ 2007-125с.