

УДК 629.488.25: 519.833

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТОХАСТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РЕМОНТНИХ РОБІТ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Міляннич А.Р.

OPTIMUM CONTROL OF STOCHASTIC SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF REPAIR WORKS OF FREIGHT CARS

Milyanich A.

У статті автором розглянуто питання оптимізації технологічних процесів ремонтних робіт вантажних вагонів, розробки пов'язані із оптимізацією, які мали адаптацію на підвищення надійності та тривалої експлуатації засобів рухомого складу залізниці. Виконано розрахунок нелінійної системи першого порядку із зовнішніми випадковими збудженнями, який показує, що метод оптимізації планування технологічним процесом ремонту вантажних вагонів дозволяє ціною лише незначних фінансових витрат та втрат робочого часу зменшити дисперсію вихідного сигналу, тобто, кінцевого результату ремонтних робіт.

Ключові слова: вантажні вагони, оптимізація, технологічні процеси, надійність, несправність.

Вступ. Традиційні методи підвищення техніко-економічних показників промислових технологічних процесів орієнтовані на специфічний характер виробництва, в яких вони використовувались в деінформаційній технології. Так технологічні процеси ремонту рухомого складу залізниці тісно пов'язані із гарантованою якістю на отримання гарантованої до затрат інших ресурсів. Середньотиповий характер виробництва, який є типовим для даних галузей промисловості, властивий особливостям вагоноремонтному виробництві не лише із типовими для даних галузей, але й типовими для даних галузей промисловості їх унікальних агрегатів під конкретні технологічні операції.

Постановка проблеми. Рішення проблеми оптимізації технологічних процесів на даний час не може обмежуватись лише питаннями планового ремонту рухомого складу залізниці, але й небагаточисельні розробки пов'язані із оптимізацією, які мали адаптацію на підвищення надійності та тривалої експлуатації засобів рухомого складу залізниці.

Оскільки, в умовах частої зміни видів вантажних вагонів (піввагони, платформи, цистерни та

спеціалізовані вагони) цілком закономірно виникає необхідність ефективних і оперативних змін у технологічних процесах ремонтно-відновлювальних робіт. Адже відомо, що при проектуванні виробничих ліній і, відповідно, технологічних процесів, існує велика кількість різних комбінацій факторів виробництва, але при цьому доволі обмежене число варіантів їх раціональних комбінацій.

Технологічні процеси ремонтних робіт тісно пов'язані із характером і причиною виникнення несправностей або часткового руйнування окремих елементів вантажних вагонів, а саме:

- технологічна – несправність, пов'язана із якістю виготовлення та виконання планових і непланових ремонтів вантажних вагонів у вагоноремонтних депо, а також якістю підготовки вагона до перевезень;

- експлуатаційна – несправність, викликана експлуатаційним зношуванням деталей та вузлів внаслідок тривалої роботи або по причинах, не пов'язаних із низькою якістю виготовлення або планового ремонту вагону;

- пошкодження – несправність, викликана порушенням встановлених правил і умов експлуатації вагону, при маневрових і навантажувально-розвантажувальних операціях на коліях промислових підприємств та шляхах загального користування, у випадках аварійних ситуацій тощо.

На даний час ремонтні роботи та розробка їх технологічних процесів, викликані першими двома причинами несправностей, є достатньо прогнозованими. Планування даних групових технологічних процесів, вибір оптимальної послідовності їх виконання та оптимальних технологічних режимів механічної обробки ґрунтовно досліджувались рядом вітчизняних науковців, що відображено у їх працях [1, ..., 4].

Що стосується останньої причини несправності – пошкодження, то це питання на даний час ще є

недостатньо дослідженим, оскільки його вирішення у плані оптимізації технологічних процесів важко піддається традиційним закономірностям, а скоріше підпорядковуються стохастичній системі.

Загальновідомо, що стохастичні системи – системи змін, які носять випадковий характер. При випадкових впливах отриманих даних про стан системи є недостатньо для передбачення ситуації в наступний момент часу. Випадкові ситуації можуть впливати на систему як із зовні, так і здатні виникати в середині даної системи. Дослідження систем при виникненні випадкових впливів можна проводити звичайними методами, мінімізуювши крок моделювання щоб не пропустити впливу випадкових параметрів. При тому, оскільки, максимальне значення випадкової величини зустрічається доволі рідко (в основному у техніці переважають нормальні розподілення), то вибір мінімального кроку у більшості моментів часу не буде обґрунтованим.

У більшості випадків при проектуванні, наприклад, технологічних процесів механічної обробки, закладаються не максимальні, а найбільш ймовірні значення випадкового параметру. У такому випадку отримується більш раціональна система, попередньо припускаючи погіршення роботи системи на окремих проміжках часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом значна увага надається питанням оптимального управління нелінійними стохастичними системами. Найбільш популярними моделями у даних дослідженнях є стохастичні системи, які описуються стохастичними диференціальними рівняннями із гаусівськими параметричними або зовнішніми випадковими збудженнями [5,6]. Для формального опису динамічних систем, які перебувають під впливом випадкових збуджень, широко використовується апарат стохастичних диференціальних рівнянь. Основною моделлю в сучасній теорії стохастичної стійкості є система Іто [7].

Крім того, поширення отримав метод статистичної лінеаризації у сполученні із теорією гаусівських випадкових процесів у лінійних системах при квадратичному функціоналі якості; у рамках такого підходу найчастіше синтезується субоптимальний лінійний керувний пристрій, який передбачає зворотній зв'язок згідно змінних стану [8,9].

Мета статті. Досліджувана тут задача оптимального управління стохастичними системами у технологічних процесах ремонтно-відновлювальних робіт рухомого складу залізниці відноситься до нелінійних систем при застосуванні квадратичного критерію якості та наявності достатньої інформації про стан даної системи. Спочатку ми наводимо формулювання задачі оптимального управління певними стохастичними системами. Передбачений синтез нелінійного керувного пристрою, який включає контур лінійного зворотного зв'язку згідно змінних стану та який здійснює компенсацію нелінійності системи. Далі виводяться модифіковані рівняння Риккаті для коефіцієнтів лінійного зворотного зв'язку та рівняння для матриці коефіцієнтів коваріації (коваріація – міра лінійної залежності двох випадкових величин).

Результати досліджень. Розглянемо нелінійну стохастичну керовану систему, яка задовольняє умову Ліпшиця (умова Ліпшиця – інтегральне обмеження на поведінку приросту функції в інтегральній метриці) [9] за умов рівномірного росту, та описується рівнянням Іто [7]:

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_2 dt; \\ dx_2 &= x_3 dt; \\ &\vdots \\ dx_n &= - \sum_{i=1}^n (a_i x_i dt + x_i d\alpha_i) - \\ &\quad - h(x_1, x_2, \dots, x_n) dt + dW' + u dt \end{aligned} \quad (1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – компоненти n -мірного вектора змінних стану x ; W' та α_i – незалежні вінерівські процеси (теорія випадкових процесів – модель випадкового блукання із безперервним часом) [16] із нульовими середніми значеннями та інтенсивностями

$$E[d\alpha_i d\alpha_j] = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 2q_{ii}, & i = j = 1, n, \end{cases} \quad (2)$$

$$E[dW' dW'] = 2q_{n+1, n+1} dt.$$

У рівнянні (1) через h позначена нелінійна функція змінних стану. Задача управління полягає в наступному: встановити закон управління у вигляді зворотного зв'язку $u = u(x)$, який забезпечує регулювання системи (1) та мінімізує для стаціонарного стану квадратичний функціонал якості:

$$J = \frac{1}{2} E[x^T Q x + u^T r], \quad (3)$$

де Q – позитивно визначена матриця; r – позитивна скалярна величина.

Існування оптимального управління здебільшого приймається для даної задачі в якості гіпотези. Навіть якщо для задачі такого типу і вдасться вивести на основі теорії динамічного програмування [11,12] рівняння Беллмана (рівняння, яке виражає мінімальне значення критерію оптимізації, яке можливо досягнути за умови еволюції системи із даного стану у якийсь певний критичний), то побудова числового розв'язку даного рівняння можливо лише для небагатьох випадків. Якщо на нелінійну систему впливають лише зовнішні випадкові збу-

рення, синтез субоптимального керівного засобу здебільшого здійснюють на основі статистичної лінеаризації (лінеаризація – дослідження нелінійної системи аналізом лінійної системи, яка у певній мірі є еквівалентною вихідній) із використанням гаусівського наближення для густини ймовірності.

Лінеаризація для еквівалентних зовнішніх збуджень. Синтез нелінійних управляючих засобів на основі методу лінеаризації для еквівалентних зовнішніх збуджень у свій час був розроблений детерміністичних робото технічних систем [13], але не досліджувався стосовно стохастичних систем. Для нелінійної системи управління із гаусівським випадковим збудженням можна в рамках гаусівського наближення визначити стаціонарні коефіцієнти коваріації змінних стану, якщо в нелінійних управляючих засобах знаходиться елемент, який здійснює компенсацію нелінійної системи, а інтенсивність випадкових збуджень визначається у відповідності із умовою еквівалентного зовнішнього збудження [15]. У відповідності із цією умовою ми від системи із випадковими параметричними збудженнями переходимо до еквівалентної системи із зовнішніми збудженнями. В результаті виявляється, що нелінійна система із випадковими параметричними збудженнями, для яких передбачена компенсація не лінійності, стає лінійною системою із еквівалентним чисто зовнішнім збудженням; гаусівська властивість процесів у такій системі використовується для синтезу нелінійного керівного пристрою. Далі наводимо опис методу лінеаризації для еквівалентних зовнішніх збуджень.

Розглянемо нелінійну функцію h , яку в загальному випадку можна представити у вигляді суми функцій h_{nf} , яка залежить від наступних випадкових збуджень:

$$h = h_{nf} + h_{nd}. \quad (4)$$

Вводячи в ланцюг зворотного зв'язку нелінійний компенсуючий елемент, записуємо

$$u = h_{nf} - \sum_{j=1}^n k_j x_j. \quad (5)$$

Тоді рівняння замкнутої системи отримують вигляд:

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_2 dt; \\ dx_2 &= x_3 dt; \\ &\vdots \\ dx_n &= -\sum_{i=1}^n ((a_i + k_i) x_i dt + x_i d\alpha_i) - \\ &\quad - h_{nd} dt + dW' \end{aligned} \quad (6)$$

Нелінійну функцію h_{nd} , яка залежить від наступних збуджень, можна представити у вигляді:

$$h_{nd} = \sum_{i=1}^n d\beta_i h_i(x) / dt, \quad (7)$$

де β_i – вінерівський процес із нульовим середнім значенням [16] та наступною інтенсивністю

$$E[d\beta_i \cdot d\beta_i] = 2v_u dt. \quad (8)$$

Запишемо рівняння лінійної системи із мультиплікативними випадковими збудженнями та із зовнішнім випадковим збудженням, яке є еквівалентним збудженню в системі (6):

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_2 dt; \\ dx_2 &= x_3 dt; \\ &\vdots \\ dx_n &= -\sum_{i=1}^n ((\alpha_i + k_i) x_i dt + x_i d\alpha_i) + dW' \end{aligned} \quad (9)$$

де W' – вінерівський процес із наступною еквівалентною інтенсивністю:

$$E[dW' \cdot dW'] = \left\{ 2q_{n+1, n+1} + \sum_{i=1}^n 2v_u E[h_i^2] \right\} dt. \quad (10)$$

Притримуючись ідеї еквівалентного зовнішнього збудження, можна густину ймовірності змінних стану в системі (9) апроксимувати гаусівській [15]. Тому очікуване значення h_i^2 можна виразити через моменти першого та другого порядків

$$E[h_i^2] = f_i(P), \quad (11)$$

де P – коваріаційна матриця.

Від рівнянь (9) можна перейти до наступного матричного рівняння із початковою умовою для стохастичної системи n -го порядку:

$$\begin{aligned} dx(t) &= Ax(t) + \sum_{i=1}^n x_i(t) D_i(t) d\alpha_i + ed\xi, \\ x(t_0) &= x_0. \end{aligned} \quad (12)$$

де x – n -мірний вектор змінних стану; α та ξ – вінерівські процеси із нульовими середніми значеннями та наступними інтенсивностями:

$$E[d\alpha d\alpha^T] = \begin{bmatrix} 2q_{11} & & 0 \\ & 2q_{22} & \\ & & \ddots \\ 0 & & & 2q_{nn} \end{bmatrix} dt = S dt \quad (13)$$

$$E[d\xi d\xi^T] = \left[2q_{n+1, n+1} + \sum_{l=1}^n 2v_l f_l(P) \right] dt = v(P) dt \quad (14)$$

$$A = A' + b k,$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & \cdot & \cdot & \cdot & -\alpha_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$k^T = \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -k_n \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ -1 & \cdot & 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \dots, \quad (15)$$

$$D_n = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & -1 \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}, \quad d\alpha = \begin{bmatrix} d\alpha_1 \\ d\alpha_2 \\ \cdot \\ d\alpha_n \end{bmatrix}.$$

Від впливу залежностей (3) та (5) із врахуванням гаусівських властивостей функцій $y(P)$ та $z(P)$ отримуємо:

$$J = \frac{1}{2} \text{tr} [(Q + k^T r k) P] + r k z(P) + \frac{r}{2} y(P), \quad (16)$$

$$z(P) = \begin{bmatrix} E[x_1 h_{nf}] \\ E[x_2 h_{nf}] \\ \cdot \\ \cdot \\ E[x_n h_{nf}] \end{bmatrix}, \quad y(P) = E[h_{nf}^2]. \quad (17)$$

Отже, шляхом введення нелінійної управляючої ланки (5) ми від нелінійної системи (1) із квадратичним критерієм якості (3) перейшли до майже лінійної системи (12) із неквадратичним критерієм якості (16). Для цієї задачі оптимального управління при не квадратичній мірі [10] можна за допомогою формули Іто (формула Іто – формула заміни змінної в стохастичному диференційному рівнянні) [16] вивести наступне рівняння відносно коваріаційної матриці:

$$P = AP + PA^T + G(P) + e v(P) e^T; \quad (18)$$

$$G(P) = \sum_{i=1}^{\bar{n}} \sum_{j=1}^{\bar{n}} (P)_{ij} D_i S D_j^T. \quad (19)$$

Тепер задача оптимального управління технологічним процесом ремонтних робіт зводиться до визначення вектору k оптимальних значень коефіцієнтів зворотного зв'язку, який забезпечує мінімізацію J при обмеженні (18). Вводячи множник Лагранжа L [14], складемо гамільтоніан (функція, яка залежить від узагальнених координат часу, що описує динаміку механічної системи) [10]:

$$H = \text{tr}(PL) + 0,5 \cdot \text{tr} \cdot [(Q + k^T r k) P] + r k z(P) + 0,5 y(P), \quad (20)$$

Необхідні умови мінімуму H (H – умовне позначення гамільтоніана) відповідно по k , L та P виражаються за допомогою матриць градієнтів:

$$\partial H / \partial k; \quad \partial H / \partial L = 0; \quad \partial H / \partial P = 0. \quad (21) \dots (23)$$

Із останніх рівнянь (21) – (23) отримуємо:

$$k = -2r^{-1} (b^T L) - z^T P^{-1}; \quad (24)^*$$

$$AP + PA^T + G + e v e^T = 0; \quad (25)$$

$$0,5 \cdot (Q + k^T r k) + LA + A^T L + \Gamma + \Delta + \phi + \psi = 0 \quad (26)$$

$$(\Gamma)_{ij} = \text{tr} [D_i^T L D_j S];$$

$$\Delta = \left[t \cdot r \left[e^T L \cdot e \frac{dv(P)}{d(P)_{ij}} \right] \right]; \quad (27)$$

$$\phi = r \cdot k \frac{dz(P)}{dP}; \quad \psi = \frac{r}{2} \cdot \frac{dv(P)}{dP},$$

де вираз (26) являє собою так зване модифіковане рівняння Ріккати [20].

Отже, оптимальне управління стохастичною системою планування технологічним процесом вагоноремонтних робіт визначається рішенням системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (24) – (26). При цьому припускається, що за рахунок відповідного вибору параметрів системи забезпечується виконання достатніх умов стійкості у середньому квадратичному [15].

Висновки. Для оптимального управління нелінійними стохастичними системами із одночасно діючими зовнішніми та параметричними випадковими збудженнями запропонований нелінійний закон управління, який синтезується на основі методу лінеаризації системи із еквівалентними зовнішніми збудженнями. Для нелінійної системи із зовнішніми збудженнями застосовування наведеного методу, який передбачає використання припущення із гаусівською густиною ймовірності змінних даного стану, не накладає ніяких обмежень ні на рівень не лінійності системи, ні на інтенсивність зовнішніх випадкових впливів; це пов'язано із тим, що нелінійний закон управління синтезується із таким розрахунком, щоб здійснювати компенсацію нелінійної системи. Однак цими обмеженнями не можна нехтувати при синтезі лінійних законів управління згідно методу статистичної лінеаризації із використанням гаусівського наближення.

Результати моделювання нелінійної системи першого порядку із зовнішніми випадковими збудженнями показує, що наведений автором метод оптимізації планування технологічним процесом ремонту залізничних вантажних вагонів дозволяє ціною лише незначних фінансових витрат та втрат робочого часу зменшити дисперсію вихідного сигналу, тобто, кінцевого результату ремонтних робіт, у порівнянні із запропонованими результатами, дослідженими іншими науковцями.

Література

1. Митрофанов С.П. Организация группового производства. – Л.: Машиностроение, 1983, Т.1. – 408 с.
2. Фираго В.П. Основы проектирования технологического процесса. – М.: Машиностроение, 1975. – 468 с.
3. В. Е. Карпуть, О. В. Котляр. Обґрунтування вибору найбільш ефективного методу багатокритеріальної оптимізації технологічних схем механічної обробки. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в маши-

нобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №40. – С. 19-24

4. Колесник М.Э. Методика минимизации риска в процессе оптимизации содержания проекта. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №40. – С. 35-38.
5. Владимирив И.Г., Курдюков А.П., Семенов А.В. Стохастическая проблема Дзооптимизации. // Доклады РАН, № 5, 1995.
6. Каплинский А.И. Об адаптивном отслеживании нестационарностей в стохастических задачах оптимизации. В сб.: Исследование операций. М.: ВЦ АН СССР, 1992, вып. 3, с. 156-168.
7. Кулинич Г.Л., Перегуда О.В. Инвариантные множества стохастических дифференциальных уравнений. Київ: Київський університет, 2002. – 91 с.
8. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems, Wiley. Vol. 2, Academic Press, New York, 1982.
9. Диментберг И.Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
10. Механика, том 1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц./ Под ред. Л.П. Питаевского. 4-е изд. – М.: Наука, 2007. – 224 с.
11. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Штайн К. Динамическое программирование // Алгоритмы: построение и анализ. / Под ред. И.В. Красикова. – 2-е изд. – Вильямс, 2005. – 1296 с.
12. Sanjoy Dasgupta, Christos H. Papadimitriou, Umesh Vazirani. Algorithms. – 1-е изд. – McGraw-Hill Science / Engineering / Math, 2006. – 336 с.
13. Gilbert E.G. «Controllability and Observability in Multivariable Control Systems», SIAM Journal on Control, Series A, Vol. 2(1), 1989. - pp. 128-151.
14. Акулич И.Л. Задачи нелинейного программирования. Глава 3. // Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с.
15. Chang R.J. Control Interpretation on Stochastic Linearization and Its Improvement in Analyzing Non-linear Dynamic Systems. Conference Paper (PDF Available) December, 2011.
16. Ито К., Маккинг Г. Диффузионные процессы и их траектории. Пер. с англ., - М.: Наука, 1988.

References

1. Mitrofanov S.P. Organization multi-production. - L.: Mashinostroenie, 1983, Vol.1. - 408 p.
2. Firago V.P. Fundamentals of Designing technological process. - M.: Mashinostroenie, 1975. - 468 p.
3. Karpus V.E., Kotlyar A.V. Rationale for choosing the most effective method of multi-objective optimization of technological schemes machining. Proceedings of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Collected Works. Special Issue: Technologii v mashinobudivanni. - Kharkov: NTU "KPI". - 2011. - №40. - P. 19-24
4. Kolesnik M.E. Methods mynymyzatsyy line in the process optimization project. Proceedings of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Collected Works. Special Issue: Technologii v mashinobudivanni. - Kharkov: NTU "KPI". - 2011. - №40. - P. 35-38.
5. Vladimirov I.G., Kurdyukov A., Semenov A.V. The stochastic problem of the Deoptimization. // Reports of the Russian Academy of Sciences, No. 5, 1995.

6. Kaplinsky A.I. About adaptive tracking of nonstationary states in stochastic optimization problems. In: Investigation of Operations. Moscow: Computing Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1992, no. 3, p. 156-168.
7. Kulnich G.L., Perehuda O.V. Invariant set of stochastic differential equations Ito. Kyiv, Kyivskuy Universytet, 2002. - 91 p.
8. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems, Wiley. Vol. 2, Academic Press, New York, 1982.
9. Dimentberg, I.F. Nonlinear stochastic problems of mechanical oscillations. - Moscow: Nauka, 1990. - 368 p.
10. Mechanics, volume 1. L.D. Landau, E.M. Lifshits. / Ed. L.P. Pitaevsky. 4 th ed. - Moscow: Nauka, 2007. - 224 p.
11. Kormen T., Leisserson C., Stein K. Dynamic programming // Algorithms: construction and analysis. Ed. I.V. Krasikov. - 2 nd ed. -: Williams, 2005. - 1296 p.
12. Sanjoy Dasgupta, Christos H. Papadimitriou, Umesh Vazirani. Algorithms. - 1-е изд. - McGraw-Hill Science / Engineering / Math, 2006. - 336 с.
13. Gilbert E.G. «Controllability and Observability in Multivariable Control Systems», SIAM Journal on Control, Series A, Vol. 2(1), 1989. - pp. 128-151.
14. Akulich I.L. Problems of nonlinear programming. Chapter 3. // Mathematical programming in examples and tasks. - Moscow: Vyschaya Shkola, 1986. - 319 p.
15. Chang R.J. Control Interpretation on Stochastic Linearization and Its Improvement in Analyzing Non-linear Dynamic Systems. Conference Paper (PDF Available) December, 2011.
16. Ito K., Makking G. Diffusion processes and their trajectories. Trans. With English., - Moscow: Nauka, 1988.

Мілянчик А.Р. Оптимальное управление стохастическими системами технологических процессов ремонтных работ грузовых вагонов

В статье автором рассмотрены вопросы оптимизации технологических процессов ремонтных работ грузо-

вых вагонов, разработки связаны с оптимизацией, которые имели адаптацию на повышение надежности и длительной эксплуатации средств подвижного состава. Выполнен расчет нелинейной системы первого порядка с внешними случайными возмущениями, который показывает, что метод оптимизации планирования технологическим процессом ремонта грузовых вагонов позволяет цене лишь незначительные финансовых затрат и потерь рабочего времени уменьшить дисперсию выходного сигнала, то есть, конечного результата ремонтных работ.

Ключевые слова: грузовые вагоны, оптимизация, технологические процессы, надежность, неисправность.

Milyanych A. Optimum control of stochastic systems of technological processes of repair works of freight cars

In the article the author considers the questions of optimization of technological processes of repair works of freight cars, development is related to optimization, which had an adaptation for increasing the reliability and long-term operation of rolling stock. The calculation of a first-order nonlinear system with external random excitations is performed, which shows that the planning optimization method for the technological process of repairing freight cars allows the price to reduce the variance of the output signal, that is, the final result of the repair work, only by insignificant financial expenses and work time losses.

Keywords: freight cars, optimization, technological processes, reliability, malfunction.

Мілянчик А.Р. — к.т.н., доцент кафедри «Рухомий склад і копія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, e-mail: milyan_74@ukr.net.

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 05.03.2017