

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Елисеев А.В., Миронов А.С.

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

Ключевые слова: вибрационная машина, резонансный режим, минимизация кривизны, динамическая податливость, виброизоляция, механическая колебательная система, структурное математическое моделирование, графоаналитический метод.

Аннотация. Рассматривается проблема оценки, формирования и коррекции динамического качества резонансных режимов работы вибрационных технологических машин для уплотнения бетонных смесей. Цель работы – разработка метода условной оптимизации параметров механической колебательной системы с двумя степенями свободы, обеспечивающего максимальную ширину резонансного пика амплитудно-частотной характеристики при выполнении требований к резонансной частоте и амплитуде динамической податливости рабочего органа, а также коэффициенту вибрационной передачи на опорную поверхность. Используется методология структурного математического моделирования, позволяющая представлять механическую колебательную систему в виде динамически эквивалентной схемы системы автоматического управления и анализировать её с помощью передаточных функций. Для решения задачи предложен графоаналитический подход к минимизации энергетического функционала, характеризующего кривизну амплитудно-частотной характеристики в точке резонанса. В результате численного эксперимента для вибростенда уплотнения бетонной смеси определены оптимальные параметры, обеспечивающие увеличение ширины резонансного пика амплитудно-частотной характеристики в 8 раз при условии выполнения динамических и виброизоляционных требований. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность повышения динамического качества резонансных режимов без ухудшения их основных эксплуатационных показателей.

CONTROL OF RESONANT MODE QUALITY IN A VIBRATION MACHINE SUBJECT TO VIBRATION ISOLATION REQUIREMENTS

Eliseev A.V., Mironov A.S.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk

Keywords: vibration machine, resonance mode, minimizing curvature, dynamic compliance, vibration isolation, mechanical oscillatory system, structural mathematical modeling, graphoanalytical method.

Abstract. The problem of evaluation, formation and correction of the dynamic quality of resonant operating modes of vibrating technological machines for compaction of concrete mixtures is considered. The aim of the work is to develop a method for conditional optimization of the parameters of a mechanical oscillatory system with two degrees of freedom, which ensures the maximum width of the resonant peak of the amplitude-frequency response while meeting the requirements for the resonant frequency and amplitude of dynamic compliance of the working body, as well as the coefficient of vibration transmission to the support surface. The methodology of structural mathematical modeling is used, which makes it possible to represent a mechanical oscillatory system as a dynamically equivalent circuit of an automatic control system and analyze it using transfer functions. To solve the problem, a graphoanalytical approach to minimizing the energy functional characterizing the curvature of the amplitude-frequency response at the resonance point is proposed. As a result of a numerical experiment, optimal parameters have been determined for a concrete compaction stand that ensure an 8-fold increase in the width of the resonant peak of the amplitude-

frequency response, provided that dynamic and vibration-proofing requirements are met. The results obtained demonstrate the fundamental possibility of improving the dynamic quality of resonant modes without compromising their basic performance.

Введение. Вибрационные машины, работающие в резонансном режиме, широко распространены в промышленности благодаря высокой энергоэффективности [1]. Однако ключевым недостатком таких систем является неустойчивость резонанса, вызванная узкой полосой резонансного пика амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Традиционные методы расширения полосы, например, увеличение демпфирования, неприемлемы, так как снижают амплитуду колебаний рабочего органа [2]. Актуальной является задача увеличения ширины резонансного пика при одновременном выполнении требований к амплитуде колебаний и уровню виброизоляции. Данное исследование посвящено решению этой задачи методами параметрической оптимизации.

I. Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассмотрена двухмассовая вибрационная система [4]. Динамика системы описывается матричным уравнением Лагранжа II рода:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = Q, \quad (1)$$

где M – матрица масс, B – матрица демпфирования, K – матрица жесткости, x – вектор обобщенных координат, Q – вектор силовых возмущений.

Использована методология структурного математического моделирования [3], позволяющая представить механическую систему в виде эквивалентной системы автоматического управления и анализировать ее через передаточные функции. Динамическое качество оценивается по основе амплитудно-частотной характеристики динамической податливости рабочего органа $A_2(\omega)$, а так же на основе коэффициента вибрационной передачи внешнего возмущения на основание $R_1(\omega)$.

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти параметры системы $\{m_1, m_2, b_0, b_1, k_0, k_1\}$, обеспечивающие заданную резонансную частоту $\omega_{\text{res}} = C_0$, заданную амплитуду динамической податливости рабочего органа на резонансной частоте $A_2(\omega_{\text{res}}) = C_1$ и заданный уровень виброизоляции $R_1(\omega_{\text{res}}) = R_{01}$, где m_1 и m_2 – массы твердых тел системы, b_0 и b_1 – коэффициенты демпфирования, k_0 и k_1 – жесткости, C_0 , C_1 , R_{01} – постоянные. Критерием оптимизации является минимизация кривизны амплитудно-частотной характеристики $A_2(\omega)$ в точке резонанса, что служит локальным аналогом определения максимальной ширины резонансного пика:

$$(A_2''(\omega_{\text{res}}))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\omega_{\text{res}} = C_0, A_2(\omega_{\text{res}}) = C_1, R_1(\omega_{\text{res}}) = R_{01}$$

Для решения задачи предложен графоаналитический подход, основанный на анализе зависимостей целевой функции от варьируемых параметров при фиксированных ограничениях.

II. Результаты и обсуждение. В результате численного эксперимента для вибростенда уплотнения бетонной смеси определены оптимальные параметры (табл. 1).

Табл. 1. Результаты оптимизации параметров системы

Названия параметров	Исходные значения	Оптимальные значения
m_1 , кг	100	975
m_2 , кг	1000	300
b_0 , Н с/м	80	80
b_1 , Н с/м	800	1079,4
k_0 , Н/м	10^6	10^6
k_1 , Н/м	10^7	$1,26 \cdot 10^6$
$(dA_2/d\omega)^2$	$1,86 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$
$(d^2A_2/d\omega^2)^2$	1,117	0,001
$(dA_2/d\omega)^2 + \delta(d^2A_2/d\omega^2)^2$	$1,004 \cdot 10^{-8}$	$1,295 \cdot 10^{-12}$
Ширина резонансного пика, рад/с	0,073	0,708

Оптимизация позволила увеличить ширину резонансного пика в 8 раз. Анализ амплитудно-частотных характеристик показал, что форма пика стала более полой при сохранении требуемой резонансной амплитуды и частоты (рис. 1). Аналогично, коэффициент вибропередачи остался на требуемом уровне.

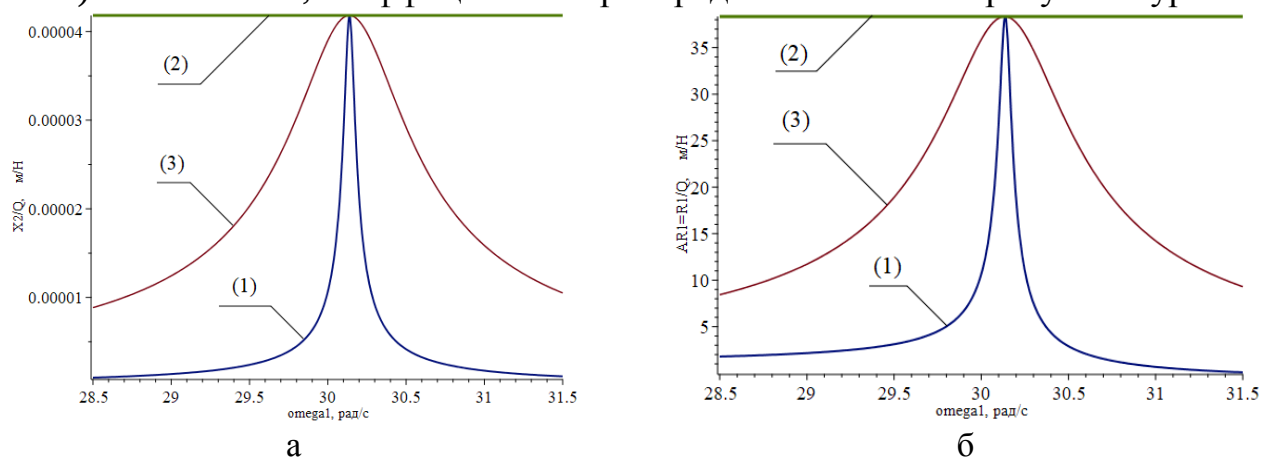


Рис. 1. Сравнение оптимальных и исходных амплитудно-частотных характеристик: а – характеристика рабочего органа (1 – исходная система, 2 – требуемый уровень амплитуды, 3 – оптимизированная система), б – опорная реакция, отображающая особенности виброизоляции (1 – исходная система, 2 – требуемый уровень амплитуды, 3 – оптимизированная система)

Таким образом, представленные результаты наглядно демонстрируют эффективность предложенного графоаналитического метода. Установлено, что за счет целенаправленного изменения параметров системы удастся достичь кардинального преобразования форм амплитудно-частотных характеристик, отображающих динамическое качество резонансных режимов. Полученная пологая характеристика (кривая 3 на рис. 1, а) свидетельствует о значительном повышении устойчивости резонансного режима к разбросу параметров и колебаниям частоты возбуждения. Комплексный подход к оптимизации гарантирует соблюдение всех заданных эксплуатационных требований, что подтверждается соответствием характеристик виброизоляции установленному нормативному уровню (кривая 2, рис. 1, б).

Заключение. Разработан метод оптимизации параметров резонансных вибрационных машин, направленный на повышение устойчивости рабочего режима без ухудшения основных эксплуатационных показателей. Научная новизна заключается в комплексной постановке задачи, учитывающей требования к виброизоляции, и использовании кривизны в качестве критерия ширины резонансного пика. Практическая значимость подтверждена результатами численного эксперимента, показавшими кратное увеличение ширины резонансного пика. Перспективы исследований связаны с учетом нелинейных эффектов и адаптацией метода для систем с большим числом степеней свободы.

Список литературы

1. Panovko G.Ja., Shokhin A. Resonant adjustment of vibrating machines with unbalance vibroexciter. problems and solutions // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020, vol. 154, pp. 51-62.
2. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, №2. – С. 164-172.
3. Eliseev A.V., Kuznetsov N. K. Mathematical Modeling in Machine Transport Dynamics. – IGI Global Scientific Publishing, 2025. – 330 p. – doi.org/10.4018/979-8-3373-0447-2.
4. Елисеев А.В., Миронов А.С. Графоаналитический метод синтеза параметров двухмассной резонансной системы с заданной амплитудно-частотной характеристикой // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2025. – № 49. – С. 30-36.

Сведения об авторах:

Елисеев Андрей Владимирович – к.т.н., доцент кафедры математики;

Миронов Артем Сергеевич – соискатель, НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования.