

УДК 625.143

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ПРОТИУГІННИХ СИСТЕМ ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Канд. техн. наук Н. В. Бугаєць, інж. П. В. Пліс (Південна залізниця), В. О. Нікішин

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОТИВОУГОННЫХ СИСТЕМ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канд. техн. наук Н. В. Бугаец, инж. П. В. Плис (ЮЖД), В. А. Никишин

ESTIMATION OF RELIABILITY OF PROTIUGINNIH SYSTEMS OF SUBRAIL BASIS WITH THE USE OF MATHEMATICAL DESIGN

Candidate of techn. sciences N. V. Bugaec, eng. P. V. Plis, V. A. Nikishin

Для опору рейок подовжнім переміщенням відносно підрейкових опор, тобто для запобігання їх уgonу на магістральних залізницях широко використовуються «протиугінні системи», які являють собою сукупність вузлів проміжних скріплень.

Розглянута логічна схема для розрахунку надійності протиугінної системи і виконаний аналіз її відмов при будь-якому стані протиугінної системи.

Ключові слова: протиугінні системи, підрейкові опори, математичне моделювання, вузли скріплень, вертикальне навантаження.

Для сопротивления рельсов продольным перемещением относительно подрельсовых опор, то есть для предотвращения их угона на магистральных железных дорогах широко используются «противоугонные системы», которые представляют собой совокупность узлов промежуточных скреплений.

Рассмотрена логическая схема для расчета надежности противоугонных систем и выполнен анализ их отказов при любом состоянии противоугонной системы.

Ключевые слова: противоугонные системы, подрельсовые опоры, математическое моделирование, узлы скреплений, вертикальная нагрузка.

In work the questions of remontoprigrivosti are examined, longevity and safety of work of constructions at the calculation modes of exploitation, to provide their normal functioning.

For terms, that are examined, reliability of the protivougonoj system in the flow of time of its exploitation is determined taking into account probability of faultless work of the system during a certain period, taking into account the normative value and probability of safe work.

To characterize every knot of the intermediate clamping of mogna by the size of longitudinal communication of rail with a railroad tie. The size of longitudinal force of pressure of rail on the knot of clamping, by chance changing in the process of work, can attain a critical mark, which the refusal of knot of clamping can happen at. At the refusal of some knots of clamping the protiugonnaya system remains capable of working, because in her there are surplus elements.

For resistance of rails to the longitudinal moving, in relation to subrail supports, that is for prevention of their driving away, on the main ferrous road the «protivougonnih systems» which are the aggregate of knots of the intermediate clamping are widely used.

In work a logical chart is considered for the calculation of reliability of the protivougonnih systems and the analysis of their refusals at any state of the protivougonoj system is executed.

Keywords: protivougonnih systems, subrail supports, mathematical design, knots of clamping, vertical loading.

Вступ. Під терміном «протиугінна система» розумітимемо сукупність вузлів проміжних скріплень, яка забезпечує опір подовжнім переміщенням рейок, запобігаючи їх уgonу.

Поняття «надійність» характеризується трьома властивостями: безпекою, довговічністю і ремонтпридатністю. Безпека – властивість конструкції зберігати свою працездатність при розрахункових режимах експлуатації. Довговічність – властивість конструкції бути безвідмовною в часі. Ремонтпридатність – її пристосованість до відновлення справного стану. Таким чином, «надійність конструкції» – її властивість, обумовлена безвідмовністю, довговічністю і ремонтпридатністю, яка забезпечує її нормальне функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні принципи надійності механічних систем сформульовані В.В. Болотіним [1]. Перший принцип зводиться до того, що зовнішні дії на систему поведінки в процесі експлуатації є випадковими процесами, що розгортаються в часі. Другий принцип полягає в ототожненні надійності і вірогідності знаходження параметрів системи в деякій допустимій області, а порушення надійності – вихід з цієї області. Для протиугінних систем цей вихід рівносильний залишковим зсувам рейок по опорах. Третє положення полягає в тому, що відмови настають, як правило, унаслідок накопичення пошкоджень, залишкових деформацій, зносу.

Також були проаналізовані дослідження закордонних вчених [2-4], що підтвердили актуальність даного питання.

Визначення мети та задачі дослідження. Основним завданням даного дослідження є можливість розглянути надійність протиугінних спроможностей підрейкової основи зі скріпленням КПП-5 для різних умов експлуатації, застосовуючи математичне моделювання.

Основна частина дослідження. Умову надійності протиугінної системи в

перебігу часу її експлуатації можна записати так:

$$P(t) \geq P_n, \quad (1)$$

де $P(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи системи в період часу t ;

P_n – нормативне значення вірогідності безпечної роботи.

Ліва частина нерівності (1) означає, що описаний стан для конструкції колії настає тоді, коли подовжні сили від рухомого складу Q_y перевищують несучу здатність протиугінної системи R_y :

$$Q_y - R_y > 0 \quad (2)$$

з вірогідністю $1 - P(t)$.

Для розрахунків вірогідності безвідмовної роботи протиугінної системи повинні бути визначені її стохастичні властивості «навантаження – несуча здатність», тобто у будь-який момент часу описані розподіли цих параметрів.

Нормативне значення вірогідності безвідмовної роботи протиугінної системи є величиною, близькою до одиниці, і повинно бути встановлено виходячи з вимог безпеки руху потягів при мінімальних витратах на експлуатацію системи.

Кожний вузол проміжного скріплення можна характеризувати величиною подовжнього зв'язку рейки з шпалою. Величина подовжньої сили тиску рейки на вузол скріплення, випадково змінюючись в процесі роботи, може досягти критичного значення, при якому може відбутися відмова вузла скріплення. При відмові деяких вузлів скріплень протиугінна система залишається працездатною, оскільки в ній є надмірні елементи

$$n > n_{кр},$$

де n – кількість вузлів скріплень в протиугінній системі;

$n_{кр}$ – кількість вузлів скріплень, при якій система втрачає працездатність.

Резервовані системи відрізняються від нерезервованих реакцією на появи відмов. З цієї точки зору протиугінна система є резервованою системою з пасивним навантаженим резервом, в якій при відмові хоча б одного елемента навантаження на вузол скріплень, що залишаються працездатними, збільшуються. В результаті збільшується інтенсивність їх відмов. Відмова протиугінної системи настає, коли число працездатних скріплень

$$n_j \leq n_{кр} . \quad (3)$$

Логічна схема при розрахунку надійності протиугінної системи продана на рисунку, де позначено:

λ_1 – інтенсивність відмов вузлів скріплень при початковому навантаженні;

λ_2 – інтенсивність відмов вузлів скріплень при навантаженні в $n(n-1)$ більше початкової;

λ_k – інтенсивність відмов вузлів скріплень при навантаженні в $n/n_{кр}$ більше початкової.

Із збільшенням номера j -го стану на логічній схемі зменшується число елементів, сполучених паралельно, і збільшується інтенсивність їх відмов.

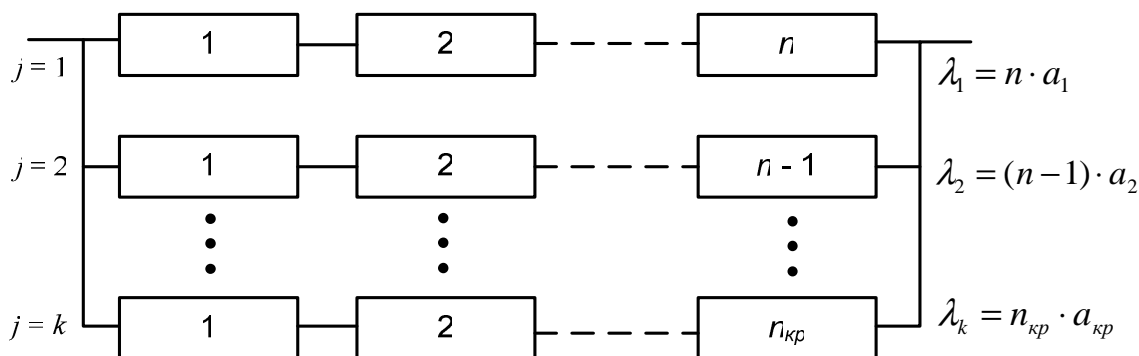


Рис. Логічна схема для розрахунку надійності протиугінної системи

Якщо прийняти, що інтенсивність відмов в робочій області пропорційна прикладеному навантаженню, то

$$\frac{\lambda_i}{a_j} = \frac{n}{n - j + 1} , \quad (4)$$

де $j = 1, 2, \dots, k$.

Інтенсивність відмов системи для j -го стану

$$\lambda_j = (n - j + 1) \cdot a_j . \quad (5)$$

Підставляючи значення a_j з (4), одержимо

$$\lambda_j = n \cdot a_j . \quad (6)$$

Тобто інтенсивність відмов для будь-якого стану протиугінної системи, показаної на рисунку, постійна. Відповідно до цієї логічної схеми час роботи до відмови протиугінної системи дорівнює сумі випадкових величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$, часу безвідмовної роботи вузлів скріплень, що перебувають в стані 1, 2, ..., k. Припустимо, що $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ взаємно незалежні. При цьому розподіл часу безвідмовної роботи системи при значеннях $k > 5$ є практично нормальним [5] з математичним сподіванням

$$m_t^c = \sum_{j=1}^k \frac{1}{\lambda_j} \quad (7)$$

і середньоквадратичним відхиленням

$$\sigma_t^c = \sqrt{\sum_{j=1}^k \frac{1}{\lambda_j}}. \quad (8)$$

Враховуючи допущення про пропорційність інтенсивності відмов прикладеному навантаженню, одержимо

$$m_t^c = \frac{k}{na_1} = \frac{k}{n} m_1 = \left(1 - \frac{n_{kp} - 1}{n}\right) m_t, \quad (9)$$

де $m_t = m_1 = T/a_1$ – математичне сподівання часу безвідмовної роботи одного вузла скріплення.

Відповідно середньоквадратичне відхилення часу безвідмовної роботи протиугінної системи

$$\sigma_t^c = \sqrt{\frac{k}{n^2 a_1^2}} = \frac{\sqrt{n - n_{kp} + 1}}{n} m_t. \quad (10)$$

Вірогідність безвідмовної роботи протиугінної системи за час $(0, t_i)$

$$G_{Si} = \int_S^{\infty} \frac{C}{\sqrt{2\pi\sigma_{ni}}} \exp\left[-\frac{(R_y - m_{Ri})^2}{2\sigma_{Ri}^2}\right] dR, \quad (13)$$

де m_{Ri} і σ_{ni} – математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення амплітудних значень навантаження на вузли скріплення у момент часу (напрацювання) t_i .

Нормуючий множник C визначається з умови

$$C \int_{R_1}^{R_2} f_i(R) dn = 1, \quad (14)$$

де R_1, R_2 – діапазон можливих навантажень.

$$P(t_i) = 0.5 - \Phi(u), \quad (11)$$

де $U = \frac{t - m_t^c}{\sigma_t^c}$, $\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{V^2}{2}\right) dV$ – нормована функція Лапласа.

Математичне сподівання m_t часу безвідмовної роботи вузла скріплення можна визначити, знаючи характеристики випадкового процесу зміни навантаження на вузол в процесі роботи.

Вузол скріплення вважається працездатним в частині протиугінних властивостей, якщо діюче на нього навантаження не перевищує його несучої здатності. Для фіксованого моменту часу або напрацювання t_i вірогідність того, що вузол скріплення працездатний, дорівнює

$$G_{Si} = \int_S^{\infty} f_i(R) dR, \quad (12)$$

де $f_i(R)$ – щільність розподілу величини навантаження на вузли скріплення при $t = t_i$.

При усіченому нормальному розподілі величин навантажень

При випадковому процесі зміни навантажень, що має монотонні реалізації, щільність розподілу напрацювання до відмови дорівнює

$$f(t) = -\frac{dG(S, t)}{dt}. \quad (15)$$

При лінеаризації процесу зміни навантажень рівномірною функцією вигляду

$$R(t) = A + b(t), \quad (16)$$

у якій випадкова величина A , яка характеризує початкові значення навантажень, має математичне сподівання m_a і середньоквадратичне відхилення σ_a ; b - постійна величина, яка характеризує швидкість зміни навантаження в процесі експлуатації. В цьому випадку щільність розподілу напрацювання вузла скріплення повністю, відповідно до формул (13) і (15), матиме вигляд

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right], \quad (17)$$

де $m_t = \frac{S - m_a}{b}$; $\sigma_t = \frac{\sigma_a}{|b|}$.

Якщо в результаті обробки даних експериментів встановлено, що лінійна

випадкова функція близька до рівномірної, тобто дисперсія $\sigma_{R(t)}$ змінюється мало, можна прийняти

$$b = m_b,$$

а дисперсію σ_R^2 навантажень вважати постійною і рівною напівсумі початкового значення дисперсії σ_a^2 і її значенню σ_t^2 при $t = m_t$

$$\sigma_R^2 = 0.5(\sigma_a^2 + \sigma_t^2). \quad (18)$$

При цьому числові характеристики m_t і σ_t нормального розподілу напрацювання повністю можна визначити приблизно за двома вимірюваннями значень параметра R в процесі експлуатації [5]:

$$m_t = \frac{(t_{i+1} - t_i)S - t_{i+1}m_{Ri} + t_i m_{Ri+1}}{m_{Ri+1} - m_{Ri}}; \quad (19)$$

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{(t_{i+1} - t_i)[0.5(\sigma_{Ri+1}^2 - \sigma^2)m_{Ri} + t_{i+1}\sigma_{Ri}^2 - t_i\sigma_{Ri+1}^2]}}{m_{Ri+1} - m_{Ri}}, \quad (20)$$

де m_{Ri} ; m_{Ri+1} - середні значення навантажень у момент часу t_i і t_{i+1} ;

σ_{Ri} ; σ_{Ri+1} - середньоквадратичне відхилення у момент часу t_i і t_{i+1} .

Якщо теоретичний закон щільності розподілу $f(t)$ напрацювання повністю визначити не вдається, розрахунки надійності можна виконати наближеним способом.

Для цієї мети термін служби протиугінної системи (міжремонтний період) розбивається на інтервали Δt_i . Для кожного фіксованого значення напрацювання t_i обчислюють значення вірогідності знаходження протиугінної системи в працездатному стані G_{wi} . Далі,

припускаючи, що всі реалізації випадкового процесу зміни навантажень є гладкими монотонними, визначаються середні для інтервалів $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ значення щільності розподілу напрацювання повністю, розділивши прирости вірогідності того, що вузол скріплення знаходиться в працездатному стані, на довжину інтервалу

$$[f_i]_{cp} = \frac{G_{Si} - G_{S(i+1)}}{t_{i+1} - t_i}. \quad (21)$$

При нормальному розподілі ординат випадкового процесу $y(t)$ формулу (21) можна звести до функції Лапласа

$$[f_i]_{cp} = \frac{C[\Phi(U_{i+1}) - \Phi(U_i)]}{t_{i+1} - t_i}.$$

За отриманими значеннями $[f_i]_{cp}$ будується гістограма, яка згладжується безперервною кривою.

При постійній межі допуску S значення G_{Si} обчислюються за формулою (13). У випадку, якщо межі поля допуску є випадковим процесом, то вірогідність знаходження системи в працездатному стані для всіх значень напрацювання t_i можна визначити, використовуючи спосіб, запропонований в [6].

При нормальному розподілі діючих на вузол скріплення подовжніх сил Q_y і несучої здатності R_y , відмова не відбудеться, поки

$$\Delta_i = R_y - Q_y > 0.$$

Середні значення випадкової величини Δ_i дорівнюють різниці середніх значень випадкових величин R_{yi} і Q_{yi}

$$m_{\Delta_i} = m_{R_{yi}} - m_{Q_{yi}}. \quad (22)$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\sigma_{R_{yi}}^2 + \sigma_{Q_{yi}}^2}, \quad (23)$$

де $\sigma_{R_{yi}}$ і $\sigma_{Q_{yi}}$ – середньоквадратичне відхилення випадкових величин R_{yi} і Q_{yi} .

За цих умов величина Δ_i має нормальний розподіл, тому вірогідність знаходження вузла скріплення в працездатному стані

$$G_i = 0.5 + \Phi\left(\frac{m_{\Delta_i}}{\sigma_{\Delta_i}}\right), \quad (24)$$

де $\Phi\left(\frac{m_{\Delta_i}}{\sigma_{\Delta_i}}\right)$ – нормована функція Лапласа.

Визначивши значення G_i , далі за формулою (21) можна отримати для кожного інтервалу напрацювання Δt_i середні значення щільності розподілу напрацювання до відмови $[f_i]_{cp}$, які згладжуються безперервною кривою.

Математична модель реалізована в програмній системі Mathcad.

В таблиці наведені результати розрахунків надійності роботи протиугінних систем підрейкової основи зі шпалами СБ-3-0 та скріпленням КПП-5 при різних значеннях вантажонапруженості.

Таблиця

Надійність роботи протиугінних систем зі шпалами СБ-3-0 та скріпленням КПП-5

Вантажонапруженість (млн ткм бруто / км/р.)	Пропущений тоннаж (млн т)			
	200	400	600	800
15	0,987	0,875	0,757	0,653
30	0,993	0,954	0,834	0,737
50	0,995	0,976	0,867	0,824
70	0,997	0,987	0,895	0,857

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Визначення надійності протиугінних систем підрейкової основи зі

скріпленням КПП-5 є важливим і перспективним завданням для магістрального транспорту.

Розроблена математична модель роботи протиугінної системи підрейкової основи з урахуванням різних умов її експлуатації. Виконаний аналіз зміни стану протиугінної системи під впливом часу.

Теоретичні передумови, які були отримані у даних, дослідженнях потребують подальшого практичного

розвитку і використання отриманих результатів для подовження терміну служби колії і її елементів.

Запропонована модель реалізована в програмній системі Mathcad, що дало можливість отримувати числові значення надійності роботи протиугінних систем для різних конструкцій колії.

Список використаних джерел

1. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей к теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1971. – 255 с.
2. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [Electronic resource] / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 8, №1. – P. 1-14. – Available at: <http://ade.sagepub.com/content/8/1/1687814015623696.full.pdf+html>. – Title from the screen. – Accessed: 14.03.2016.
3. Kim, S. J. A Study on the Running Safety of F26 Turnout and Vehicle Model [Electronic resource] / S. J. Kim, B.-G. Eom, H. S. Lee // *International Journal of Railway*. – 2012. – Vol. 5, №4. – P. 156-162. – Available at: [http://www.ijr.or.kr/On_line/admin/files/\(156-162\)-12-024.pdf](http://www.ijr.or.kr/On_line/admin/files/(156-162)-12-024.pdf). – Title from the screen. – Accessed: 15.03.2016.
4. Herian, J. Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions [Electronic resource] / J. Herian, K. Aniołek // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2011. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 71-81. – Available at: http://www.journalam-me.org/papers_vol49_1/4918.pdf. – Title from the screen. – Accessed: 15.03.2016.
5. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных систем [Текст] / Г. В. Дружинин. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.
6. Ржаницин, А. Р. Определение характеристик безопасности и коэффициентов запаса из диономических соображений [Текст] / А. Р. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1961. – 96 с.

Бугаєць Наталія Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 730-10-59. E-mail: natalia.bugaec@gmail.com.
Пліс Павло Васильович, інженер, начальник КМС-133 (Куп'янськ), Південна залізниця. Тел.: 730-10-59.
Нікішин Володимир Олександрович, магістрант Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 730-10-59.

Bugaec Natalya Vladimirovna, cand. of techn. sciences, Associated Professor of Department "Road and Track Facilities" Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 730-10-59.
Plis Pavlo Vasiljovich, engineer, chief CMS - 133 (Coup'yansc), Southern Railway. Tel.: 730-10-59.
Nikishin Vladimir Alexandrovich, Master of Science Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 730-10-59.

Стаття прийнята 11.05.2017 р.