

УДК 629.01:517.977.1:519.857

РІШЕННЯ МАТРИЧНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ РІККАТІ В СЕРЕДОВИЩІ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ МВТП 3.7

ЄРШОВА Н. М., *д. т. н., проф.*

Кафедра «Прикладна математика та інформаційні технології». Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 918-01-02, email: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Анотація. *Мета.* Для проектування систем, що знаходяться під дією випадкових обурень, розроблений метод стохастичного динамічного програмування. Метод дуже ефективний, оскільки дозволяє знаходити оптимальне управління параметрами пружно-дисипативних зв'язків підвіски екіпажу як функцію оцінок фазових координат. Основна причина, перешкоджаюча широкому розповсюдженню цього методу для лінійних динамічних систем із багатьма ступенями свободи, пов'язана з відсутністю програмного забезпечення рішення матричного нелінійного диференціального рівняння типу Ріккати, що входить в алгоритм методу. Мета роботи – розробити схеми моделювання для рішення диференціальних рівнянь типу Ріккати в системі моделювання МВТП 3.7 (моделювання в технічних пристроях). *Методика.* Система моделювання МВТП 3.7 дозволяє досліджувати перехідні процеси в складних динамічних системах і аналізувати стійкість коливальних процесів по фазовій траєкторії. Створюється математична модель динамічної системи – диференціальні рівняння, після – структурна схема моделі і в середовищі МВТП 3.7 будується схема моделювання. МВТП 3.7 має графічний редактор, тому схема моделювання збирається з блоків бібліотеки, яка розташована на робочім полі. Задаються параметри блоків, початкові умови, метод інтегрування, час моделювання, точність рішення та ін. Результати моделювання видаються в виді графіків. Крім того, мається текстовий редактор, з допомогою якого фіксуються числові дані результатів моделювання. Для рішення диференціальних рівнянь типу Ріккати структурну схему створювати не потрібно. *Результати.* Створена схема моделювання для рішення диференціальних рівнянь типу Ріккати і одержані кореляційні функції матриці параметрів оптимального фільтра. Виконано моделювання коливального процесу кузова локомотива 2ТЕ10Л і фільтра. Установлено, що для локомотива 2ТЕ10Л не потрібно створювати пристрої активного управління параметрами пружно-дисипативних зв'язків. *Наукова новизна.* Створена методика рішення диференціальних рівнянь типу Ріккати в системі моделювання МВТП 3.7. *Практична значимість.* Усунена основна причина, яка перешкождала широкому розповсюдженню методу стохастичного динамічного програмування і гальмувала розвиток теорії створення активних підвісок транспортних екіпажів.

Ключеві слова: проектування динамічних систем; стохастичне динамічне програмування; диференціальні рівняння типу Ріккати; система моделювання

РЕШЕНИЕ МАТРИЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ РИККАТИ В СРЕДЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МВТУ 3.7

ЄРШОВА Н. М., *д. т. н., проф.*

Кафедра «Прикладная математика и информационные технологии». Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (095) 918-01-02, email: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Аннотация. *Цель.* Для проектирования систем, находящихся под действием случайных возмущений, разработан метод стохастического динамического программирования. Метод очень эффективный, поскольку позволяет находить оптимальное управление параметрами упруго-диссипативных связей подвески экипажа как функцию оценок фазовых координат. Основная причина, препятствующая широкому распространению этого метода для линейных динамических систем со многими степенями свободы, связана с отсутствием программного обеспечения решения матричного нелинейного дифференциального уравнения типа Риккати, которое входит в алгоритм метода. Цель работы – разработать схемы моделирования для решения дифференциальных уравнений типа Риккати в системе моделирования МВТУ 3.7 (моделирование в технических устройствах). *Методика.* Система моделирования МВТУ 3.7 позволяет исследовать переходные процессы в сложных динамических системах и анализировать устойчивость колебательных процессов по фазовой траектории. Создается математическая модель динамической системы – дифференциальные уравнения, после – структурная схема модели и в среде МВТУ 3.7 строится схема моделирования. МВТУ 3.7 имеет графический редактор, поэтому схема моделирования собирается из блоков библиотеки, которая размещена на рабочем поле. Задаются параметры блоков, начальные условия, метод интегрирования, время моделирования, точность решения и др. Результаты моделирования выдаются в виде графиков. Кроме того, имеется текстовый редактор, с помощью которого фиксируются числовые данные результатов моделирования. Для решения дифференциальных уравнений типа Риккати структурная схема не нужна. *Результаты.* Создана схема моделирования для решения дифференциальных уравнений типа Риккати и получены корреляционные функции матрицы параметров оптимального фильтра. Выполнено моделирование

колебательного процесса кузова локомотива 2ТЭ10Л и фильтра. Установлено, что для локомотива 2ТЭ10Л не требуется создавать устройства активного управления параметрами упруго-диссипативных связей. **Научная новизна.** Создана методика решения дифференциальных уравнений в системе моделирования МВТУ 3.7. **Практическая значимость.** Устранена основная причина, которая препятствовала широкому распространению метода стохастического динамического программирования и тормозила развитие теории создания активных подвесок транспортных экипажей.

Ключевые слова: проектирование динамических систем, стохастическое динамическое программирование, дифференциальные уравнения типа Риккати, система моделирования

SOLUTION OF MATRIX DIFFERENTIAL RICCATI EQUATIONS IN THE MEDIUM OF MODELING SYSTEM OF MVTU 3.7

ERSHOVA N., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Applied Mathematics and Information Technologies. Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. 24-a Chernishevskogo st. 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 918-01-02, email: nersova107@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0198-0883

Annotation. Purpose. For the design of systems under the action of random perturbations, a method of stochastic dynamic programming has been developed. The method is very effective because it allows one to find the optimal control of the parameters of elastic-dissipative connections of the crew suspension as a function of estimating the phase coordinates. The main reason that hinders the widespread use of this method for linear dynamic systems with many degrees of freedom is related to the lack of software for solving the matrix non-linear differential equation of Riccati type, which is included in the algorithm of the method. The aim of the work is to develop modeling schemes for solving differential equations of Riccati type in the system of modeling MVTU 3.7 (modeling in technical devices). **The technique.** The simulation system of MVTU 3.7 allows studying transient processes in complex dynamic systems and analyzing the stability and stability of oscillatory processes along a phase trajectory. A mathematical model of a dynamic system is created - differential equations, after - a structural diagram of the model and in the environment of MVTU 3.7 a modeling scheme is constructed. MVTU 3.7 has a graphics editor, so the modeling scheme is assembled from library blocks, which is located on the working field. The block parameters, initial conditions, integration method, simulation time, solution accuracy, etc. are set. The simulation results are given in the form of graphs. In addition, there is a text editor that records the numerical data of the simulation results. To solve differential equations like Riccati, a structural scheme is not needed. **Results.** A simulation scheme was created for solving differential equations of Riccati type and correlation functions of the matrix of parameters of the optimal filter were obtained. The simulation of the oscillation process of the body of the 2TE10L locomotive and the filter was performed. It has been established that for the 2TE10L locomotive it is not required to create devices for actively controlling the parameters of elastic-dissipative links. **Naukova novelty.** A method for solving differential equations in the simulation system of MVTU 3.7 **Practical value.** The main reason that prevented the widespread use of the method of stochastic dynamic programming has been eliminated and has hampered the development of the theory of creating active suspensions of transport crews.

Keywords: dynamic systems design, stochastic dynamic programming, Riccati type differential equations, modeling system.

Вступ

В 70...80 роки минулого століття науковці і інженери усього світу займалися рішенням проблеми високошвидкісного руху транспортних екіпажів, об чому свідчать роботи [1, 2, 4...10]. Огляд історії розвитку активних підвісок наведено в роботі [6]. Для проектування систем, що знаходяться під дією випадкових обурень, розроблений метод стохастичного динамічного програмування. Метод дуже ефективний, оскільки дозволяє знаходити оптимальне управління параметрами пружно-диссипативних зв'язків підвіски екіпажу як функцію оцінок фазових координат. Шляхом моделювання доведено, що управління параметрами пружно-диссипативних зв'язків покращує динаміку транспортних екіпажів. Основна причина, перешкоджаюча широкому розповсюдженню цього методу для лінійних динамічних систем із багато ступенями свободи, пов'язана з відсутністю програмного забезпечення рішення матричного нелінійного диференціального рівняння типу Риккати, що входить в алгоритм методу.

Мета

Мета роботи – розробити схеми моделювання для рішення диференціальних рівнянь типу Риккати в системі моделювання МВТУ 3.7.

Методика

Найважливішою задачею функціонального проектування є пошук оптимальних значень внутрішніх параметрів об'єкту при заданій структурі, тобто параметрична оптимізація. Параметрична оптимізація об'єднує два важливі аспекти: постановка задачі і вибір методу її рішення.

Для проектування систем, що знаходяться під дією випадкових обурень, розроблений метод стохастичного динамічного програмування. Метод дуже ефективний, оскільки дозволяє знаходити оптимальне управління параметрів пружно-диссипативних зв'язків підвіски екіпажу як функцію оцінок фазових координат. Пряме застосування методу досить складно, тому є рішення тільки для

простих моделей [10]. Актуальною проблемою в 80-е роки минулого століття була розробка технічних прийомів, що дозволяють застосувати метод динамічного програмування для параметричного синтезу і визначення закону активного управління коливальними процесами транспортних екіпажів, представлених розрахунковими схемами із багатьма ступенями свободи.

Усунення причин, перешкоджаючих широкому розповсюдженню методу динамічного програмування при проектуванні систем класу, що розглядається, виконано наступними технічними прийомами [2; 6]:

- виконана декомпозиція методу динамічного програмування для безперервних стохастичних систем на більш прості методи, що дозволило розробити методологію поетапного проектування підвіски, придатну для створення екіпажів звичайного і високошвидкісного руху;
- введено обмеження на структуру системи, що передбачає використання лінійних і симетричних розрахункових схем;
- здійснений вибір вагових коефіцієнтів квадратичного функціонала якості відповідно до вимог санітарно-гігієнічних норм, що гарантує збереження здоров'я і працездатність водію і пасажирів;
- при параметричному синтезі і визначенні закону активного управління застосовані одні і ті ж розрахункові схеми екіпажу, що дозволяє на етапі проектування пасивної підвіски отримати матрицю параметрів зворотних зв'язків закону управління.

Методологія поетапного проектування підвіски полягає в наступному:

- проектується пасивна (традиційна) підвіска на основі методу динамічного програмування для безперервних детермінованих систем і аналізу динамічних показників екіпажу в робочому діапазоні швидкостей руху;
- перевіряється доцільність введення в пасивну підвіску пристроїв активного управління параметрами пружно-дисипативних зв'язків по алгоритму Калмана-Бьюси оцінки вектора стану системи при русі екіпажу по випадкових нерівностях дороги і приймається остаточне рішення про принцип дії підвіски;
- визначаються вихідні дані для розробки технічного завдання на проектування пристроїв активного управління по алгоритму методу стохастичного динамічного програмування, якщо ухвалено рішення про проектування активної підвіски.

Розглянемо можливість управління параметрами пружно-дисипативних зв'язків підвіски транспортного екіпажу. Диференціальне рівняння коливального процесу моделі екіпажу, представленої у виді динамічної системи з одним ступенем свободи, записується у виді

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = N(t)$$

$$\text{або } \ddot{z} + a_1\dot{z} + a_2z = n(t), \quad (1)$$

де $a_1 = b/m$; $a_2 = c/m$; $n(t) = N(t)/m$; m - маса кузова разом з пасажиром; c , b - відповідно жорсткість підвіски і коефіцієнт опору гасителів коливань, встановлених в підвісці екіпажу; z - лінійне переміщення центру мас кузова уздовж вертикальної осі; $N(t)$ - зовнішнє випадкове обурення з боку дороги.

Для переходу до алгоритму Калмана приводимо рівняння (1) до нормальної форми Коші. Приймаючи $x_1 = z$, $x_2 = \dot{z}$, маємо

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_2x_1 - a_1x_2 + n(t). \end{cases} \quad (2)$$

Допустимо в процесі руху екіпажу ведуться вимірювання переміщень і швидкостей центру мас кузова, тобто «наглядання» ведеться за всіма компонентами вектора стану досліджуваної системи.

В цьому випадку динамічна система представляється диференціальними рівняннями

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= FX(t) + LN(t); \\ Y(t) &= HX(t) + V(t), \end{aligned} \quad (3)$$

де $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ - вектор стану системи;

$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}$ - матриця параметрів системи;

$N = \begin{bmatrix} 0 \\ n(t) \end{bmatrix}$ - вектор зовнішніх обурень;

$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ - одинична матриця при векторі $N(t)$;

$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ - одинична матриця характеризує зв'язок наглядаемого вектора Y з вектором стану;

$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ - вектор помилок вимірювань компонент вектора стану.

Для визначення кореляційної матриці помилки оцінки $K(t)$ скористаємося рівнянням Ріккати

$$\frac{dK}{dt} = FK(t) + K(t)F' - K(t)H'R^{-1}HK(t) + LQL', \quad (4)$$

де $K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$; $Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}$; $R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ -

дисперсійні матриці відповідно обурень і помилок вимірювань компонент вектора стану.

Підставляючи матриці в рівняння (4) і виконуючи матричні операції, отримаємо систему

диференціальних рівнянь Ріккати

$$\begin{aligned} \dot{K}_{11} &= 2K_{12} - K_{11}^2/r_1 - K_{12}^2/r_2; \\ \dot{K}_{12} &= K_{22} - a_2K_{11} - a_1K_{12} - K_{11}K_{12}/r_1 - K_{12}K_{22}/r_2; \\ \dot{K}_{22} &= -2(a_2K_{12} + a_1K_{22}) - K_{12}^2/r_1 - K_{22}^2/r_2 + q. \end{aligned} \quad (5)$$

Коефіцієнт розузгодження фільтра визначається з вираження

$$p(t) = K(t)H'R^{-1} = \begin{bmatrix} K_{11}/r_1 & K_{12}/r_2 \\ K_{21}/r_1 & K_{22}/r_2 \end{bmatrix}.$$

Тоді матриця параметрів оптимального фільтра бути мати вид

$$F_{opt} = F - p(t)H = \begin{bmatrix} -K_{11}/r_1 & 1 - K_{12}/r_2 \\ -a_2 - K_{12}/r_1 & -a_1 - K_{22}/r_2 \end{bmatrix}.$$

Аналізуючи матрицю параметрів оптимального фільтра, приходимо до висновку, що в даному випадку повинна змінюватися жорсткість і коефіцієнт опору гасителів коливальних. Якщо значення кореляційних функцій будуть наближатися або рівні нулю, то задана система буде близька до оптимальної.

$$F_{opt} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}.$$

Характеристичне рівняння оптимального фільтра

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} A_1 - \lambda & A_2 \\ A_3 & A_4 - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad \text{або} \\ \lambda^2 - (A_1 + A_4)\lambda + A_1A_4 - A_2A_3 &= 0. \end{aligned}$$

Отже, жорсткість і коефіцієнт опору гасителів коливальних можуть бути визначені по формулах

$$\begin{aligned} c &= m(A_1A_4 - A_2A_3) \\ b &= -m(A_1 + A_4). \end{aligned} \quad (6)$$

Для отримання числових значень параметрів необхідно вирішити систему рівнянь Ріккати на комп'ютері і підставити в (6) значення, відповідні сталому процесу.

Отримаємо матрицю оптимального фільтра для моделі тепловоза 2ТЕ10Л, урахувавши те, що в процесі руху локомотива ведеться наглядання за швидкістю переміщень центру мас кузова.

Диференціальне рівняння коливального процесу моделі екіпажу

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = N(t) \quad \text{або} \quad \ddot{z} + a_1\dot{z} + a_2z = n(t),$$

де $a_1 = b/m = 3,46$; $a_2 = c/m = 133$; $n(t) = N(t)/m$; $m = 129$ т; $N(t)$ – зовнішнє випадкове обурення з боку путі.

Приймаючи $x_1 = z$, $x_2 = \dot{z}$, переходимо до запису в нормальній формі Коші

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -133x_1 - 3,46x_2 + n(t). \end{cases}$$

Представимо модель відповідно до методу Калмана-Бьюси

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= FX(t) + LN(t); \\ Y(t) &= HX(t) + V(t), \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -133 & -3,46 \end{bmatrix}; N = \begin{bmatrix} 0 \\ n(t) \end{bmatrix}; \\ L &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; V = \begin{bmatrix} 0 \\ v_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для визначення кореляційної матриці помилки оцінки $K(t)$ скористаємося рівняннями Ріккати

$$\frac{dK}{dt} = FK(t) + K(t)F' - K(t)H'R^{-1}HK(t) + LQL',$$

де

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}; R^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/r_2 \end{bmatrix}.$$

Система рівнянь Ріккати для цього випадку

$$\begin{aligned} \dot{K}_{11} &= 2K_{12} - K_{12}^2/r_2; \\ \dot{K}_{12} &= K_{22} - a_2K_{11} - a_1K_{12} - K_{12}K_{22}/r_2; \\ \dot{K}_{22} &= -2(a_2K_{12} + a_1K_{22}) - K_{22}^2/r_2 + q. \end{aligned} \quad (7)$$

Рішення системи рівнянь (7) виконується в системі моделювання МВТП 3.7. Схема моделювання представлена на малюнку 1.

Позначення до малюнку 1:

$$\begin{aligned} b1 &= K_{12}^2/r_2; b2 = K_{12} \cdot K_{22}/r_2; b3 = K_{22}^2/r_2; \\ b4 &= 1/r_2; c1 = 2a_1; c2 = 2a_2. \end{aligned}$$

Приймаємо $r_2 = 0,002 \text{ м}^2/\text{с}^2$; $q = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}^4$;

$K(t_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,005 \end{bmatrix}$. Процес рішення рівнянь Ріккати бістросбіжний. В сталому режимі при $t=1$ с отримано: $K_{11}=0,000191$; $K_{12}=0$; $K_{22}=0,02545$ (рис. 2-4).

Коефіцієнт розузгодження фільтра

$$p(t) = K(t)H'R^{-1} = \frac{1}{r_2} \begin{bmatrix} 0 & K_{12} \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix}.$$

Матриця параметрів оптимального фільтра

$$F_{opt} = F - p(t)H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -133 & -16,185 \end{bmatrix}.$$

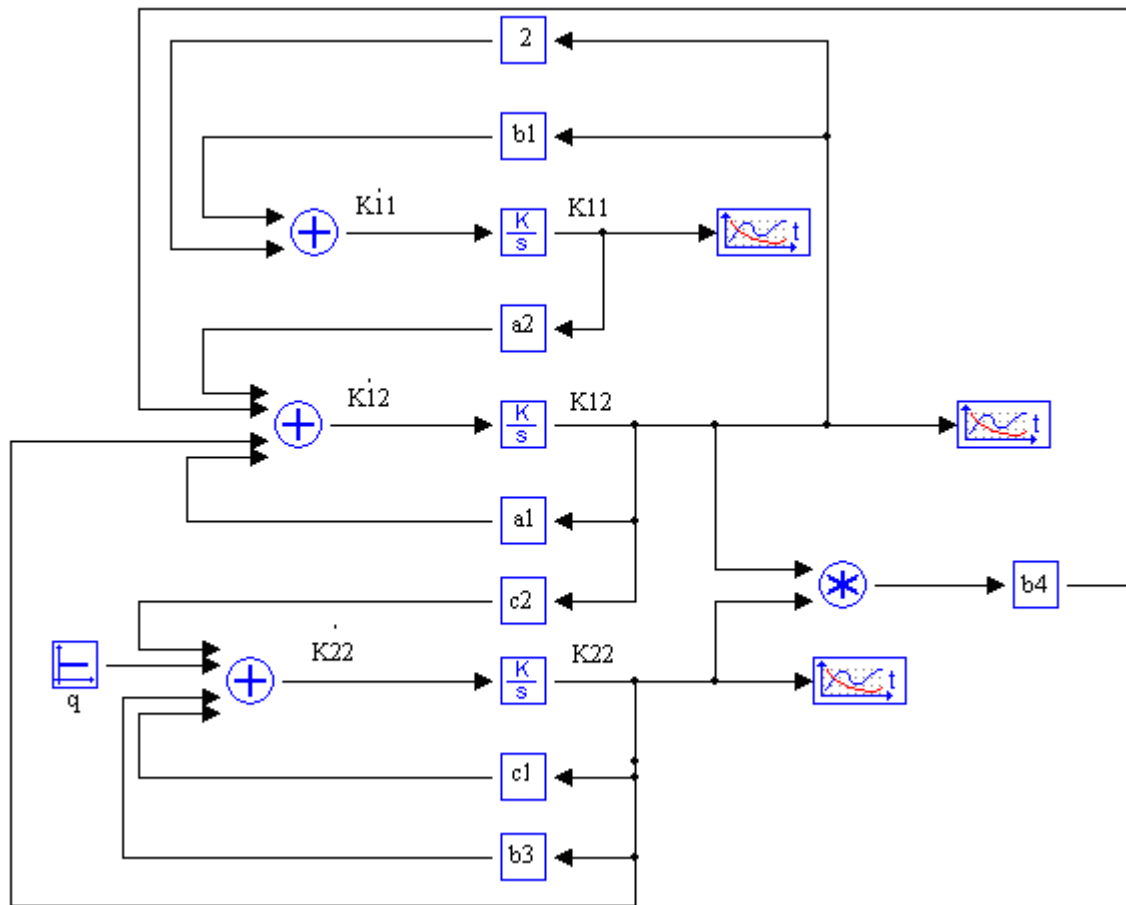


Рис. 1. Схема моделювання для рішення системи рівнянь (7) / Simulation scheme for solving the system of equations (7)

Порівнюючи матриці параметрів заданої системи і оптимального фільтра, помічаємо, що значно змінилося значення коефіцієнта, пов'язаного з роботою гасителя коливань.

Схема моделювання для дослідження коливань екіпажу при випадковому обуренні представлена на рисунку 9.

Технологія роботи в середовищі МВТП 3.7 розглянута на конкретних прикладах в працях [2; 3].

В процесі моделювання отримано:

- графіки прискорень центру мас кузова 2ТЕ10Л (рис. 5) і фільтра (рис. 7);
- графіки переміщень центру мас кузова 2ТЕ10Л (рис. 6) і фільтра (рис. 8);
- максимальні значення амплітуд прискорень і переміщень центру мас кузова 2ТЕ10Л і фільтра.

В таблиці 1 приведені максимальні значення переміщень і прискорень центру мас кузова у перехідному і сталому режимах. Аналіз результатів моделювання показує, що у сталому режимі руху динамічні показники локомотива 2ТЕ10Л і фільтра мало відрізняються. Отже, не потрібно створювати пристрої активного управління.

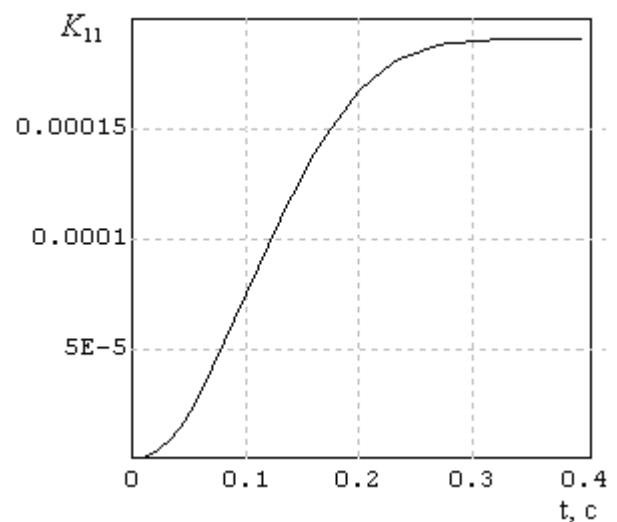


Рис. 2. Кореляційна функція K_{11} / Correlation function K_{11}

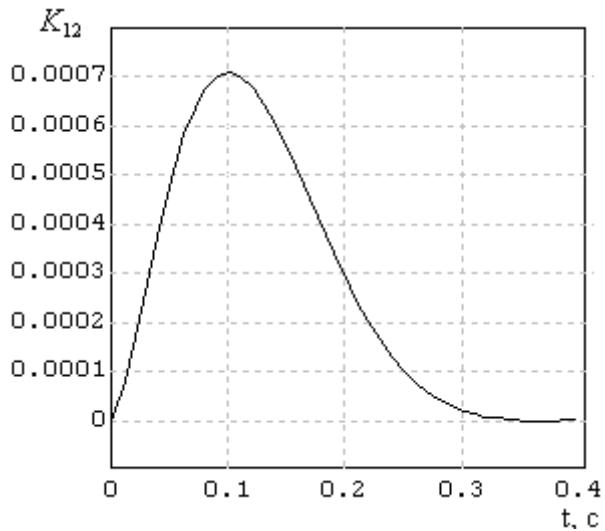


Рис. 3. Кореляційна функція K_{12} / Correlation function K_{12}

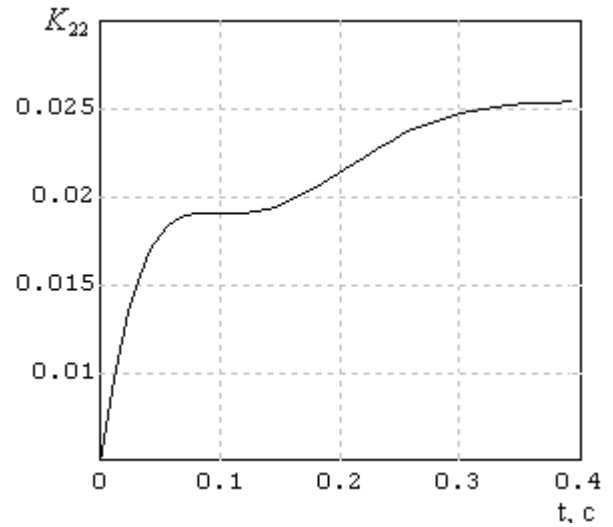


Рис. 4. Кореляційна функція K_{22} / Correlation function K_{22}

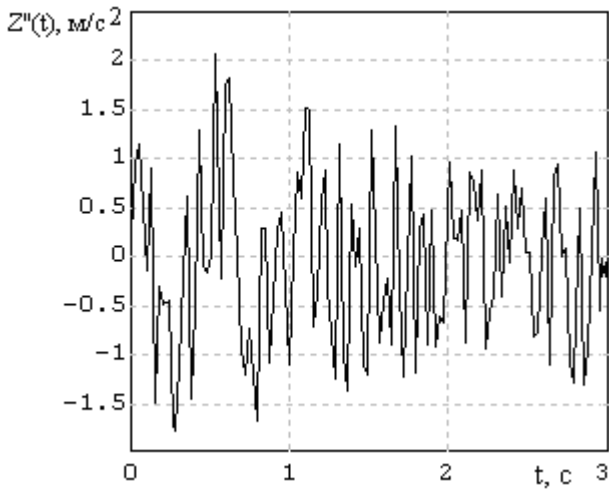


Рис. 5. Графік прискорень центру мас кузова 2ТЕ10Л / Graph of acceleration of center of mass of body 2ТЕ10Л

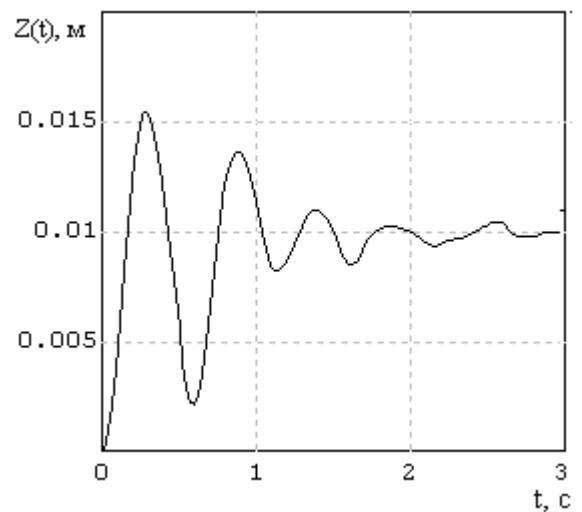


Рис. 6. Графік переміщень центру мас кузова 2ТЕ10Л / Graph of displacements of center of mass of body 2ТЕ10Л

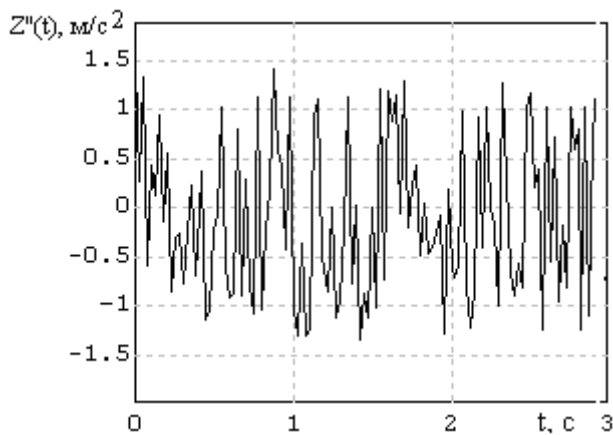


Рис. 7. Графік прискорень центру мас фільтра / Graph of acceleration of the filter center of mass

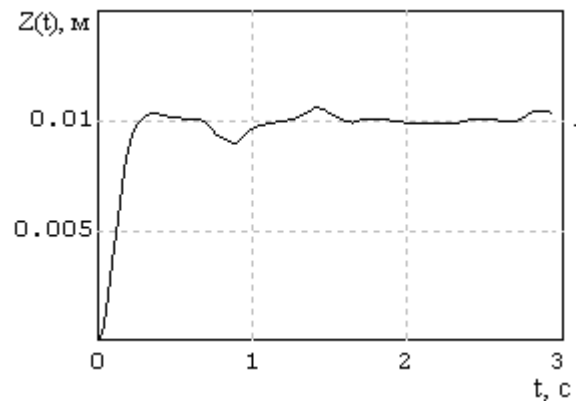


Рис. 8. Графік переміщень центру мас фільтра / Graph of displacements of the filter center of the mass

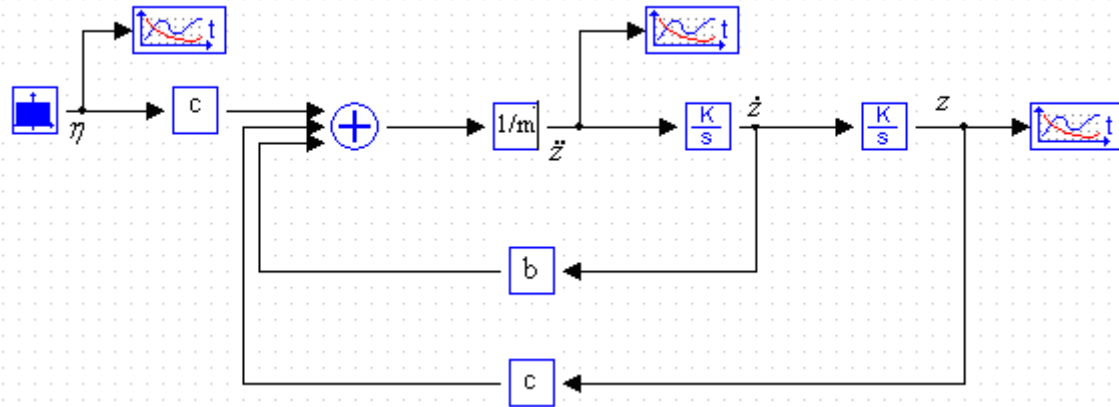


Рис. 9. Схема моделювання / Modeling scheme

Таблиця 1

Результати моделювання / Modeling results

Процес	Перехідний		Сталій	
	$z, \text{ м}$	$\ddot{z}, \text{ м/с}^2$	$z, \text{ м}$	$\ddot{z}, \text{ м/с}^2$
2ТЕ10Л	0,0169	1,92	0,0112	0,98
фільтр	0,0109	1,67	0,01	0,945

Результати

Збудовані схеми моделювання для рішення систем нелінійних диференціальних рівнянь типу Ріккати в середовищі системи моделювання МВТП 3.7 у випадку управління параметрами дисипативних, пружних зв'язків та загального управління. Отримані кореляційні функції матриці параметрів оптимального фільтра. Виконано моделювання коливального процесу кузова локомотива 2ТЕ10Л і фільтра. Установлено, що для локомотива 2ТЕ10Л не потрібно створювати пристрої активного управління параметрами пружно-дисипативних зв'язків.

Наукова новизна і практична значимість

Створена методика рішення диференціальних рівнянь типу Ріккати в системі моделювання МВТП 3.7. Усунена основна причина, яка перешкоджала широкому розповсюдженню методу стохастичного динамічного програмування і гальмувала розвиток теорії створення активних підвісок транспортних екіпажів. В теперішній час мається усе для розробки

активних підвісок, які здатні забезпечити потрібні динамічні показники екіпажу при значній збільшенні швидкості руху.

Висновки

На основі виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1. В середовищі системи моделювання МВТП 3.7 необхідно створити бібліотеку стандартних модулів рішення диференціальних рівнянь для дослідження коливальних процесів транспортних екіпажів.
2. Систему моделювання МВТП 3.7 можна використовувати для вибору оптимальних параметрів пружно-дисипативних зв'язків пасивної підвіски.
3. Для складних динамічних систем потрібно будувати укрупнені структурні схеми і схеми моделювання. Стійкість коливальних процесів в системі визначається по перехідній характеристиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси: пер. с нем / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – Москва: Наука, 1982. – 200 с.
2. Ершова Н. М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: Монография / Н. М. Ершова. – Д.: ПГАСА, 2016. – 282 с.
3. Системы автоматического регулирования: практикум по математическому моделированию / под ред. Б. А. Карташова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ростов на Дону: Феникс, 2015. – 458 с.
4. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К. Т. Леондеса. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1980. – 407 с.
5. Хедрик Дж. К. Активные системы подвешивания железнодорожного подвижного состава / Дж. К. Хедрик: пер. с англ. // Железные дороги мира, 1982. – № 11.
6. Ershova N. Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages / Ershova N., Bondarenko I., Shibko O., Velmagina N. // Eastern-European Journal of enterprise technologies - № 3/7 (93), 2018. – pp. 53-63.

7. Goodall R. M. Active Controls in Ground Transportation – A Review of the State-of- the Art and Future Potential / R. M. Goodall, W. Kortum // *Vehicle System Dynamics*. – 1983. – Vol. 12, iss. 4/5. – P. 225 – 257.
8. Jindai Kunio. Active control for rail vehicle vibration / Jindai Kunio, Okamoto Isao, Kasai Kenjiro, Kakehi Yutaka, Terado Katsuyuki, Iwasaki Fumio, Huxohkukaurakkaucu // *The Japan Society of Mechanical Engineers : Bulletin of the JSME*. – 1982. – Vol. 85, iss. 764.
9. Karnopp D. Active Damping in Road vehicle Suspension Systems / D. Karnopp // *Vehicle Systems Dynamics*. – 1983. – Vol. 12, iss. 6. – P. 291 – 331.
10. Yoshimura T. An active vertical suspension for track/vehicle Systems / T. Yoshimura, N. Ananthanarayana, D. Deepak // *Journal of Sound and Vibration*. – 1986. – Vol. 106, iss. 2. – P. 217 – 225.

REFERENCES

1. Brammer K. and Ziffing G. *Filtr Kalmana-Biusi* [Kalman-Bucy Filter]. Moscow: Nauka, 1982, 200 p. (in Russian).
2. Yershova N.M. *Sovremennyye metody teorii proektirovaniya i upravleniya slozhnyimi dinamicheskimi sistemami* [Modern methods of the theory of design and management of complex dynamic systems]. Dnepr: PGASA, 2016, 282 p. (in Russian).
3. Kartashov B.A. *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya: praktikum po matematicheskomu modelirovaniyu* [Automatic control systems: a workshop on mathematical modeling]. Rostov na Donu: Feniks, 2015, 458 p. (in Russian).
4. Leondes K.T. *Filtratsiya i stokhasticheskoe upravleniye v dinamicheskikh sistemakh* [Filtering and stochastic control in dynamic systems]. Moscow: Mir, 1980, 407 p. (in Russian).
5. Khedrik Dzh. K. *Aktivnye sistemy podveshivaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Active suspension systems for railway rolling stock]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 1982, no. 11. (in Russian).
6. Ershova N., Bondarenko I., Shibko O. and Velmagina N. Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages / *Eastern-European Journal of enterprise technologies*. Kharkov, no.3/7 (93), 2018. – pp. 53 - 63.
7. Goodall R.M. and Kortum W. *Active Controls in Ground Transportation – A Review of the State-of- the Art and Future Potential*. *Vehicle System Dynamics*, 1983, vol. 12, iss. 4/5, pp. 225 – 257.
8. Jindai Kunio, Okamoto Isao, Kasai Kenjiro, Kakehi Yutaka, Terado Katsuyuki, Iwasaki Fumio and Huxohkukaurakkaucu *Active control for rail vehicle vibration*. *The Japan Society of Mechanical Engineers*. Bulletin of the JSME, 1982, vol. 85, iss. 764.
9. Karnopp D. *Active Damping in Road vehicle Suspension Systems*. *Vehicle Systems Dynamics*, 1983, vol. 12, iss. 6, pp. 291 – 331.
10. Yoshimura T., Ananthanarayana N. and Deepak D. *An active vertical suspension for track/vehicle Systems*. *Journal of Sound and Vibration*. 1986, vol. 106, iss. 2, pp. 217 – 225.