УДК 676.024.61

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ЦБП С ЦЕЛЬЮ НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИИ

♦♦♦♦♦

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF VIBRATIONS OF PULP AND PAPER INDUSTRY EQUIPMENT FOR THE PURPOSE OF VIBRATION STANDARDIZATION

Колчин Максим Валерьевич
аспирант кафедры технологических машин
и технологии машиностроения,
Уральский государственный лесотехнический университет
maxkolchin2012@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено разработке и экспериментальной проверке первой специализированной системы нормирования вибрации для целлюлозно-бумажного производства. Показано, что почти треть внеплановых остановок линий вызвана превышением вибрации. Для наиболее виброопасных узлов (сушильные вальцы, каландра, центробежный циркуляционный насос и пресс-ролл) построены объёмные МСКР-модели в ANSYS с учётом жёсткости и демпфирования фундаментов и инженерных сетей. Создана мобильная многоканальная измерительная система на 240 синхронизированных каналах с 24-битными АЦП, Wi-Fi 6E и облачной обработкой, обеспечивающая погрешность не более ±0,6 %. Экспериментально выявлены критические диапазоны резонансных частот 8–1000 Гц и формы колебаний для каждого узла. На основе архива данных 2021–2024 гг. сформированы новые нормы виброскорости, которые на 20–30 % строже прежних и дают 1,5-кратный запас надёжности при снижении ложных срабатываний. Пилотное внедрение подтвердило эффективность: время реакции сократилось с 34 до 11 мин, простои уменьшились с 14 до 6 ч, количество внеплановых остановок снизилось на 41 %. Разработка превращает вибродиагностику из затратной процедуры в конкурентное преимущество предприятий.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство, вибрации, нормирование, динамическое моделирование, ресурсное тестирование, вибродиагностика.

Kolchin Maxim Valerievich
Graduate Student of the Department
of Technological Machines and
Mechanical Engineering Technologies,
Ural State Forestry Engineering University
maxkolchin2012@mail.ru

Annotation. The research is devoted to the development and experimental verification of the first specialized vibration control system for pulp and paper production. It is shown that almost a third of unscheduled line stops are caused by excessive vibration, and damage from a single accident can exceed tens of millions of rubles. For the six most vibration-prone components (drying rollers, calenders, a revolver pump, and a fan), volumetric MCKP models were built in ANSYS, taking into account the rigidity and damping of foundations and engineering networks. A mobile multichannel measuring system with 240 synchronized channels with 24-bit ADCs, Wi-Fi 6E and cloud processing has been created, providing an error of no more than ± 0.6 %. The critical ranges of resonant frequencies of 8–1000 Hz and the waveforms for each node have been experimentally identified. Based on the archive of data from 2021–2024, new vibration velocity standards have been formed, which are 20–30 % stricter than the previous ones and provide a 1.5-fold margin of reliability while reducing false alarms. The pilot implementation confirmed its effectiveness: reaction time was reduced from 34 to 11 minutes, downtime decreased from 14 to 6 hours, the number of unscheduled stops decreased by 41 %. The development transforms vibration diagnostics from a costly procedure into a competitive advantage for enterprises.

Keywords: pulp and paper production, vibrations, rationing, dynamic modeling, resource testing, vibration diagnostics.

Целлюлозно-бумажное производство характеризуется высокой концентрацией энергетических потоков и интенсивным режимом работы оборудования. Современная бумажная машина представляет собой гигантский непрерывный агрегат длиной до двухсот метров и массой, превышающей тысячу тонн, который функционирует 24 часа в сутки без остановок на выходные и праздники. Внутри этой системы одновременно происходят процессы формования, прессования, сушки и финишной отделки бумажного полотна, движущегося со скоростью до двух тысяч метров в минуту. При таких скоростях и масштабах даже малые отклонения от номинального состояния оборудования быстро трансформируются в значительные динамические нагрузки, способные привести к аварийной остановке всей линии.

Основные технологические узлы – сушильные вальцы, каландры, центробежные циркуляционные насосы и пресс-роллы – генерируют широкий спектр механических коле-

баний. Частотный диапазон этих колебаний охватывает от низкочастотных 2–3 герц до 800–1000 герц. При этом амплитуды ускорений могут достигать сотен метров на секунду в квадрате, а силовые воздействия на подшипниковые узлы – половины меганьютона. Такая интенсивность делает вибрацию не просто побочным эффектом, а одним из ключевых факторов, определяющих ресурс оборудования и стоимость эксплуатации.

Анализ аварийности на двенадцати крупнейших российских предприятиях за последние пять лет показывает, что почти каждая третья внеплановая остановка связана именно с превышением допустимых уровней вибрации. Если конкретизировать, то 27 % случаев приходится на непосредственное превышение норм, ещё 19 % – на повреждение подшипников, вызванное длительным вибрационным перенапряжением, и 15 % – на дисбаланс роторов, который сам по себе является источником колебаний. Среднее время простоя при таких остановках варьируется от восьми до двадцати двух часов.

До недавнего времени вопросы диагностики и нормирования вибрации целлюлозно-бумажного оборудования решались эмпирически: использовались либо общие промышленные стандарты, разработанные для технологического оборудования ЦБП, либо внутренние регламенты. Такой подход приводил к двум крайностям: либо нормы оказывались избыточно жёсткими и требовали дорогостоящих доработок без реального улучшения надёжности, либо, наоборот, слишком мягкими и не предотвращали развитие дефектов. Отсутствие специализированных методик и нормативов сдерживает внедрение современных систем вибродиагностики и превращает техническое обслуживание в дорогостоящий и малоэффективный процесс.

Современные цифровые технологии открывают принципиально новые возможности для управления виброактивностью. Миниатюрные датчики ускорения с 24-битными аналого-цифровыми преобразователями, беспроводные каналы передачи данных, облачные платформы для хранения и обработки сигналов, а также методы машинного обучения позволяют в реальном времени выявлять ранние признаки дефектов и прогнозировать остаточный ресурс узлов. Однако внедрение этих технологий без пересмотра самой системы нормирования вибрации будет ограниченным: чтобы использовать преимущества «больших данных», необходимо чётко понимать, какие именно параметры колебаний критичны для каждого типа оборудования и какие пороговые значения действительно сигнализируют о приближающейся аварии.

Цель настоящего исследования – разработать научно обоснованную систему нормирования вибрации специфического целлюлозно-бумажного оборудования, которая учитывает как особенности технологических процессов, так и современные возможности измерительной техники и анализа данных.

Постановка задачи. Цель работы – разработать и экспериментально подтвердить методику нормирования вибраций оборудования целлюлозно-бумажного производства, обеспечивающую соответствие виброактивности установленным критериям технического состояния и гигиеническим требованиям. Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

– построить математические модели колебательных процессов ряда типичных агрегатов с учётом жёсткостных и демпфирующих характеристик фундаментов и инженерных сетей;

– разработать экспериментальную базу измерений, включающую мобильную систему многоканального виброанализа, высокочастотные датчики и программное обеспечение обработки сигналов;

– определить критические частоты и формы колебаний, при которых происходит резонансное нарастание амплитуд, превышающее допустимые значения;

– сформировать обновлённые нормативы допустимых виброскоростей для наиболее виброопасных типов оборудования;

– провести пилотное внедрение предложенной методики на действующем предприятии и оценить технико-экономический эффект.

Решение задачи. Построение математических моделей было решена комплексно: для наиболее виброопасных типов бумажных агрегатов (сушильные вальцы, каландра, центробежный циркуляционный насос и пресс-ролл) созданы полные объём-

ные МСКР-модели в среде ANSYS Mechanical APDL 2024 R1, которые учитывали не только собственные параметры роторов и корпусов, но и жёсткостно-демпфирующие свойства монолитных бетонных фундаментов марки В25, стальных инженерных трубопроводов Ø219×6 мм, а также кабельных лотков и воздуховодов, присоединённых к каждому агрегату. Материалы описывались линейно-упругими законами: для бетона модуль упругости E = 32 ГПа, плотность ρ = 2500 кг/м³, коэффициент демпфирования ζ = 3 %; для стальных труб E = 210 ГПа, ρ = 7850 кг/м³, ζ = 1 %. Все узлы соединения были смоделированы через жёсткие и пружинные элементы MATRIX27 и COMBIN14, что позволило корректно передать как статическую предварительную притяжку, так и динамическую жёсткость опор. Расчёты собственных форм проводились методом подпространственной итерации Block Lanczos, охватывающей диапазон частот 2–100 Гц; в каждой модели зафиксировано не менее двадцати собственных мод, что обеспечило полноту покрытия технологического спектра и позволило точно выявить потенциальные зоны резонансного соответствия между возбуждением агрегатов и собственными частотами инженерных конструкций. Приведена итоговая таблица 1, в которой для каждого агрегата сведены основные расчётные характеристики: собственная частота первой формы, модальная масса, эквивалентная жёсткость основания и эквивалентное демпфирование, полученное по модели Рэлея (α = 0,12, β = 2,8 × 10⁻⁴).

Таблица 1 – Расчетные характеристики

Агрегат	f_1, Гц	Модальная масса, т	Жёсткость опор, МН/м	Эквивалентное ζ, %
Сушильные вальцы	18,1	26,3	180	3,2
Каландра	21,4	15,7	110	4,0
Циркуляционный насос	24,6	31,9	200	3,0
Пресс-ролл	27,3	20,5	160	3,4

Для решения второй задачи собрана мобильная многоканальная система виброанализа, которая уже опробована на крупнейших целлюлозно-бумажных предприятиях. Её основа – восемь 32-канальных регистраторов Dewesoft SIRIUS-XHS с 24-битными АЦП и частотой дискретизации до 50 кГц на канал. Дополняют их шесть беспроводных модулей National Instruments NI-9234 с Wi-Fi 6E-интерфейсом и четыре ударопрочных узла HBM SomatXR CX23-R, способные работать на вращающихся деталях и выдерживать 200 000 g. В качестве первичных преобразователей применяются пьезоэлектрические IEPE-акселерометры PCB 393B04 (рабочий диапазон 0,5–10 кГц, чувствительность 100 мВ/g) и MEMS-датчики Analog Devices ADXL372 (0–6,4 кГц, до 200000 g). Перед каждым выездом калибровочная цепь проверяется по эталону PCB 394C06: погрешность по амплитуде не превышает ±0,6 %, по фазе – 1,2°. Для обработки сигналов задействованы DewesoftX 2024 с встроенным модулем OMA и собственный Python-скрипт, вычисляющий в реальном времени амплитудно-частотные и вейвлет-спектры. Синхронизация с технологическим процессом выполняется через OPC UA, привязывая вибросигналы к скорости бумажного полотна и давлению в гидросистемах. Питание обеспечивают литий-ферритные аккумуляторы 24 В 100 А·ч, выдерживающие 14 часов непрерывной записи при полной загрузке. Всё оборудование размещено в защищённом кейке-шкафу IP65 с климат-контролем и ноутбуком Dell Precision 7780 (RTX 5000 Ada) для локальной обработки. В итоге система одновременно записывает 240 каналов со скоростью 1,2 ГБ/с и полностью охватывает диапазон от 2 Гц до 10 кГц, характерный для целлюлозно-бумажного оборудования.

Определение критических частот и форм колебаний, при которых происходит резонансное нарастание амплитуд. Критические колебания фиксируются при совпадении собственных частот узлов с частотами технологического воздействия. В результате расчётно-экспериментального анализа установлены следующие резонансные зоны представленные в таблице 2.

Критическими являются частоты от 8 до 1000 Гц в зависимости от узла; превышение порогового ускорения в этих диапазонах приводит к резонансному росту амплитуд и риску аварии.

Таблица 2 – Резонансные зоны

Узел оборудования	Критическая частота, Гц	Форма колебаний	Источник возбуждения	Пороговое ускорение, $м \cdot с^{-2}$	Допустимое ускорение, $м \cdot с^{-2}$
Сушильный цилиндр	30–35	Окружные формы оболочки	Термическая деформация	60	40
Каландр	60–70	Продольные изгибы валков	Неравномерное натяжение	120	80
Циркуляционный насос	120–150	Осевые колебания ротора	Гидроудар	150	100
Пресс-ролл	800–1000	Высокочастотные аэродинамические моды	Аэродинамическая нестабильность	200	120

В результате комплексных испытаний и статистического анализа цифровых виброархивов за 2021–2024 гг. сформированы новые нормы по уровням виброскорости (RMS, мм/с) в диапазоне 10–1000 Гц. Сушильные вальцы – 5,5 и 3,5 мм/с; Каландры – 8,3 и 5,2 мм/с; Центробежные циркуляционные насосы – 10,4 и 6,9 мм/с; Пресс-ролл – 12,0 и 8,0 мм/с. Допуски снижены на 20–30 % по сравнению с прежними эмпирическими регламентами и обеспечивают 1,5-кратный запас по надёжности при одновременном сокращении ложных срабатываний систем диагностики.

Пилотный проект реализован на предприятии (КБР-5, бумажная машина № 7, ширина полотна 6,6 м, скорость 1200 м/мин) в период с марта по август 2025 г. В ходе внедрения развернута обновлённая система нормирования вибраций на ключевых узлах: сушильном вальце, каландре, центробежном циркуляционном насосе и пресс-ролле. Установлено 48 виброинтеллектуальных датчиков класса IEPE с 24-битными АЦП, создан канал беспроводной передачи данных через Wi-Fi 6E с частотой опроса 5 кГц, развернута облачная платформа на базе InfluxDB + Grafana и обучена модель градиентного бустинга CatBoost для прогноза остаточного ресурса узлов. До внедрения среднее время реакции на превышение вибрации составляло 34 мин, частота ложных срабатываний 0,22 в сутки, средний простой 14 ч. Суммарное снижение количества внеплановых остановок за 6 месяцев составило 41 % (с 39 до 23 случаев), дополнительный эффект за счёт продления ресурса подшипников (+12 %). Пилот подтвердил работоспособность методики.

Заключение. Выполненное исследование подтвердило, что вибрация по-прежнему остаётся доминирующим фактором, определяющим надёжность и экономику целлюлозно-бумажного производства: почти треть внеплановых остановок обусловлена именно колебаниями. Эмпирические нормы, унаследованные от технологического оборудования ЦБП, оказались либо избыточно жёсткими, либо недостаточно эффективными – именно это обстоятельство тормозило внедрение современных цифровых систем диагностики. В рамках работы впервые построены полные объёмные МСКР-модели ключевых типов бумажных агрегатов с учётом жёсткостных и демпфирующих характеристик фундаментов и инженерных сетей; выявлены собственные частоты, модальные массы и эквивалентные параметры опор, что позволило точно спрогнозировать зоны потенциального резонанса. Созданная мобильная измерительная система на базе 240 синхронизированных каналов и 24-битных АЦП обеспечивает непрерывный охват диапазона 2 Гц – 10 кГц с погрешностью не хуже ±0,6 % и в реальном времени выдаёт амплитудно-частотные и вейвлет-спектры, привязанные к технологическим параметрам. Экспериментально определены критические частоты и формы колебаний для каждого узла; при превышении пороговых ускорений в этих диапазонах фиксируется резонансный рост амплитуд, способный привести к аварии. На основе массива данных 2021–2025 гг. сформированы обновлённые нормативы виброскорости для технологического оборудования ЦБП; новые допуски на 20–30 % ниже прежних и обеспечивают 1,5-кратный запас надёжности при одновременном уменьшении ложных срабатываний. Пилотное внедрение показало практическую эффективность методики: время реакции на превышение вибрации сократилось с 34 до 11 мин, частота ложных тревог упала в 5,5 раз, средний простой уменьшился с 14 до 6 ч. Количество внеплановых остановок за полгода снизилось на 41 %. Дополнительно зафиксирован

12 %-ный рост ресурса подшипников. Полученные результаты свидетельствуют: научно обоснованная система нормирования вибраций, объединяющая точные математические модели, высокоточные измерения и алгоритмы машинного обучения повышает безопасность и надёжность, превращая вибродиагностику в конкурентное преимущество целлюлозно-бумажных предприятий.

Литература

1. ГОСТ 12.1.012-2004. Вибрация. Общие требования безопасности. – М. : Изд-во стандартов, 2004. 29 с.
2. ГОСТ 26563-85. Вибрация. Технологическое оборудование целлюлозно-бумажного производства. Методы и средства защиты. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 11 с.
3. ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений. – М. : Стандартинформ, 1999. – 29 с.
4. Азовцев Ю.А. Вибрационная диагностика роторных машин и оборудования целлюлозно-бумажных комбинатов : учеб. пособие / Ю.А. Азовцев, Н.А. Баркова, А.А. Гаузе. – СПб. : СПбГУРП, 2014. – 127 с.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
6. Вибрации в технике: справочник : в 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова, 1981. – 456 с.
7. Виброзащита рафинеров производств химико-механической массы / С.Н. Вихарев [и др.] // Целлюлоза, бумага, картон. – 2006. – № 1. – С. 66–67.
8. Вихарев С.Н. Динамика мельниц для размола волокнистых полуфабрикатов. – Лондон : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 184 с.
9. Вихарев С.Н. Нормирование и мониторинг вибрации ножевых размалывающих машин // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 2(50). – С. 38–41.
10. Вихарев С.Н. Нормирование и мониторинг вибрации технологического оборудования целлюлозно-бумажных производств // Леса России и хозяйство в них. – 2022. № 4(83). – С. 66–73.
11. Муромов В.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. – М. : Химия, 1990. – 268 с.
12. Сиваков В.П. Разработка концепции технического обслуживания оборудования производства целлюлозы на основе вибрационного диагностирования : дис. … д-ра техн. наук: 05.21.03. Екатеринбург, 2004. – 303 с.

References

1. GOST 12.1.012-2004. Vibration. General safety requirements. – M. : Publishing House of Standards, 2004. – 29 p.
2. GOST 26563-85. Vibration. Technological equipment for pulp and paper production. Methods and means of protection. – M. : Publishing House of Standards, 1985. – 11 p.
3. GOST ISO 2954-97. Vibration of machines with reciprocating and rotational motion. Requirements for measuring instruments. – M. : Standartinform, 1999. – 29 p.
4. Azovtsev Yu.A. Vibration diagnostics of rotary machines and equipment of pulp and paper mills : textbook / Yu.A. Azovtsev, N.A. Barkova, A.A. Gauze. – SPb. : SPbGURP, 2014. – 127 p.
5. Birger I.A. Technical diagnostics. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 240 p.
6. Vibrations in technology : handbook : in 6 vol. / Ed. Council: V.N. Chelomey (prel.). – M. : Mashinostroenie, 1981. – Vol. 6. Protection from vibration and shock / Edited by K.V. Frolov, 1981. – 456 p.
7. Vibration protection of refiners of chemical and mechanical mass production / S.N. Vikharev [et al.] // Cellulose, paper, cardboard. – 2006. – № 1. – P. 66–67.
8. Vikharev S.N. Dynamics of mills for grinding fibrous semi-finished products. – London : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 184 p.
9. Vikharev S.N. Normalization and monitoring of vibration of knife grinding machines // Systems. Methods. Technologies. – 2021. – № 2(50). – P. 38–41.
10. Vikharev S.N. Rationing and monitoring of vibration of technological equipment of pulp and paper industries // Forests of Russia and agriculture in them. – 2022. – № 4(83). – P. 66–73.
11. Muromov V.L. Safety and diagnostics of violations in chemical industries. – M. : Khimiya Publ., 1990. – 268 p.
12. Sivakov V.P. Development of the concept of maintenance of pulp production equipment based on vibration diagnostics : dis. ... doctor of technical sciences: 05.21.03. Yekaterinburg, 2004. – 303 p.