

УДК: 534.134
OECD: 1.03

Исследование виброактивности приводов рольганговых механизмов

Кедрова Е.И.¹, Матвеев П.В.²

¹Старший преподаватель кафедры «Инжиниринг и менеджмент качества»,

²К.т.н., доцент, доцент кафедры «Электротехника»,

^{1,2}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В работе были рассмотрены роликовые конвейеры, с опорой подвижных частей конвейера на шариковые подшипники и с приводом различных типов передач. Актуальность работы обусловлена необходимостью соблюдения санитарно-гигиенических требований к шумовому воздействию промышленного оборудования и необходимостью прогнозирования акустических характеристик на ранних стадиях проектирования. Для прогнозирования уровня шума, возникающего на практике, был проведен цифровой эксперимент, для которого были выбраны инструменты исследования и построена цифровая модель исследуемого объекта. На первом этапе произведен выбор специализированного программного обеспечения для моделирования, позволяющего учитывать взаимосвязь механических, динамических и акустических процессов. Основным инструментом стало САЕ-решение, основанное на методе конечных элементов (МКЭ). Затем была построена детализированная цифровая модель исследуемого конвейерного модуля в двух исполнениях – с цепной и ременной передачей. Сравнительный анализ шумовых характеристик показал различия в уровне шума между двумя моделями. Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать тип передачи с учетом требуемых акустических и эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: роликовый конвейер, конвейерный узел, ременная передача, цепная передача, цифровая модель, модальный анализ

Investigation of vibration activity of roller conveyer drives

Kedrova E.I.¹, Matveev P.V.²

¹*Senior Lecturer of the Department of Quality Engineering and Management,*

²*Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering,*

^{1,2}*Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

This paper investigates roller conveyors equipped with ball bearings and different drive types. The research is motivated by the imperative to meet sanitary-hygienic standards for industrial noise emissions and the need for reliable prediction of acoustic performance during the initial design phases. To forecast operational noise levels, a numerical experiment was performed, involving the selection of appropriate simulation tools and the development of a digital twin of the conveyor system. The initial phase involved selecting specialized simulation software capable of modeling the coupled mechanical, dynamic, and acoustic phenomena.

The core analytical tool was a CAE (Computer-Aided Engineering) platform utilizing the Finite Element Method (FEM). Following this, a detailed digital model of the conveyor module was developed in two variants: one featuring a chain drive and the other a belt drive. Comparative analysis of the acoustic characteristics demonstrated a distinct difference in noise emission between the two drive models. The findings enable an evidence-based selection of the drive type, balancing specific acoustic and operational requirements.

Keywords: roller conveyer, conveyor assembly, belt drive, chain drive, digital model, modal analysis

Введение

При проектировании и эксплуатации машин и механизмов важным фактором то является уровень шума и вибраций. Конвейерные установки, применяемые в горнодобывающей, строительной, металлургической и других отраслях, представляют собой сложные механические системы, в которых взаимодействие отдельных узлов (приводы, цепные или ременные передачи, подшипники, опорные элементы) приводит к возникновению колебаний и излучению звука.

Снижение шумов и вибраций не только повышает комфорт работы персонала, но и увеличивает ресурс элементов конструкции, снижает риск аварий и увеличивает эффективность оборудования. Кроме того, уменьшение акустического воздействия способствует соблюдению санитарных норм и снижению негативного влияния на окружающую среду [1].

Шум конвейеров относится к так называемым механическим шумам, которые обусловлены:

- возбуждением колебаний вращающихся и поступательных деталей;
- неравномерностью движения ременной или цепной передачи;
- работой подшипников;
- взаимодействием заготовки с роликами.

Цепная передача формирует шум за счёт периодического зацепления звеньев цепи со звёздочками. При входе и выходе зубьев возникает ударный контакт, сопровождающийся вибрациями и акустическими колебаниями. В ременной передаче источником вибраций является трение между ремнём и шкивами, а также неравномерность натяжения. При высоких скоростях движения возможен эффект боковых колебаний ремня, резонанс, а также аэродинамические шумы. Подшипники качения формируют вибрации из-за взаимодействия тел качения с дорожками. Даже при идеальной геометрии возникает периодическая нагрузка на элементы, создающая колебания.

На практике шум усиливается из-за:

- дефектов дорожек и тел качения;
- неравномерного распределения смазки;
- износа.

Частоты, соответствующие дефектам подшипников, хорошо изучены и могут быть рассчитаны теоретически, что позволяет использовать спектральный анализ для диагностики [2].

1 Выбор алгоритма (инструментов) экспериментального исследования

Для исследования шума и вибраций в конвейерных установках широко применяются средства численного моделирования. Одним из наиболее распространённых инструментов является программный комплекс ANSYS Workbench, который реализует

методы конечных элементов (МКЭ) для анализа динамических процессов в механических системах. Виброакустическое моделирование в ANSYS строится на комбинации нескольких типов расчётов, среди которых ключевыми являются:

1) Модальный анализ (Modal Analysis). Модальный анализ используется для определения собственных частот колебаний конструкции и соответствующих им форм колебаний (мод). Результаты этого анализа позволяют выявить резонансные частоты, при совпадении которых с частотой возбуждения шум и вибрации существенно возрастают. Данный этап является базой для последующих динамических расчётов, так как даёт представление о потенциально критичных режимах работы.

2) Анализ гармонического отклика (Harmonic Response Analysis). Этот метод позволяет исследовать, как конструкция реагирует на периодические гармонические нагрузки, изменяющиеся во времени. Для конвейерных систем такими нагрузками являются вибрации, вызванные цепной или ременной передачей, а также вращением подшипников. Гармонический анализ позволяет рассчитать амплитуды перемещений, ускорений и напряжений в заданном диапазоне частот, а также оценить уровень вибраций, который в дальнейшем преобразуется в акустический отклик.

3) Акустический анализ (Acoustic Analysis). Хотя в рамках работы основной акцент сделан на модальном и гармоническом анализе, ANSYS также позволяет проводить расчёт звукового давления в окружающем пространстве. На основе данных о колебаниях конструкции можно смоделировать акустическое поле и определить зоны повышенного шумового воздействия [3].

Таким образом, использование комплекса методов (модального, гармонического и при необходимости акустического анализа) в ANSYS обеспечивает системное исследование виброакустических характеристик конвейерной установки. Это даёт возможность на этапе проектирования выявить наиболее шумные и вибронегруженные узлы, спрогнозировать их поведение и предложить меры по снижению шумового воздействия.

2 Цифровой эксперимент в среде ANSYS

2.1 Цифровая модель исследуемого объекта

Для того чтобы выполнить численный анализ шумовых характеристик в ANSYS, в первую очередь требуется создать цифровую модель объекта. Такая модель позволяет воспроизвести реальную геометрию конвейера, учесть его основные узлы и элементы, а также подготовить систему к последующему расчету.

На этом этапе в среде SolidWorks была выполнена трёхмерная модель конвейерного узла, которая включает: ролики, жестко закрепленные с валом, несущую раму, элементы крепления под опорный узел вала (уши), шариковые подшипники и два типа передачи – ременная и цепная.

Для цепной передачи, представленной на рисунке 1, в SolidWorks требуется максимально точно воспроизвести взаимное расположение звездочек и натяжение цепи. При моделировании обычно задаётся траектория движения, вдоль которой формируется массив звеньев, что позволяет получить реалистичную кинематику. При этом важно учитывать геометрию зубьев, так как от их профиля зависит характер зацепления, а, следовательно, и уровень вибраций, который в дальнейшем передаётся на ролики и подшипники. Дополнительно в модели предусматривается возможность регулировки межосевого расстояния, что отражает необходимость натяжения цепи в реальных условиях эксплуатации.

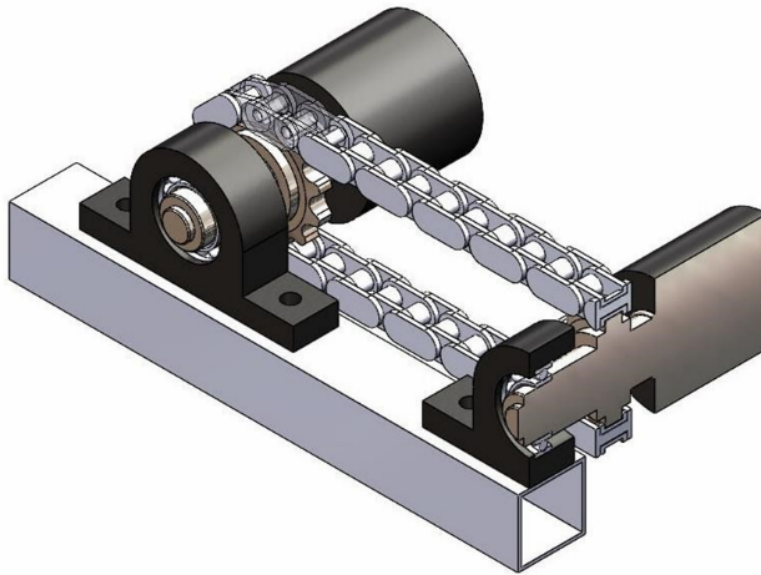


Рисунок 1 – 3D модель конвейерного узла с цепной передачей

В случае ремённой передачи, представленной на рисунке 2, акцент делается на правильном отображении профиля шкивов и траектории ремня. Здесь нет жёсткого зацепления, как в цепи, поэтому важнее всего корректно задать углы обхвата и натяжение. В SolidWorks ремень обычно создаётся как поверхностный элемент, натянутый между шкивами, что позволяет визуализировать его движение и нагрузку на валы. Также учитывается ширина ремня, так как именно она влияет на распределение усилий и стабильность работы передачи.

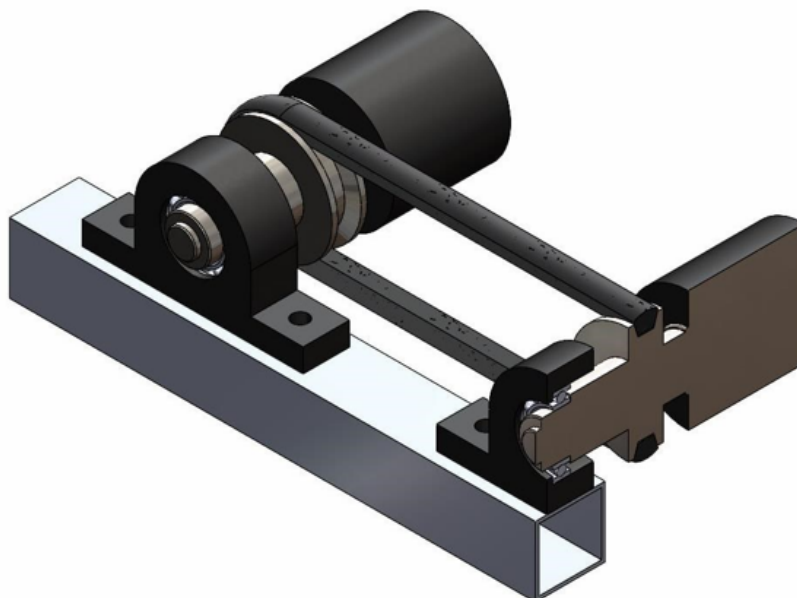


Рисунок 2 – 3D модель конвейерного узла с ременной передачей

С помощью детальной 3D модели становится возможным провести акустические расчёты, а также оценить влияние отдельных конструктивных элементов на уровень шума.

2.2 Виброакустический анализ

Для определения уровня шума в программе Ansys был проведен анализ шума от установки с использованием модального анализа (Modal Analysis) и гармонического отклика (Harmonic Response). Это классический подход для измерения механического шума, вызванного вибрациями конструкции [4].

На рисунке 3 изображена схема подключения модулей для анализа.



Рисунок 3 – Схема подключения модулей для анализа

В методе конечных элементов (МКЭ), реализованном в ANSYS, вся геометрическая модель разбивается на небольшие конечные элементы, объединённые узлами. Качество и характер сетки напрямую влияют на точность и достоверность получаемых результатов.

Выполняя расчёт виброакустических характеристик роликового конвейера, модель была разбита на треугольные элементы. Такой тип сетки является универсальным и позволяет более точно аппроксимировать сложные геометрические формы, что особенно важно для деталей с криволинейными поверхностями.

В ANSYS при разбиении модели сеткой используется принцип локальной детализации: критически важные для анализа области моделируются с мелкими элементами, а второстепенные – с более крупными. Это обеспечивает баланс между точностью расчёта и эффективностью использования ресурсов компьютера.

Подшипники были разбиты более мелкой сеткой. Это связано с тем, что именно подшипники являются критическим источником вибраций и шумов [5]. В них возникают локальные концентрации напряжений и высокочастотные колебания, для адекватного описания которых требуется более детализированная сетка. Чем меньше размер конечных элементов в таких зонах, тем точнее программа способна отразить поведение конструкции.

Стойка была разбита более крупной сеткой. Данный элемент не играет значительной роли в формировании шума и не содержит сложных геометрических особенностей. Использование укрупнённой сетки для второстепенных деталей позволяет существенно сократить вычислительные ресурсы и ускорить расчёт без заметной потери точности итоговых результатов.

На рисунках 4 и 5 изображены рассчитанные сетки для установок с ременной передачей и цепной передачей.

В результате проведенного анализа двух моделей роликовых конвейеров с ременной и цепной передачей и шариковыми подшипниками в программе ANSYS были получены следующие результаты: уровень шума с цепной передачей достигает 138 дБА, а с ременной – 109 дБА. Результаты представлены на рисунках 6 и 7.

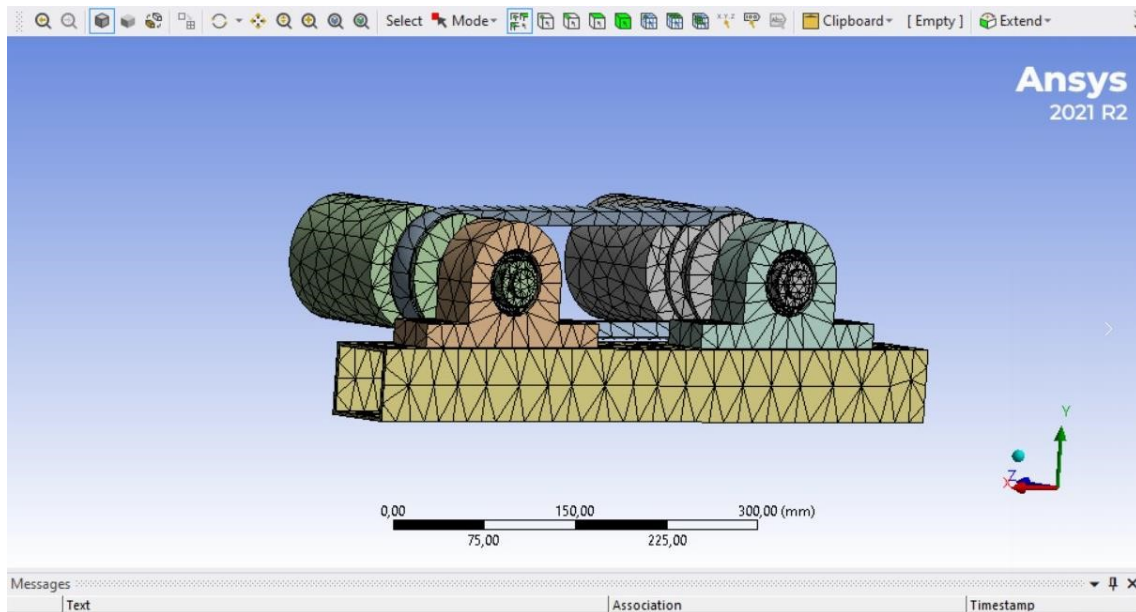


Рисунок 4 – Рассчитанная сетка установки с ременной передачей

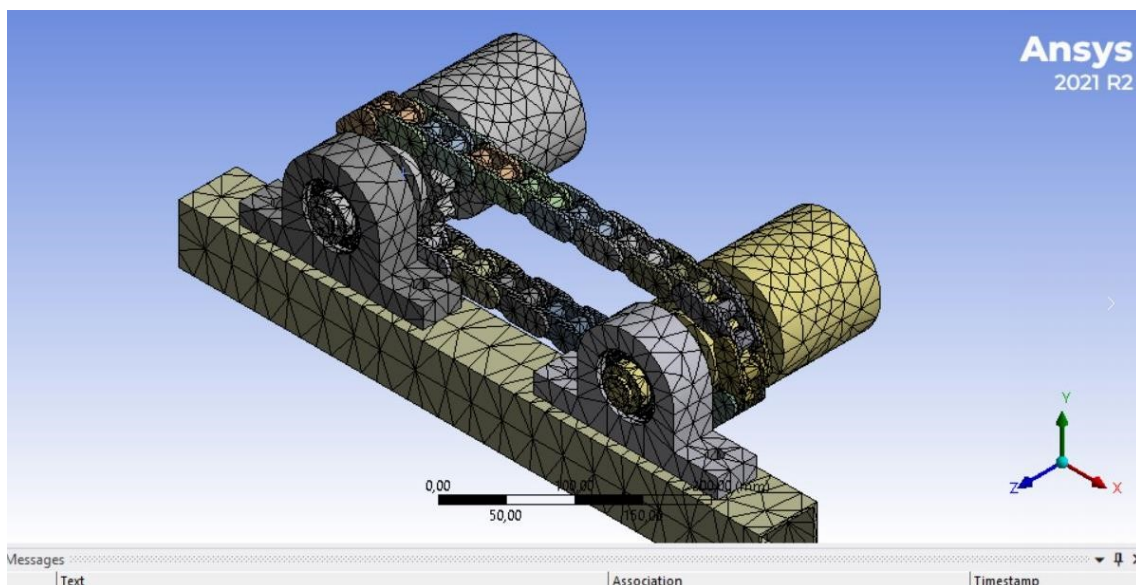


Рисунок 5 – Рассчитанная сетка установки с цепной передачей

Модель с цепной передачей продемонстрировала выраженный пиковый уровень звукового давления на частоте зацепления и ее высших гармониках, что связано с периодичностью однопарного контакта зубьев и возникающими при этом динамическими ударами. Основными источниками шума были идентифицированы ударные взаимодействия в шарнирах цепи и периодический контакт звеньев с зубьями звездочки. Этот дискретный тон, часто лежащий в наиболее чувствительной для человеческого слуха области, субъективно идентифицируется как «резкий и навязчивый».

Модель с ременной передачей показала существенно более низкий общий уровень шума, особенно в тональной составляющей. Акустическая эмиссия была преимущественно широкополосной, обусловленной микропроскальзыванием, вибрацией свободной ветви ремня и аэродинамическими эффектами. Субъективно такой шум воспринимается как более ровный «шипящий» или «свистящий» фон, который часто менее раздражающий лучше поддается подавлению с помощью кожухов.

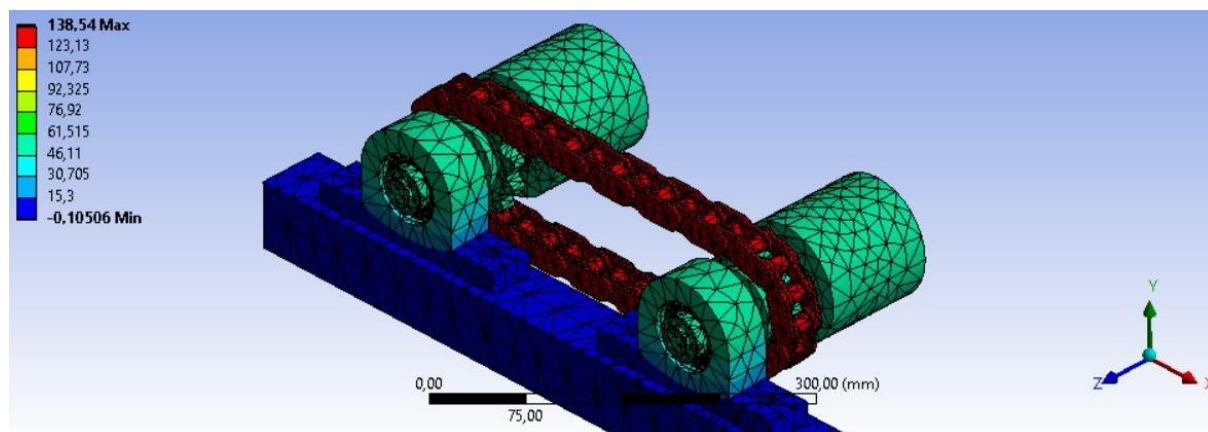


Рисунок 6 – Результат анализа шума конвейерной установки с цепной передачей

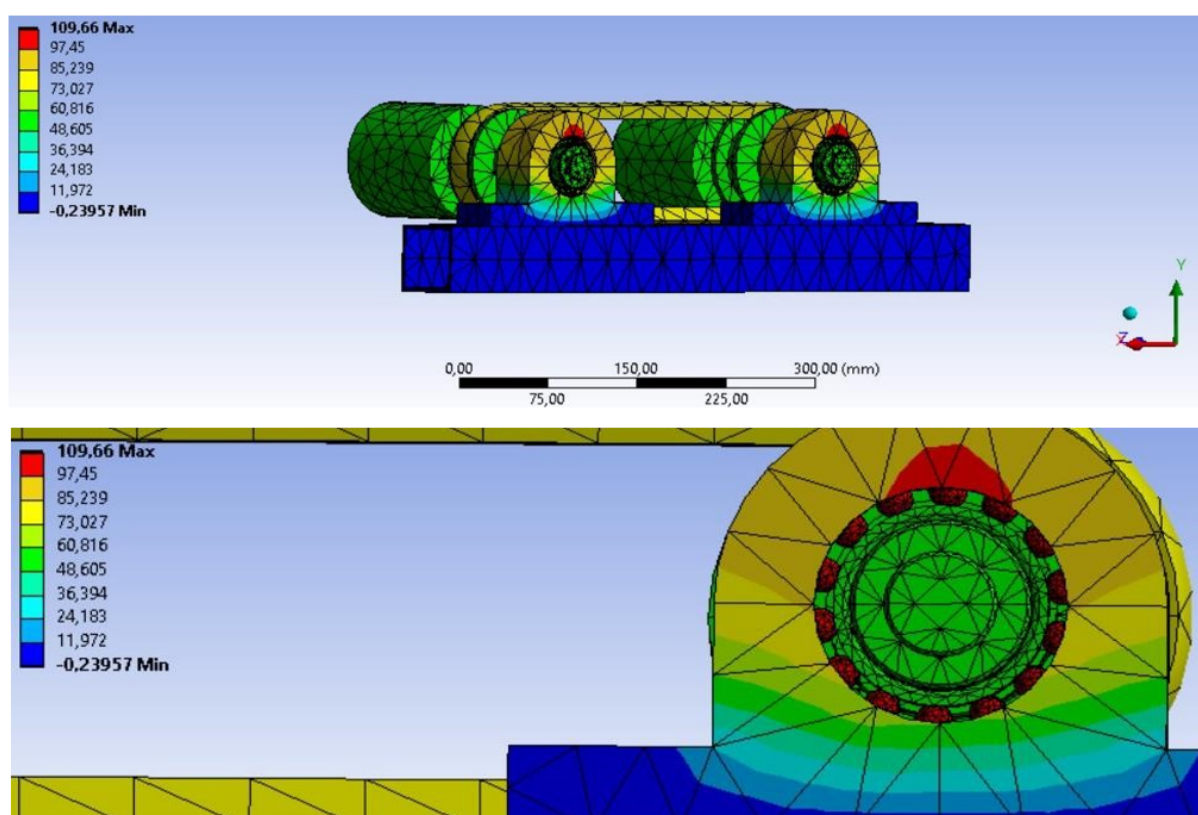


Рисунок 7 – Результат анализа шума конвейерной установки с ременной передачей

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод о выборе типа передачи:

- ременная передача: является предпочтительной для оборудования, эксплуатируемого в зонах постоянного присутствия персонала, а также для соблюдения законодательных норм по охране труда (СанПиН, ГОСТ, директивы Евросоюза);
- цепная передача, несмотря на высокий уровень шума, может быть выбрана по эксплуатационным соображениям: для работы в условиях экстремальных нагрузок, высоких температур, загрязнённой среды, где требуется высокая надёжность и точность позиционирования без проскальзывания, но в этом случае достаточно остро встает вопрос о снижении уровня шума, выбор цепной передачи должен сопровождаться обязательным проектированием комплексных шумопоглощающих и виброизолирующих мероприятий (звукоизолирующие кожухи, демпфирующие основания).

Целевая функция для минимизации шума в рольганговых механизмах может быть сформулирована через уровни звукового давления различных источников, влияющих на шум. Чтобы суммировать уровни звукового давления от нескольких источников, используем формулу:

$$L_{p,total} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}} \right), \quad (1)$$

где $L_{p,total}$ – суммарный уровень звукового давления от нескольких источников; $L_{p1}, L_{p2}, \dots, L_{pn}$ – уровни звукового давления от отдельных источников [1].

Основная цель заключается в том, чтобы найти оптимальные условия работы механизма, которые позволят минимизировать излучаемый шум.

Предположим, что L_p – уровень шума, который мы хотим минимизировать. Переменные, влияющие на шум: v – скорость механизма, I_1 – излучение от рамы рольганга, I_2 – излучение от узлов механизма, I_3 – излучение от передачи, тогда функция может выглядеть следующим образом:

$$\text{minimize } f(v, I_1, I_2, I_3) = L_p(v, I_1, I_2, I_3), \quad (2)$$

где $L_p(v, I_1, I_2, I_3)$ – функция, определяющая уровень звукового давления.

Приведенный расчет может включать в себя не только прямые корреляции с уровнями шума, но также учитывать характеристики материалов, конструкции рольгангов и систем амортизации.

Заключение

Сравнительный анализ выявил различия в уровнях шума для конвейерных установок с ременной и цепной передачами. Полученные результаты позволяют сделать обоснованные выводы о шумовых характеристиках проектируемых систем. По результатам анализа можно сделать вывод о том, что использование ременной передачи в конвейерной установке значительно понизит уровень шума, но, понизит долговечность системы. Увеличение шума от цепной передачи можно компенсировать, вводя демпфирующие звенья и регулярно смазывая движущиеся части и звенья.

Список использованных источников

1. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Защита от шума и вибрации: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284 с. - ISBN 978-5-6042448-3-8.
2. Хизбуллин Р. Н., Бикбулатов Р. И., Тазеев Н. Ф. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ШУМА И ВИБРАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ // StudNet. – 2022. – Т. 5. – N 5. – С. 4656-4663.
3. Фролов Александр Владимирович, Савватеев Денис Олегович, Шаповалов Петр Анатольевич МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ БИНС С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ANSYS // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. N 11.
4. Хрулев С. Анализ акустики в ANSYS Mechanical 15.0 // САПР и графика. – 2014. – N 8. – С. 54.
5. Переверзев Олег Игоревич, Чукарин Александр Николаевич, Финоченко Татьяна Анатольевна ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ШУМА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. N 7.

References

1. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Protection from noise and vibration: a study guide. - 2nd ed., revised and additional. - St. Petersburg: Printing Shop, 2019. - 284 p. - ISBN 978-5-6042448-3-8.
2. Khizbullin R. N., Bikbulatov R. I., Tazeev N. F. METHODS AND MEANS OF PROTECTING HUMANS FROM NOISE AND VIBRATION IN PRODUCTION // StudNet. – 2022. – Vol. 5. – N 5. – P. 4656-4663.
3. Frolov Alexander Vladimirovich, Savvateev Denis Olegovich, Shapovalov Petr Anatolevich MODAL ANALYSIS OF A BINS MODEL USING THE ANSYS SOFTWARE PACKAGE // Izvestiya TulGU. Technical Sciences. 2022. N 11.
4. Khrulyov S. Acoustic Analysis in ANSYS Mechanical 15.0 // CAD and Graphics. – 2014. – N 8. – P. 54.
5. Peverzev Oleg Igorevich, Chukarin Alexander Nikolaevich, Finochenko Tatyana Anatolevna ASSESSMENT OF ROLLING BEARING NOISE LEVELS // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2024. N 7.