

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.075.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ.
А.А. БЛАГОНРАВОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИМАШ РАН), ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 26.09.2023 г. № 8

О присуждении Ляну Илье Павловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Поддержание резонансных режимов работы транспортно-технологических вибрационных машин при переменных параметрах обрабатываемого материала» по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки) принята к защите 11 июля 2023 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом 24.1.075.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН), почтовый адрес: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4. Совет утвержден приказом Минобрнауки России от 22.03.2022 г. № 264/нк.

Соискатель Лян Илья Павлович, 24 января 1995 года рождения, в 2016 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), освоив программу бакалавра по специальности 15.03.03 «Прикладная механика». В 2016 году поступил в магистратуру МГТУ им. Н.Э. Баумана, которую окончил с отличием в 2018 году по направлению подготовки 15.04.03 «Прикладная механика». В 2018 году поступил в аспирантуру ИМАШ РАН, которую окончил в 2022 году, освоив программу подготовки научно-педагогических кадров по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-

исследователь». В настоящее время работает младшим научным сотрудником отдела «Вибрационная биомеханика» ИМАШ РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории вибромеханики отдела «Вибрационная биомеханика» ИМАШ РАН.

Научный руководитель – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор **Пановко Григорий Яковлевич**, главный научный сотрудник отдела «Вибрационная биомеханика», и.о. заведующего лабораторией вибромеханики ИМАШ РАН.

Официальные оппоненты:

Муницын Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), г. Москва;

Румянцев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС), г. Екатеринбург

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (НПК «Механобр-техника»), г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном главным специалистом, кандидатом технических наук Коровниковым Александром Николаевичем и научным консультантом, кандидатом технических наук Блехманом Леонидом Ильичом, указала, что диссертационная работа Ляна Ильи Павловича представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Отмечено, что диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы создания резонансных вибрационных машин. В заключении указывается, что диссертация полностью соответствует требованиям «Положения

о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Лян Илья Павлович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

Соискателем опубликовано 25 научных работ, из них 13 по теме диссертации, в том числе патент на изобретение, 3 статьи в журналах из списка ВАК, 7 публикаций, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science и 4 – в других изданиях.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Lyan, I. Creation and verification of spatial mathematical model of vibrating machine with two self-synchronizing unbalanced exciters / I. Lyan, G. Panovko, A. Shokhin // Journal of Vibroengineering. – 2021. – Vol. 23, No. 7. – P. 1524-1534.

2. Lyan, I.P. Modeling of a vibrating machine with spatial oscillations of the working body / I.P. Lyan, G.Y. Panovko, A.E. Shokhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1129. – P. 012038.

3. Lyan I., Panovko G., Shokhin A. Dynamic Portrait Calculation of the Systems with Spatial Oscillations // AIP Conference Proceedings. 2023. – Vol. 2697. – P. 050003

4. Лян, И.П. Сравнительный анализ энергоэффективности использования вибрационных технологических машин в резонансных и зарезонансных режимах работы / И.П. Лян, Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин // Обогащение руд. – 2019. – № 66. – С. 40-46. Determination of mass-geometric characteristics of self-regulating debalance of an inertial vibration exciter / K. Krestnikovskii, I. Lyan, G. Panovko, A. Shokhin // Vibroengineering Procedia, St. Petersburg. – 2019. – Vol. 25. – P. 70-75.

5. Патент № 2728448 С1 Российская Федерация, МПК F16F 15/22, G01M 1/38. Устройство автоматического центрирования динамической системы вибромашины: № 2019120920: заявл. 04.07.2019: опубл. 29.07.2020 / И.П. Лян,

Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). Патент РФ на изобретение № 2728448, МПК F16F15/22 (2006.01). Опубликовано 29.07.2020. Бюл. № 22.

На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы:

1. От оппонента Муницына Александра Ивановича, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва.

Замечания:

1) во второй главе диссертации производится оценка потребляемой электрической мощности зарезонансной и резонансной машины. Рассеяние энергии учитывается только в пружинах по модели вязкого трения. При учете потерь энергии на полезную работу вибрационной машины, принимаемый в расчетах коэффициент трения должен быть увеличен, что приведет к значительному увеличению потребляемой мощности резонансной вибромашины. При этом качественное соотношение рассматриваемых типов машин останется прежним;

2) в пятой главе диссертации приводятся результаты численных и натурных экспериментов по поддержанию резонансных колебаний. При этом рассматриваются разные законы массы обрабатываемого материала, хотя интереснее было бы сравнить полученные результаты для одного случая. Результаты представлены в виде процессов изменения во времени разности фаз и частоты управления, но не показано изменение амплитуды колебаний стенда. Способность поддерживать постоянную амплитуду колебаний является важной характеристикой вибрационной машины;

3) применяемая в работе система автоматического поддержания резонансного режима колебаний при изменении массы обрабатываемого материала на основе динамического портрета имеет один недостаток. Эта система не учитывает возможные расхождения между математической моделью и

реальной машиной. В частности, не учитывается изменение потерь энергии при изменении загрузки машины и возможное изменение параметров модели в процессе эксплуатации.

2. От оппонента Румянцева Сергея Алексеевича, доктора технических наук, старшего научного сотрудника, профессора кафедры «Естественнонаучные дисциплины» ФГБОУ ВО УрГУПС, г. Екатеринбург.

Замечания:

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. Все 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 остается прежней, просто ее 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 счет эффекта Зоммерфельда? Все эти вопросы оставлены открытыми.

3. От ведущей организации - НПК «Механобр-техника», г. Санкт-Петербург.

Замечания:

1) в главе 4, посвященной разработке математической модели лабораторного образца резонансной вибрационной машины (грохота) сделано предположение (стр. 68 диссертации), что “материал движется по рабочему органу без отрыва от поверхности”. Экспериментальные значения амплитуд, с которыми сопоставлялись расчетные данные, также получены на установке, в которой обрабатываемый материал моделировался закрепленной емкостью с переменной массой. Предположение о безотрывном движении материала и, как следствие, отсутствии ударных воздействий не соответствует технологически эффективным и характерным для большинства вибрационных грохотов условиям их работы в режиме интенсивного подбрасывания материала, при которых значения параметра поперечной перегрузки w_n (отношения амплитуды нормальной к поверхности составляющей ускорения колебаний к нормальной составляющей ускорения свободного падения) составляют около 4. Параметр w_n , является важнейшим для вибрационных транспортно-технологических машин и определяет не только эффективность технологического процесса, но и уровень энергозатрат. В работе его влияние не рассматривается;

2) в главе 4 (стр. 68) предположено также, что масса материала равномерно распределена по рабочему органу. Это допущение требует комментария, поскольку в вибрационных грохотах центр тяжести материала обычно смещен в сторону загрузки материала;

3) на рис. 1.11 (стр. 29), воспроизведенном из книги Л.А. Вайсберга, представлена зависимость относительного сдвига фаз от отношения производительности грохота к ее максимальному значению. Отождествление характера изменения массы материала на грохоте с изменением

производительности, сделанное в тексте на стр. 28 и подписи к рис. 1.11, представляется неправильным;

4) направления осей x на рис. 4.2 и левом рис. 4.3 (стр. 62, 63) не соответствуют друг другу. На рис. 4.2 эта ось направлена вдоль движения материала, а на левом рис. 4.3 — против движения;

5) в названии диссертации говорится о поддержании резонансных режимов работы машин при переменных параметрах обрабатываемого материала. Содержание работы, согласно формулировке ее цели, более узкое, в ней рассматривается изменение только массы материала;

6) упоминание двигателей внутреннего сгорания на стр. 5 и 16 не имеет отношения к работе.

7) на рис. 1.1 (стр. 14 обзорного раздела) вибровозбудители изображены не точно, с осями, лежащими в одной плоскости. В действительности они имеют скрещивающиеся оси, вследствие чего возбуждаются винтовые колебания;

8) в обзорной части работы естественно было бы упомянуть ряд работ, посвященных таким понятиям как “присоединенная масса” и эффективное вязкое сопротивление колебаниям рабочего органа машины, отражающим осредненное влияние массы перерабатываемого материала. В качестве примера можно указать следующие публикации:

— Потураев В.Н., Червоненко А.Г. Об учете влияния технологической нагрузки при динамическом расчете вибрационных конвейеров и грохотов // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Техніка, 1967. Вып. 2. С. 81—91.

— Барзуков О.П., Вайсберг Л.А., Балабатько Л.И., Учитель А.Д. Влияние технологической нагрузки на самосинхронизацию вибровозбудителей // Обогащение руд. 1978. № 2. С. 31—33.

— Потураев В.Н., Червоненко А.Г. Определение «присоединенной массы» вибрационных конвейеров и грохотов // Обогащение руд. 1966. № 6. С. 39—41.

— Франчук В.П., Анциферов А.В., Егурнов А.И. Исследование влияния

технологической нагрузки на динамику вибрационных машин // Обогащение руд. 2001. № 1. С. 27—31.

9) Укажем также на ряд описок и замечаний редакционного характера:

- на рис. 4.13 (стр. 82) первое значение на горизонтальной оси должно быть 14, а не 16 Гц;
- на стр. 95 дана ссылка на рис. 5.1 вместо 5.3;
- на стр. 95 значения должны быть от 120 до 130 с, а не от 130 до 140;
- на стр. 7 и 26 в названии книги должно быть “Синхронизация” вместо “Самосинхронизация”;
- в работе нет данных о габаритах исследуемого лабораторного образца вибрационной машины;
- в списке литературы ссылка на статью [52], опубликованную на русском языке, дана в английском переводе.

4. От Брискина Евгения Самуиловича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Динамика и прочность машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Замечание: рабочий орган прототипа (как и большинства виброгрохотов) наклонен под некоторым углом к горизонтали, однако рабочий орган объекта исследования во всех экспериментах горизонтален. Будет ли работоспособна предложенная система в случае наклона рабочего органа?

5. От Воронова Сергея Александровича, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры "Прикладная механика" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Замечания:

1) в п. «Основные результаты и выводы» автореферата говорится об устойчивых резонансных колебаниях рабочего органа, однако в работе анализ устойчивости полученных режимов не проводился;

2) в тексте автореферата в формулах на стр. 8 использованы неописанные параметры (A^*, b);

3) в модели автор использует механизм линейного вязкого трения. В реальных условиях может быть велика доля сухого трения. Обоснование такого вывода не приведено.

6. От Ерофеева Владимира Ивановича, доктора физико-математических наук, профессора, директора Института проблем машиностроения РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Без замечаний

7. От Кичкаря Ильи Юрьевича, кандидата технических наук, инженера 3 категории отдела надежности, стандартизации и качества краснодарского приборного завода «Каскад», г. Краснодар.

Замечания:

1) в обзоре современного состояния исследований при описании самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителей не указано, что явление самосинхронизации было признано открытием в 1988 году;

2) расчетная схема, представленная в разделе 2, чрезмерно упрощена – рабочий орган совершает только вертикальные колебания, хотя в разделе 4 представлена более полная трехмерная модель;

3) в тексте диссертации не приведены подробные сведения о среде моделирования, в которой была проведена обработка представленных математических моделей;

4) при верификации математической модели в разделе 4 не приведены количественные характеристики, а указано, что «сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчета показало их хорошую сходимость».

8. От Крюкова Владимира Алексеевича, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Механика и процессы пластического

деформирования» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет».

Замечания:

1) не совсем корректно произведен подсчет публикаций по теме работы. На стр. 6 автореферата автор указывает: «7 (публикаций) — в ведущих рецензируемых зарубежных научных журналах, индексируемых международными информационными базами Scopus/WoS. В списке на стр. 18 приведено только 5 публикаций. По всей видимости, автор включил в указанное число публикации в журнале «Обогащение руд»: журнал действительно индексируется в Scopus, но издается в России;

2) в общей характеристике работы и в основных результатах и выводах автор использует термин «цифровой двойник». Однако в основном тексте реферата этот термин не используется;

3) на стр. 7 автореферата автор пишет «расчетной схемы одномассовой вибрационной машины». Признак «одномассовая» относится не к машине, а к схеме. Машина не может быть одномассовой. Кроме того, более правильным, на мой взгляд, является термин «одномассная»;

9. От Яцуна Сергея Федоровича, заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск.

Замечание: поддержание резонансной частоты по разности фаз ограничивает возможность регулирования амплитуды; при понижении амплитуды колебаний (а ее изменение не учитывается системой управления) уменьшается качество работы вибромашины.

Отрицательных отзывов на диссертационную работу или автореферат соискателя не поступало.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой компетентностью и научными разработками в области вибрационной техники,

значительным числом научных трудов, в том числе, по рассматриваемым в диссертации проблемам.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **получены** количественные оценки эффективности использования резонансных режимов колебаний рабочего органа вибромашины по сравнению с зарезонансным режимом, в соответствии с которыми использование резонансного режима колебаний позволяет снизить возмущающую силу в 15 раз, при этом уменьшив энергопотребление в три раза;

- **разработана** архитектура системы автоматического поддержания резонансного режима при неопределенном изменении массы обрабатываемого материала;

- **сформулированы** требования к параметрам резонансной вибромашины, принципы организации системы автоматического поддержания резонансных колебаний;

- **разработана** математическая модель вибрационной машины с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, снабженной системой автоматического поддержания резонансного режима;

- **подтверждена** корректность и достаточная точность результатов численного моделирования динамики вибрационной машины на основе разработанного цифрового двойника путем их сравнения с результатами экспериментов;

- **создан** лабораторный образец резонансной вибрационной машины и выполнены экспериментальные исследования;

- **продемонстрирована** высокая эффективность разработанной системы автоматической настройки вибромашины на резонансный режим колебаний.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработана математическая модель вибрационной машины с самосинхронизирующимися вибровозбудителями, учитывающая изменение

массы обрабатываемого материала, моментные характеристики асинхронных электродвигателей и законы их частотного регулирования;

- разработан алгоритм поддержания резонансного режима, основанный на использовании динамического портрета вибромашины, позволяющий в режиме реального времени вычислять и реализовывать необходимое управление частотой вращения вибровозбудителей;

- разработана обобщенная математическая модель резонансной вибрационной машины, описывающая процесс поддержания резонансного режима колебаний рабочего органа при неопределенном изменении массы обрабатываемого материала.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, 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, который может служить основой для проектирования новых вибрационных машин;

- результаты исследования внедрены в учебный процесс и для выполнения научно-исследовательских, курсовых и дипломных работ бакалавров и магистров кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана;

- разработанные математические модели и алгоритм использованы при создании цифровых двойников вибрационных машин в ООО «Датаванс»;
- результаты работы использованы при оптимизации режима работы виброгрохотов и диагностики их состояния в ООО «Калькон Калуга»;
- результаты работы использованы при выполнении грантов РФФ № 18-19-00708 и № 21-19-00183, гранта РФФИ № 20-38-90211.

Достоверность результатов обусловлена строгостью математических выкладок, использованием корректных допущений и фундаментальных законов вибрационной механики, теории колебаний, теоретической механики и теории механизмов и машин, подтверждается хорошей сходимостью с экспериментальными данными, полученными в процессе исследования разработанного автором лабораторного образца резонансной вибромашины, снабженной системой автоматического поддержания резонансного режима.

Идея работы базируется на использовании систем автоматического поддержания резонансных колебаний рабочего органа вибрационных транспортно-технологических машин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями при изменении массы обрабатываемого материала.

При моделировании динамики вибрационных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями **использованы классические методы** теории колебаний механических систем, электродинамики, численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, методы теории автоматического управления; натурные испытания проводились с использованием современных методов экспериментальной механики и аппаратных средств измерения, сбора и обработки информации.

Личный вклад соискателя заключается в выполненном обзоре современного состояния исследований, сравнительном анализе энергоэффективности резонансных вибромашин, в разработке управляющих алгоритмов, расчетных моделей и их численном анализе, в создании лабораторного образца резонансной вибромашины, в проведении

