

В диссертационный совет 24.1.075.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Ляна И.П. «Поддержание резонансных режимов работы транспортно-технологических вибрационных машин при переменных параметрах обрабатываемого материала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки)

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Ляна И.П. посвящена стабилизации резонансных режимов колебаний вибрационных технологических машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями за счет использования системы автоматического управления. Решаемые задачи являются актуальными для развития вибрационных технологий, применяемых в самых различных отраслях современной промышленности, и соответствуют Стратегии НТР РФ в части формулировки пункта «а», где предусмотрен «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования...».

Использование резонансных режимов вибрационных машин позволяет реализовать требуемые амплитуды колебаний рабочего органа при относительно небольших возмущающих силах и затратах энергии. Однако резонансный режим в силу различных нелинейностей и флуктуаций массы обрабатываемого материала, в отличие от зарезонансного режима, оказывается неустойчивым.

Целью рассматриваемой диссертационной работы является повышение эффективности вибрационных технологических машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями за счет использования резонансных режимов колебаний. Поставленная цель достигается путем использования систем автоматического поддержания резонансных колебаний рабочего органа вибрационных транспортно-технологических машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями при неопределенном изменении массы обрабатываемого материала.

В работе приводится оценка энергоэффективности резонансной вибромашины по сравнению с вибромашиной, работающей в зарезонансной области частот. Выполнено математическое моделирование динамики резонансной вибромашины, на основе анализа которого создан ее лабораторный образец. Разработан и реализован алгоритм поддержания резонансного режима при изменении массы обрабатываемого материала за счет управления скоростью вращения вибровозбудителей, основанный на динамическом портрете вибромашины. Проведена серия численных и натурных экспериментов, результаты которых продемонстрировали устойчивость резонансного режима при различных законах изменения массы обрабатываемого материала.

Научная новизна заключается в разработанной математической модели вибрационной машины с самосинхронизирующимися вибровозбудителями,

учитывающей изменение массы обрабатываемого материала, моментные характеристики асинхронных электродвигателей и законы их частотного регулирования; в разработанном алгоритме поддержания резонансного режима, основанном на использовании динамического портрета вибромашины, позволяющем в режиме реального времени вычислять и реализовывать необходимое управление частотой вращения вибровозбудителей; в разработанной обобщенной математической модели резонансной вибрационной машины (цифровой двойник), описывающей процесс поддержания резонансного режима колебаний рабочего органа при неопределенном изменении массы обрабатываемого материала.

Практическая значимость заключается в том, что: установлены количественные показатели эффективности использования резонансных режимов колебаний рабочего органа вибромашин по сравнению с зарезонансным режимом; сформулированы условия, при которых обеспечивается эффективность использования резонансного режима работы вибрационной машины; разработанный алгоритм поддержания резонансного режима может быть использован при создании управляемых вибрационных машин с переменной массой обрабатываемого материала; разработанный цифровой двойник позволяет оптимизировать процессы исследования, проектирования и создания новых вибрационных машин; создан лабораторный образец вибрационной резонансной машины с системой автоматической настройки и поддержания резонансного режима колебаний.

Результаты работы внедрены в расчетную практику IT-компании ООО «ДАТАДВАНС» при создании цифровых двойников вибромашин и учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также использованы при выполнении грантов РФФИ № 18-19-00708 и № 21-19-00183, гранта РФФИ № 20-38-90211.

Обоснованность и достоверность научных результатов диссертации обеспечена использованием фундаментальных положений теории машин и механизмов, теории колебаний, применением апробированных методов вычислительной механики и подтверждена соответствием результатов расчетных и экспериментальных исследований. Результаты моделирования не противоречат существующим представлениям о динамике вибрационных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями и подтверждаются результатами натуральных экспериментов, выполненных, в том числе, с использованием системы автоматического поддержания резонансного режима колебаний при изменении массы материала, расположенного на рабочем органе.

Апробация работы. Полученные результаты исследований докладывались и обсуждались на семи различных российских и международных научных конференциях.

Публикации. На основании результатов исследований по теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из которых 3 – в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 7 – в ведущих рецензируемых

зарубежных научных журналах, индексируемых международными информационными базами SCOPUS/Web of Sciences, а также 5 статей в иных научных изданиях; получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований. Работа содержит 120 страниц основного текста и 60 рисунков, 3 таблицы, 3 приложения.

Содержание работы.

Во введении приводится обоснование актуальности темы, сформулированы основные положения исследований, научная и практическая значимости работы.

В первой главе приводятся основные сведения о вибрационных транспортно-технологических процессах и машинах, приведен обзор и анализ существующих исследований в области вибромашин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями. Рассматриваются современные тенденции в области создания управляемых вибрационных машин, в том числе автоматического поддержания резонансных режимов колебаний рабочих органов вибромашин. На основе выполненного анализа сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена оценке энергоэффективности резонансной вибромашины по сравнению с вибромашиной, работающей в зарезонансной области частот.

Анализ полученных результатов показал, что потребляемая электрическая мощность резонансной вибромашины оказалась в 3 раза меньше, чем зарезонансной вибромашины (в зарезонансном режиме двигатель работает не в номинальном режиме и оказывается существенно недогруженным). Для возбуждения колебаний резонансной вибромашины требуются дебалансы с существенно меньшими значениями массы и статической неуравновешенности (примерно в 15 раз).

Третья глава посвящена разработке алгоритма автоматического поддержания резонансного режима колебаний рабочего органа вибромашины с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями при переменной массе обрабатываемого материала.

Предложена архитектура разрабатываемой системы поддержания резонансного режима, включающая: блок-схему алгоритма, необходимые первичные измерительные преобразователи, вспомогательные алгоритмы обработки их сигналов для вычисления значений контролируемого и управляющего параметров системы. В качестве контролируемого параметра предложено и обосновано использование сдвига фаз между возмущающим воздействием и колебаниями рабочего органа. Проанализированы два возможных алгоритма вычисления значения управляющего параметра: на основе ПИД-регулятора и на основе динамического портрета системы.

Четвертая глава посвящена разработке лабораторного образца резонансной вибромашины и исследованию ее математической модели, в которой учитываются

взаимодействие с вибровозбудителями ограниченной мощности, условия их самосинхронизации, переменность массы обрабатываемого материала и другие особенности динамической системы.

На основе анализа динамических характеристик математической модели были установлены параметры и разработана схема упругого подвеса рабочего органа резонансной вибромашины и создан лабораторный образец резонансной вибромашины.

Пятая глава посвящена численному моделированию процесса автоматической настройки и поддержания резонансного режима колебаний вибромашины и сравнению полученных данных с результатами натуральных испытаний лабораторного образца. Результаты численных и натуральных экспериментов продемонстрировали работоспособность предлагаемых алгоритмов.

В заключении представлены основные результаты и выводы по диссертации.

Основные достоинства диссертации заключаются в следующем:

- обоснована энергоэффективность использования резонансного режима колебаний вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями по сравнению с обычно используемым зарезонансным режимом;

- на основе современных методов механики и электродинамики разработана математическая модель и выполнен динамический анализ вибрационной технологической машины, по результатам которого разработана общая концепция реализации устойчивых резонансных колебаний рабочего органа вибрационных машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями в условиях неопределенного изменения массы обрабатываемого материала;

- разработан и валидирован алгоритм автоматического поддержания резонансного режима.

Следует отметить обоснованность, системность и четкость формулировок цели исследования и поставленных задач. Диссертация отличается общей грамотностью, объективным и качественно проведенным анализом литературных источников, четкой логикой изложения материала, уместными и качественными иллюстрациями.

Вместе с тем по диссертации имеется ряд **замечаний**:

1. Система алгебраических уравнений (2.15) на странице 44 нелинейна относительно двух неизвестных. Такие системы могут иметь несколько решений. Автор не рассматривает возможные альтернативные решения и не обосновывает выбор именно того, которое приводится в диссертации. Метод решения нелинейной системы вовсе не упоминается. Всё сказанное выше относится, также, и к системе (2.23) на странице 50. Кроме того, третье уравнение системы (2.15), а также второе и четвертое уравнения системы (2.23) могут быть сокращены на $M\sigma$.

2. На странице 49 второй абзац; «Так как вблизи резонансной частоты колебания системы считаются стационарными, то ...». Утверждение никак не

обосновано и вызывает сомнения, особенно, если учесть острые пики амплитуд именно в области резонансных частот.

3. «Недогруженность» двигателя зарезонансной машины не приводит, вопреки утверждению автора (страница 54), к увеличению реактивной мощности и перегреву двигателя. Реактивная мощность остаётся прежней, просто её доля в общей мощности увеличивается и этим снижается КПД. Никакого чрезмерного нагрева при этом не происходит. В частности, при отсутствии сопротивления вращению (холостой ход) исправный двигатель работает сколь угодно долго, не нагреваясь.

4. В первых главах диссертации автор неоднократно упоминает эффект Зоммерфельда и, в частности, говорит о возможности «застревания» на резонансной частоте при недостаточной мощности двигателей. Однако, при рассмотрении системы управления резонансной машиной об этом эффекте не сказано ни слова. Помогает он управлению или затрудняет его? Может быть, в каких-то случаях и управлять не надо, резонанс будет поддерживаться за счёт эффекта Зоммерфельда? Все эти вопросы оставлены открытыми.

Заключение

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Ляна И.П. «Поддержание резонансных режимов работы транспортно-технологических вибрационных машин при переменных параметрах обрабатываемого материала», является законченным научным исследованием, посвященным решению актуальной научно-технической проблемы создания резонансных вибрационных машин. Выводы и заключения, сформулированные автором, обоснованы и представляются достоверными, обладают новизной и практической ценностью. Публикации автора и автореферат полностью соответствуют содержанию диссертации. Диссертационная работа аккуратно оформлена, написана ясным языком, приведенные иллюстрации достаточны для восприятия изложенного материала.

По структуре, содержанию и объёму работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 18.03.2023) и пунктам 1, 2 и 3 паспорта научной специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки), а ее автор – Лян И.П. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры

«Естественнонаучные дисциплины»

ФГБОУ ВО Уральского государственного

университета путей сообщения

старший научный сотрудник,

доктор технических наук (специальность
01.02.06. – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры),

 / Румянцев Сергей Алексеевич

Дата «22» 08 2023 г.

Адрес: 620034 Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,
ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения,
Тел/факс +7 912 222-99-10
Эл. почта: SRumyantsev@usurt.ru

