

Диссертационный совет 212.298.09 при
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(национальный исследовательский
университет)» 454080, г. Челябинск, пр.
им. В. И. Ленина, 76

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Трубачева
Евгения Семеновича на диссертацию Фадюшина Дениса Вячеславовича
«Повышение характеристик пневматических роторных машин за счет
модификации геометрических параметров планетарного механизма»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности

05.02.02 - «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Актуальность темы диссертации

Возможности прогресса машин в определяющей мере зависят от развития методов их проектирования и изготовления. Многие из машин, не без оснований считавшиеся экзотическими в силу их нетехнологичности, стали вполне доступными для производства. К ним, в частности, относятся планетарно-роторные машины (ПРМ) с плавающими сателлитами и некруглыми колёсами, имеющими наружные и/или внутренние зубья. При принципиальной известности их совершенствование до последних пор было малоактуальным из-за трудностей изготовления некруглых колёс. В последние два десятилетия ситуация изменилась радикальным образом. Технологии электроэрозионной и лазерной обработки перестали быть редкими или непонятными, они стали привычными и широко распространёнными как на крупных, так и на малых предприятиях. Это в значительной мере облегчило внедрение ПРМ, что, в свою очередь, сделало актуальным совершенствование методов их проектирования, доведение их перспективных схем до решений, конкурентоспособных по сравнению с другими вариантами насосно-компрессорной техники. К настоящему времени главное развитие указанных методов получено в работах Ан И-Кана (результатирующим трудом стала

докторская диссертация 2001 г.), Zhang Quan и др. китайских исследователей, а также работы курганской школы под руководством проф. Г. Ю. Волкова, в частности, последняя диссертационная работа В. В. Смирнова. В упомянутых исследованиях была проведена классификация возможных схем ПРМ, выполнена оценка технических возможностей этих схем и намечены пути создания инженерных методик геометрического расчета ПРМ. Далее встала задача рационального выбора области применения таких машин. По оценкам соискателя оппонируемой работы – это не столько гидравлические, сколько пневматические машины. ПРМ компактны, обладают высокой производительностью. Принципиально они имеют большой ресурс, т. к. в них отсутствуют нагруженные кинематические пары скольжения, а износ основных (зубчатых) поверхностей не приводит к потере герметичности рабочих камер. Как было показано в предшествующих работах, по условию контактной прочности зубьев, ПРМ не могут длительно выдерживать давления среды свыше 10 МПа, что существенно ниже давлений рабочей среды в современных гидроприводах. С другой стороны, давление среды, обеспечиваемое ПРМ, вполне достаточно для применения их в качестве пневмомашин (компрессоров, пневмодвигателей и, тем более, вакуумных насосов). Однако известные геометро-кинематические схемы ПРМ не обеспечивают степень сжатия рабочей среды, достаточную для эффективного применения в пневмомашинах. Это определило направленность оппонируемой диссертации на решение актуальной задачи повышения степени сжатия в рабочих камерах ПРМ. Успешное решение этой задачи позволит создать компрессоры на базе ПРМ, способные потеснить широко применяющиеся на рынке поршневые и винтовые аналоги.

Краткая оценка содержания работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 125 наименований, изложена на 139 страницах и включает в себя 59 рисунков и 16 таблиц.

В первой главе рассмотрены механизмы объемных гидро- и пневмомашин, широко распространенные в современной технике, а также

известные конструкции планетарно-роторных машин (ПРМ) с плавающими сателлитами. Приведена классификация ПРМ с точки зрения их применимости в пневмомашинах и выделен основной классификационный признак – разность количества волн солнечной шестерни и эпициклического колеса. Показано, что практическое значение имеют схемы с разностями 2, 1, 0.

Во второй главе проанализированы существующие методы расчета и проектирования ПРМ, отмечен недостаток этих методов – нерешённость исключения подклинивания сателлитов на этапе проектирования и предложено соответствующее уточнение метода геометрического проектирования некруглых зубчатых колес ПРМ, разработанного Г. Ю. Волковым и В. В. Смирновым. Сделан вывод о том, что для пневмомашин, с точки зрения минимизации остаточного объёма, лучшие результаты обеспечивают схемы с разностью чисел волн 1 и 0.

Третья глава посвящена исследованию первого частного случая из указанных двух – ПРМ с числами волн ротора и статора, отличающимися на единицу. Задача снижения остаточных объемов решена путем сближения центроид некруглых колес за счет срезания вершин зубьев шестерни и эпициклического колеса концентрическими окружностями. Другая важная задача проектирования – максимизация площади сечения подводящих каналов ПРМ – решена за счет выполнения каналов в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни.

В четвертой главе рассматривается второй частный случай – ПРМ с одинаковым числом волн солнечной шестерни и эпициклического колеса. Важный момент, имеющий значение не только для ПРМ, но и для планетарных зубчатых передач, вообще, – разработана ранее отсутствовавшая методика расчета передач, у которых числа зубьев солнечной и коронной шестерён совпадают.

Ещё одно важное свойство обнаружено соискателем в случае применения ПРМ в пневмомашинах: инерционные силы, действующие на сателлит в его критических положениях, способствуют смещениям сателлита в сторону эпицикла, благоприятным с точки зрения целостности механизма силами. В главе приведена имеющая, главным образом, практическое значение

методика определения параметров ПРМ с выстоями сателлитов, наличие которых обеспечивает наивысшую степень сжатия прокачиваемой среды.

В пятой главе приводятся результаты испытаний лабораторных образцов (моделей) ПРМ в режимах вакуумного насоса и компрессора. Основным итогом экспериментов – подтверждение принципиальной работоспособности разработанных механизмов и корректности методик их геометрического расчета.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Положения, выносимые на защиту, сформулированы на с. 8 диссертации.

Положение 1 – уточненный метод геометрического расчёта зубчатых звеньев ПРМ. Обоснование развития базового метода (принятого за основу), состоит в выборе предельно логичного пути решения расчётной проблемы подклинивания звеньев – путём простой и интуитивно понятной корректировки положения зубьев одного из звеньев. Приём является доступным с точки зрения использования современных средств автоматизированного проектирования-конструирования. Введенное уточнение расширяет область применения метода, практически не усложняя процедуры расчета.

Положение 2. Методика геометрического расчета планетарного (круглозвенного) механизма с одинаковым числом зубьев центральных колес внешнего и внутреннего зацепления является корректной и обоснованной, так как опирается на проверенные (стандартные) расчетные зависимости, хотя и использованные в несколько иной последовательности, что не нарушает их корректности. Методика геометрического расчета ПРМ с «выстоями» плавающих сателлитов вполне обоснована, так как опирается на уже проверенный метод геометрического расчета, при условии, что центровая траектория сателлита задана «кусочной» функцией.

Положение 3. Методика расчета каналов в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни является обоснованной, так как заложенные

в ее основу параметрические соотношения вытекают из геометро-кинematicкого анализа работы механизма. Корректность расчета размеров и расположения каналов подтверждена экспериментально.

Обоснованными являются содержащиеся в работе выводы:

- о предпочтительности схем ПРМ с разностью чисел волн центральных колес $N-M=1$ и $N-M=0$ (глава 2) для использования в пневмомашинах – обосновано расчётной сопоставительной оценкой остаточных объёмов и возможной степени сжатия с другими вариантами разностей;
- о предпочтительности схем ПРМ 3-2, 4-3 и 5-4 с каналами, расположенными в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни – обосновано условием максимизации сечения подводящих/отводящих каналов;
- о предпочтительности схемы 1-1 среди схем ПРМ с одинаковыми числами солнечного и коронного колёс – обосновано условием минимизации остаточных объёмов, а схем 2-2, 3-3 и 4-4 – по совокупности признаков (симметрия, производительность и степень сжатия).

Достоверность и новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Исследование в целом является новым, развивающим ранее выполненные исследования ПРМ. В частности новыми являются:

- уточнение и усовершенствование метода геометрического расчёта некруглых зубчатых колес ПРМ путем перехода в единую систему отсчета, связанную с мнимым водилом; достоверность предложенного уточнения подтверждается построением схем ПРМ, рассчитанных при любых параметрах механизмов, с помощью графического редактора КОМПАС-3D; отсутствие нежелательного явления подклинивания подтверждается также испытанием лабораторных образцов ПРМ;
- постановка задачи и разработанная методика определения положения и размеров подводящих каналов в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни ПРМ;
- выявленный положительный эффект действия на сателлиты инерционных сил, проявляющийся в ПРМ с одинаковым числом волн

центральных колес.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе автор неоднократно констатирует, что препятствием для широкого применения ПРМ являются недостатки технологии обработки зубьев некруглых колёс. На с. 16 это, вообще, отмечено как единственная причина того, что в мире (!) существует единственное предприятие, производящее ПРМ. При этом именно этот вопрос рассмотрен в работе минимально и поверхностно. Например:

– лазерная обработка, на которую делается упор как на технологическое решение, описана поверхностно, без анализа значения и влияния её хотя бы широко известных типовых погрешностей (конусности (уклона), структуры поверхности) и ограничений;

– при анализе на с. 26-27 и в табл. 1.3. говорится об упрочнении, но не говорится о материале, а приводимые параметры шероховатости зубьев, вырезанных лазерным лучом (от R_a 2,5 мкм и хуже), едва ли применимы к высокоэффективным ПРМ. Влияние же погрешностей пакетной сборки на работу ПРМ и её эволюции при реверсивной и динамичной работе даже не упомянуто, а ведь оно может оказаться определяющим в вопросе долговечности решения в принципе;

– стоимостные оценки, которые даны на с. 27 и служат аргументом в пользу пакетной конструкции, являются сомнительными (даны для разных видов резки с резко различными параметрами точности и шероховатости, для материала, который, судя по всему не будет применён в ПРМ, не учтена стоимость подготовительно-сборочных операций).

2. Наглядное изображение проблемы подклинивания на рис. 2.6 (упирание в противоположенные боковые поверхности зубьев) противоречит наглядному изображению предлагаемой коррекции на рис. 2.7 (угловое смещение обеих поверхностей в одном и том же направлении). Возможно, это есть недостаток графической демонстрации?

3. В анализе вопроса прочности ПРМ из разных материалов на сс. 43-44 допускаются некоторые вольности (хотя это не порочит главный вывод анализа):

– материал 12ХНЗА объявляется «максимально прочным» (среди каких сталей, по какому критерию?);

– если предполагать, что проблема производства ПРМ решена с помощью лазерной технологии и сборных «пакетных» колёс, то корректно ли рассматривать цементацию и ТВЧ как вид термообработки?

– утверждение «фирма «Hydromech» [68] расчетную длительность работы своих гидромоторов не указывает, однако очевидно, что ПРМ со стальными колесами может выдерживать давление 20-25 МПа лишь при ограниченном ресурсе» слишком категорично – по крайней мере, без тщательного анализа конструкций и – ещё лучше и вполне возможно – экспериментальной проверки.

4. В экспериментах, описанных в гл. 5, в качестве рабочей среды использовано масло «Вапор» – сравнительно вязкое, хотя ранее автор приходил к выводу о предпочтительности ПРМ для пневмопривода. Необходимо пояснить, насколько это несоответствие может сказаться на выводах о верности методик расчёта и рекомендаций?

5. Для экспериментальных механизмов, приведённых в гл. 5, не даны важнейшие параметры шероховатости и точности, которые могли сказаться на результатах или, по крайней мере, должны стать точкой отсчёта для дальнейших исследований:

– зубчатых венцов,

– торцов звеньев (тем более на с. 115 автор сам обращает на протечки по торцовым сопряжениям как на один из основных факторов, определяющих эксплуатационные характеристики).

6. К сожалению, один из главных недостатков работы – в нерешённой задаче (которую автор, правда, и не ставил перед собой, но которая лежит на поверхности) расширения практического применения ПРМ – нашёл отражение во внедренческой части на с. 116: компрессор ещё только проектируется (с какими параметрами, взамен какой альтернативы?), использование компрессора «предполагается».

7. В ряде случаев употреблены сомнительные или просторечные термины:

– с. 34 «цифры от 30° до 60°» – цифры есть символы для обозначения чисел, речь, видимо, идёт о значениях;

– с. 105 и в других местах – «обороты», «числа оборотов» вместо «частота вращения»;

– с. 111 – «обварили», «проторцевали»

Кроме того, в работе произвольно меняются названия центральных звеньев ПРМ, нарушается единство терминологии. В главе 1, стр. 22 используется термин «солнечная шестерня», а в главе 2, стр. 47 тоже звено названо – «ротор». Аналогично, одно и то же охватывающее звено автор называет то «эпицикл», то «эпициклическое колесо», то «статор».

8. В тексте диссертации присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки, например:

– с. 40, табл. 2.2 – «предворит.»;

– с. 55, нижний абзац – «располагаются»;

- стр. 80, 2 абзац – «располагать», а не «распологать». Тут же «...предпочтение следует отдать, ...» - лишняя запятая;

- стр. 63, 4 абзац «... в особенности вакуумных насосах, влияние...» отсутствует запятая;

– с. 65 – «болшьше», «вычисленном».

Сделанные замечания **не имеют принципиального характера** и не влияют на общую положительную оценку работы. Многие из замечаний могут пониматься как пожелание развития работы в направлении совершенствования методов проектирования и производства исследуемых машин.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.02.02 - «Машиноведение, системы приводов и детали машин» в следующих пунктах:

1. «Теория и методы исследования процессов, влияющих на техническое состояние объектов машиностроения, способы управления этими процессами»;

2. «Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов, узлов и деталей машин»;

4. «Методы исследования и оценки технического состояния объектов

машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования».

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы и отражает её основные результаты.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» (далее «Положение...»)

Диссертационная работа Фадюшина Дениса Вячеславовича является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи синтеза и анализа планетарно-роторных машин, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, путём совершенствования методов их проектирования, имеющей значение для проектирования указанных машин (соответствие п. 11.9 «Положения...»).

Диссертация написана автором самостоятельно. Задачи рассмотрены последовательно во всех стадиях, начиная от обзора объемных машин-аналогов, классификации схем ПРМ, анализа уже существующих методов их расчета, продолжая доработкой и уточнением методов расчета ПРМ, предложением конструктивных мероприятий, обеспечивающих достижение поставленной цели, разработкой соответствующих расчетных методик, численной и экспериментальной проверкой достоверности полученных теоретических результатов. Таким образом работа обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения, полученные лично автором. Диссертация, в целом, имеет прикладной характер, в ней приводятся сведения о практическом использовании полученных научных результатов. Предложенные в диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями в области проектирования планетарно-роторных машин (соответствие п. 11.10 «Положения...»)

Основные результаты были опубликованы в 15 работах, в том числе 7 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьях в журналах,

индексируемых базой Scopus; также получены 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели (соответствие пп. 11.11, 11.12, 11.13 «Положения...»), все заимствования были выполнены корректно (соответствие п. 11.14 «Положения...»). Автор диссертации – Фадюшин Денис Вячеславович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

Доктор технических наук по специальности
05.02.18 - «Теория механизмов и машин»,
профессор кафедры «Конструкторско-
технологическая подготовка
машиностроительных производств»,
директор научного подразделения
«Институт механики имени
профессора Гольдфарба В.И.».

Почтовый адрес: Россия, 426069,
Удмуртская Республика, г. Ижевск,
ул. Студенческая, 7, <https://istu.ru>
Тел. раб.: 8 (3412) 77-60-55, доб. 4343
E-mail: trp@istu.ru

04.05.2022

Трубачев Евгений Семенович

Подпись Е. С. Трубачева удостоверяю
Ученый секретарь ФГБОУ ВО
«ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»
доктор технических наук, профессор



Н. С. Сивцев