УДК 621.873:531.3 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-91-93

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРЕЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРАНОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Мунзаров И.Н.
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург;
ООО «Ремонт Путевой Техники Групп», Москва

Ключевые слова: железнодорожный кран, стреловое оборудование, динамическое нагружение, годограф ускорений, аппроксимирующий эллипсоид, предиктивная диагностика, дескриптор состояния.

Аннотация. В статье представлена пространственная численная математическая модель бимодального колебательного движения телескопически сочлененной системы элементов стрелового оборудования железнодорожных самоходных кранов. Рассмотрены динамические процессы при нештатных режимах эксплуатации: внезапном снятии нагрузки, просадке элементов опорного контура и раскачивании груза. Предложен метод предиктивной диагностики несущих элементов конструкции на основе вычисления параметров аппроксимирующего эллипсоида пространственного годографа вектора ускорения в характерных точках металлоконструкции.

MATHEMATICAL MODELING OF SPATIAL VIBRATIONS OF RAILWAY CRANE JIB EQUIPMENT FOR PREDICTIVE DIAGNOSTICS PROBLEMS

Munzarov I.N.
Emperor Alexander I Saint-Petersburg state transport university, Saint-Petersburg;
LLC «Remont Putevoy Tekhniki Group», Moscow

Keywords: railway crane, jib equipment, dynamic loading, acceleration hodograph, approximating ellipsoid, predictive diagnostics, state descriptor.

Abstract. The paper presents a spatial numerical mathematical model of bimodal vibrational motion of a telescopically articulated system of elements of railway self-propelled cranes jib equipment. Dynamic processes under emergency operating conditions are considered: sudden load release, subsidence of support contour elements, and load swinging. A method for predictive diagnostics of load-bearing structural elements based on calculating the parameters of the approximating ellipsoid of the spatial acceleration vector hodograph at characteristic points of the metal structure is proposed.

Введение. Стреловые самоходные краны на железнодорожном ходу (ЖССК) представляют собой ключевое средство механизации при ликвидации последствий аварийных ситуаций и выполнении восстановительных работ на железных дорогах [1]. Специфика их эксплуатации связана с размещением опорного контура на ограниченной и часто податливой площадке земляного полотна [2]. Согласно статистике и аналитическим исследованиям, до 80% отказов тяжелых грузоподъемных машин вызваны динамическими нагрузками, возникающими при нештатных ситуациях (просадка аутригеров, обрыв канатного подвеса, инерционные забросы). Традиционные одномерные системы контроля не позволяют оценивать пространственное напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции [3]. В связи с этим актуальна разработка методов предиктивной диагностики на основе анализа пространственно-временных характеристик колебаний несущих металлоконструкций [4].

Математическое моделирование динамики ЖССК

Для исследования переходных процессов разработана пространственная структурно-функциональная конечно-элементная модель системы «гибкий подвес груза – телескопическая стрела – опорный контур – грунт».

Стреловое оборудование рассматривается как система сопряженных сжато-изогнутых стержней ступенчатой жесткости с учетом нелинейных жесткостных характеристик в направляющих узлах и гидроцилиндрах телескопирования [5]. Динамическое поведение системы описывается уравнениями движения в нестационарной постановке:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K(u) \cdot u(t) = F(t),$$

где M – глобальная матрица масс; C – матрица демпфирования; $K(u)$ – матрица нелинейной жесткости; $u(t)$ – вектор пространственных перемещений узлов; $F(t)$ – вектор внешних динамических воздействий.

Моделирование инерционного заброса секций при обрыве груза показало, что потенциальная энергия упругой деформации стрелы переходит в кинетическую с формированием волнового процесса соударений в телескопических сопряжениях. При этом напряжения в шарнире гидроцилиндра подъема стрелы достигают $2{,}3 \cdot 10^6$ Н/м^2, а амплитуды свободных колебаний гильзы гидроцилиндра телескопирования – до 58 мм [6]. При просадке аутригера крановая рама балансирует на диагональных опорах, вызывая импульсные нагрузки в шарнирах флюгеров до $3{,}75 \cdot 10^8$ Н/м^2 [7].

Метод предиктивной диагностики по годографу ускорений

Анализ показал, что возникновение локальных дефектов (трещины, потеря устойчивости стенок, скручивание, остаточный изгиб) изменяет модальные свойства конструкции и трансформирует траекторию пространственного движения характерных точек – годограф вектора ускорения $a(t) = \left[a_x(t), a_y(t), a_z(t)\right]^T$ [6].

Для снижения вычислительной сложности предлагается перейти от прямых временных рядов к их компактным интегральным дескрипторам – параметрам аппроксимирующего трехмерного эллипсоида [7]. Дискретное облако точек p_i в трехмерном пространстве центрируется путем вычитания радиус-вектора центра масс облака $\bar{p} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T$:

$$q_i = p_i - \bar{p}, \quad i = 1, \ldots, n,$$

где n – общее число отсчетов.

Полученное центрированное облако точек q_i описывается эмпирической ковариационной матрицей:

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} q_i \, q_i^T .$$

Спектральное разложение ковариационной матрицы $C = V \Lambda V^T$ определяет собственные значения $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ (квадраты полуосей аппроксимирующего эллипсоида a, b, c) и матрицу собственных векторов $V = [v_1, v_2, v_3]$, задающую ортогональную матрицу поворота R. Каждому годографу ставится в соответствие интегральный дескриптор состояния:

$$\varepsilon = \{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z};\ a, b, c;\ v_1, v_2, v_3\}.$$

Минимально достаточный набор контрольных точек включает: τ_1 – оголовок стрелы; τ_2 – середина пролета концевой секции; τ_3 – узел телескопического сочленения.

Идентификация дефектов

Оценка схожести текущей конфигурации ε с эталонной дефектной конфигурацией ε_{ref} выполняется на основе трех геометрических критериев:

1. Евклидово расстояние между центрами эллипсоидов: $\Delta_c = \|\bar{p} - \bar{p}_{\text{ref}}\|_2$.

2. Логарифмическая разность размеров полуосей:

$$\Delta_s = \left|\ln\frac{a}{a_{\text{ref}}}\right| + \left|\ln\frac{b}{b_{\text{ref}}}\right| + \left|\ln\frac{c}{c_{\text{ref}}}\right|.$$

3. Норма Фробениуса разности ориентаций нормированных матриц квадратичных форм: $\Delta_o = \|\hat{A} - \hat{A}_{\text{ref}}\|_F$, где $A = RD^{-1}R^T$.

Итоговый интегральный индекс схожести определяется выражением:

$$S(t) = w_c e^{\left(-\frac{\Delta_c}{\sigma_c}\right)} + w_s e^{\left(-\frac{\Delta_s}{\sigma_s}\right)} + w_o e^{\left(-\frac{\Delta_o}{\sigma_o}\right)},$$

где $w_c + w_s + w_o = 1$.

Экспериментальная верификация на восстановительном кране «Сокол-80.01» с использованием трехкомпонентных акселерометров MPU-9250 и специализированного ПО подтвердила высокую сходимость теоретических и натурных данных [6, 7].

Заключение

Разработанная пространственная динамическая модель и метод аппроксимации годографов ускорений пространственными эллипсоидами позволяют с высокой точностью идентифицировать появление и характер развития структурных дефектов стрелового оборудования ЖССК. Метод характеризуется низкой вычислительной сложностью и адаптирован для реализации в бортовых системах непрерывного мониторинга и предиктивной диагностики подъемно-транспортных машин.

Список литературы

1. Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник. – М.: Высшая школа, 2000. – 552 с.
2. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. – 3-е изд., перераб., доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. – 454 с.
3. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины строительного производства. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.
4. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1963. – 231 с.
6. Мунзаров И.Н., Воробьев А.А., Ватаев А.С., Ватулин Я.С., Майоров В.С. Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи // Бюллетень результатов научных исследований. – 2026. – №1. – С. 112-127. – DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-112-127.
7. Титова Т.С., Воробьёв А.А., Мунзаров И.Н., Бороненко Ю.П., Кононов Д.П. Определение остаточного ресурса стреловых самоходных кранов с учётом наличия повреждений усталостного характера // Грузовик. – 2026. – № 2. – С. 42-53. – DOI: 10.36652/1684-1298-2026-2-42-53.

Сведения об авторе:

Мунзаров Илшат Назибович – аспирант, директор по безопасности движения и техническому контролю.