

На правах рукописи



Ненашев Павел Николаевич

**СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДА
ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ АМФИБИЙНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ
ИСКЛЮЧЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В МЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ**

Специальность

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Гусеничные машины и прикладная механика» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Курганский государственный университет»

Научный руководитель:

Тараторкин Игорь Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гусеничных машин и прикладной механики, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», г. Курган

Официальный оппонент:

Сарач Евгений Борисович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры СМ-9 «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Официальный оппонент:

Вязников Максим Валерьевич

кандидат технических наук, генеральный директор, генеральный конструктор ООО «Миконт», г. Чебоксары

Ведущая организация:

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного машиностроения», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится **«16» июня 2021 г.**, в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. Тел/факс (351) 267-91-23, E-mail: abyzovaa@susu.ru.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/nenashev-pavel-nikolaevich>.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.09. E-mail: D212.298.09@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

 Абызов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В конструкциях быстроходных гусеничных амфибийных машин (БГАМ) вращение водометных движителей осуществляется через механический привод, содержащий пространственно расположенные карданные передачи. К конструкции привода водометных движителей (ПВД) предъявляются высокие требования по уровню надежности. Это связано с тем, что отказ одного элемента привода исключает возможность движения БГАМ. Опыт эксплуатации БГАМ и результаты экспериментального исследования свидетельствуют об ограничении долговечности элементов ПВД. До 85-ти % нарушений функционирования происходят вследствие возбуждения колебательных процессов. В то же время, известные методики проектного расчета, изложенные в открытых отечественных и зарубежных источниках, предусматривают обеспечение прочности и долговечности при действии нагрузок, которые определяются коэффициентом динамичности без учета частотных характеристик процесса нагружения, определяемых высоко моментными колебательными процессами. Это приводит к ограничению ресурса элементов ПВД, что и определяет актуальность проведения исследований, направленных на снижение динамической нагруженности ПВД БГАМ.

Цель работы состоит в снижении динамической нагруженности привода водометных движителей амфибийных машин, на основе исключения резонансных режимов в механической системе.

Задачи исследования:

1. Теоретическое исследование системы «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина» на основе разработки математических и имитационных моделей, учитывающих необходимые конструктивные параметры ПВД, влияющие на его динамическую нагруженность.

2. Экспериментальное исследование динамической нагруженности системы «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина» при ходовых испытаниях БГАМ, оценка адекватности математических и имитационных моделей привода водометных движителей.

3. Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования. Обоснование конструкторско-технологических решений, обеспечивающих снижение динамической нагруженности привода водометных движителей.

4. Разработка усовершенствованной методики проектного расчета привода водометных движителей на основе научно-обоснованных конструкторско-технологических решений по снижению динамического нагружения ПВД

Решение выше указанных задач, позволит снизить динамическую нагруженность привода водометных движителей быстроходных гусеничных амфибийных машин и тем самым обеспечить требуемый ресурс, предъявляемый в ТТХ на изделие.

Объект исследования – процесс динамического нагружения привода водометных движителей амфибийного гусеничного бронетранспортера БТР-МДМ, содержащего пространственно расположенные карданные передачи.

Предмет исследования – формирования динамической нагруженности привода водометных движителей амфибийной машины.

Методология и методы исследования.

При решении задач диссертационного исследования имитационное моделирование динамики системы выполнено на основе разработанной имитационной математической модели с использованием методов теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления. Имитационное моделирование динамики нелинейной системы и анализ динамических процессов осуществлялся с применением прикладного программного продукта LMS Imagine.Lab Amesim. Верификация имитационной математической модели и принимаемых допущений производилась при экспериментальном исследовании нагруженности ПВД БГАМ. Ходовые испытания проводились при движении на плаву в водоеме полигона ПАО «Курганмашзавод» с использованием аттестованных средств измерения. При автоматизированной обработке результатов экспериментальных исследований применялись методы математической статистики, теории вероятности и модального анализа. Обработка осуществлялась в прикладном программном обеспечении Power Graph, Mathcad и др.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Разработаны новые математические и имитационные модели формирования динамического нагружения привода водометных движителей при вынужденных колебаниях, в том числе параметрических;

- На основе предложенных моделей научно обоснованы технические решения по снижению динамического нагружения привода водометных движителей, усовершенствована методика проектного расчета системы «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина», учитывающая кинематические, силовые, периодически изменяемые, свойства пространственно расположенных карданных передач, возбуждающих колебания, а также нелинейные характеристики соединений опор углового редуктора привода водометных движителей;

- Получены новые экспериментальные данные динамического нагружения привода водометных движителей, позволившие выявить ранее не исследованные эффекты возбуждения параметрических резонансов и режимов «биения» динамического момента при установившемся движении и при вынужденных колебаниях.

Практическая значимость исследования

Обоснованы технические решения по снижению динамической нагруженности привода водометных движителей, путем введения в конструкцию гасителей колебаний, шарниров равных угловых скоростей карданных передач, а также контроля взаимного расположения составных частей карданных передач в процессе монтажа.

Разработаны конструкторско-технологические решения, обеспечивающие повышение жесткости опоры крепления углового редуктора и исключаящие ослабление болтовых соединений при вибрациях и циклических нагрузках, превышающих расчетные;

Реализация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований изложены в двух отчётах НИР и переданы АО «СКБМ», ПАО «КУРГАНМАШЗАВОД», г. Курган. Результаты НИР использованы АО «СКБМ» при выполнении опытно-конструкторских работ по доводке конструкции ПВД. На основе выполненных опытно-конструкторских работ по программе «Садовница» реализованы технические предложения по повышению долговечности элементов и усовершенствована методика проектного расчета ПВД БГАМ. (Акт о внедрении результатов НИР № 19 от 27.02.2020 г.)

Результаты НИР использованы так же в учебном процессе подготовки специалистов по направлению 23.05.02, и аспирантов по специальности 05.05.03 в Курганском государственном университете. (Разработаны методические рекомендации к выполнению практических занятий для студентов специальности 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения» - «Подготовка нормативных материалов для исследований по определению динамической нагруженности привода водометов амфибийных гусеничных машин».)

Данная работа является составной частью госбюджетной темы №256 «Научные основы синтеза систем стабилизации траектории движения быстроходной гусеничной машины на основе инновационных информационных технологий» (Акт о внедрении результатов НИР №2 от 28.02.2020 г.).

Исследование является частью НИР проводимых совместно ООО «НИИ «Мехмаш» и АО «СКБМ» - Подвижность боевых машин. Динамика, устойчивость существенно нелинейных систем. Исследование параметрических колебаний, обеспечение их устойчивости в разветвленных системах привода водометных движителей гусеничных амфибийных машин.

Реализация результатов исследования позволила пройти государственные испытания изделиями БМД-4М и БТР-МДМ с положительным результатом, а так же обеспечить требуемый ресурс привода водометных движителей серийно выпускаемых амфибийных машин.

В ходе выполнения исследований подготовлены и опубликованы 6 научных статей, среди них 3 статьи в иностранных изданиях, индексируемых в SCOPUS и Web of Science.

На защиту выносятся положение научной новизны, практической значимости, а также результаты и выводы по работе.

Степень достоверности результатов. Правильность оценки и обоснованность научных положений работы обуславливаются использованием фундаментальных уравнений механики, теории механических колебаний; подтверждается корректностью формулировки целей и используемых методов нелинейной теории колебаний, основанных на фундаментальных исследованиях иностранных и отечественных ученых; обоснованностью допущений, принятых при подготовке имитационной математической модели; сходимостью результатов имитационного моделирования динамики системы и данными полученными при экспериментальном исследовании. Сопоставление результатов имитационного моделирования и экспериментальных данных полученных при испытаниях, по частоте и амплитуде динамического момента, сходиться с требуемой точностью при доверительной вероятности не менее 95 %, ввиду неполноценности первоначальных данных для имитационного моделирования. Использование комплекса современной

высокоточной информационно-измерительной аппаратуры позволило верифицировать достоверность полученными данными при измерениях.

Апробация работы.

Основные положения, предлагаемые решения и выводы работы докладывались и обсуждались:

- на научно-технических семинарах кафедры «Гусеничных машин и прикладной механики» КГУ, Курган в 2015 - 2020 гг.;
- на научно-технических семинарах и научно-технических советах АО «СКБМ», Курган в 2015-2019 гг.;
- Международных научно-технических конференциях «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» - г. Севастополь, 2018-2020 гг.
- всероссийской научно-технической конференции «120 лет машиностроению Зауралья» - г. Курган, 2020 г.

Публикации

По результатам исследований подготовлены и опубликованы 6 научных статей, из них 3 статьи в иностранных изданиях, индексируемых в SCOPUS и Web of Science.

Структура и объем работы.

В состав работы включено введение, основной текст, четыре главы, обобщение результатов, список использованной литературы, определяющий основные источники и приложения. Работа состоит из 144 листов машинного текста, содержит 66 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 66 наименований и 4 приложения на 12 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана краткая характеристика состояния проблемы, поставлена цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе (*Состояние вопроса и обоснование задач исследования*) приводится анализ литературных источников по исследованию подвижности быстроходных гусеничных амфибийных машин, анализу конструкций и нагруженности водоходных движителей. Совершенствованию водоходных качеств быстроходных гусеничных амфибийных машин уделяется должное внимание во многих прибрежных странах, в том числе и в России.

Вопросы проектирования быстроходных гусеничных амфибийных машин, обеспечения им требуемых водоходных характеристик мало освещены в технической литературе. Публикации имеют **крайне ограниченный характер** и чаще всего посвящены отдельным вопросам, не рассматривая проектирование в целом.

Несмотря на недостаток специализированных материалов по быстроходным гусеничным амфибийным машинам, многие из актуальных вопросов рассматриваются в литературе посвященной судостроению, например, под редакцией Войткунского Я.И. Огромную работу в области изучения амфибийных машин провел Степанов А.П., который, написал множество отдельных работ, справочников, учебных пособий, статей. Водоходные движители были достаточно подробно

рассмотрены Русецким А.А., Папиром А.Н, Куликовым С.В. Однако вопросы динамической нагруженности ПВД в этих работах не рассмотрены.

В иностранной технической литературе стоит отметить совместные работы группы инженеров Ehrlich I.R., Kamm I.O., Worden G., а также научный коллектив - Sloss D., Hanamoto B., Nutall C.J. под руководством Ehrlich I.R. и фундаментальный труд Carlton J. В работах исследовательского центра **Marine Jet Power** определены основные направления конструкций водометных двигателей мощностью до 1300 кВт, в том числе применяемых для амфибийных машин, при этом уделяется большое внимание оптимизации газогидродинамических процессов на рабочих лопастях двигателя.

Для обеспечения движения на плаву в конструкциях амфибийных машин используются различные двигатели. В качестве водоходного двигателя могут применяться как сухопутные двигатели (колесный, гусеничный, роторно-винтовой), так и специализированные – гребные винты, водометы. Конструкция водоходных двигателей и их приводов непрерывно совершенствуются для обеспечения скоростных свойств, энергоэффективности и надежности. При проектном расчете приводов этих двигателей нагрузка определяется при равномерном движении машины с учетом определенного значения коэффициента динамичности. По результатам проектного расчета ПВД, исследуемого объекта, запас прочности элементов конструкции составляет 3...4 в течении требуемого ресурса. Однако из опыта доводки опытных образцов машины следует, что долговечность элементов ПВД ограничена и не превышает 20 % требуемого ресурса.

В диссертационной работе устанавливаются причины ограниченной долговечности элементов конструкции ПВД, совершенствуется методика проектного расчета, поскольку существующий алгоритм типового расчета не учитывает переменные (динамические) составляющие крутящего момента, приводящие к высокой вибрационной нагруженности элементов конструкции привода, ослаблению болтовых соединений фланцев, кронштейнов и их разрушению. При этом самопроизвольное отвинчивание болтовых соединений креплений опор угловых редукторов к корпусу рассматривается как проявление нелинейных эффектов, описанных Блехманом И.И.

Исследованию вибронгруженности ТС посвящены работы следующих отечественных и зарубежных учёных: В.Б. Держанского, И.Т. Воробьева, Ф.Р. Геккера, А.И. Гришкевича, С.Н. Иванова, А.А. Полуняна, В.В. Селифонова, И.А. Тараторкина, В.Е. Тольского, И.Н. Успенского, А.С. Уфимцева, А.Б. Фоминых, К.В. Фролова, В.М. Шарипова, Paul D. Walker, Nong Zhang, M. Zink, M. Hausner и др. Однако, применительно к динамическому нагружению ПВД необходимо проведение дополнительных исследований, направленных в частности на оценку устойчивости динамической системы и вероятности возникновения резонансных колебаний.

В первой главе выполнен предварительный анализ динамики ПВД на основе упрощенной динамической модели и уравнения, описывающего возникновение параметрических резонансных колебаний (1):

$$J_{\text{пр}}\ddot{\varphi} + c\left(1 + \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{\text{ср}}}\sin(2\dot{\varphi}t)\right)\varphi = M_{\text{д}} - M_{\text{с}},$$

где $J_{\text{пр}}$ и c - приведенные момент инерции ПВД и его жесткость; φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ - обобщенная координата, ее первая и вторая производные; $\varphi_{\text{ср}}$, $\Delta\varphi$ - постоянная и переменная

составляющая угла поворота входного вала редуктора; M_d, M_c – движущий момент и момент сопротивления среды.

Это дифференциальное уравнение соответствует форме уравнения Матье, так как в состав упругого момента входит периодически изменяемый параметр. Для определения области устойчивости с помощью диаграммы Айнса-Стретта, уравнение Матье приводится к следующей виду и форме параметров \mathbf{a} и \mathbf{h} (2):

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2[\mathbf{a} + 2h\cos(2\tau)]\varphi = 0,$$

Отношение собственной и возмущающей частот определяет абсциссу $\mathbf{a} = \left(\frac{2\omega_0}{p}\right)^2$,

$\omega_0^2 = \frac{c}{J_{np}}$, $2\tau = 2\dot{\varphi}$. Функцией $\mathbf{h} = \mathbf{a}\mu$ является ординатой, где μ – глубина

модуляции, $\mu = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{cp}}$, $\varphi_{cp} = \frac{M_d - M_c}{c}$.

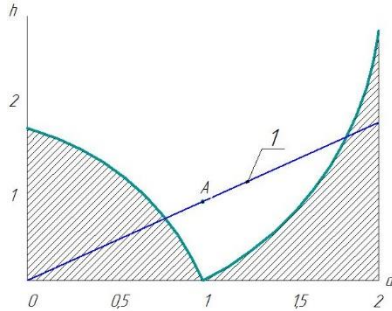


Рис. 1 – Иллюстрация диаграммы Айнса-Стретта, заштрихованные области соответствуют устойчивому состоянию

По зависимости $h = a\mu$ проводится исследование устойчивости периодического решения. Линия на диаграмме отображает функцию с параметрами соответствующими приводу левого борта $\gamma_1 = 7^\circ 29'$, $c = 10680$ Нм/рад. Она поочередно пересекает устойчивую и неустойчивую области. В области неустойчивости возможно возникновение параметрических резонансов. По расположению на диаграмме линии видно, что имеем случай пересечения довольно широкой области неустойчивости (незаштрихованные области). Это говорит о большой вероятности потерять динамическую устойчивость фактически при любой технической возможной частоте возмущения. Главным и максимально опасным является приведенный на графике резонанс при $a = 1$. В данном случае частоты возмущений и собственной имеют равные значения $p = 2\omega_0$.

Приведенное выполняется при условии отсутствия диссипации энергии. Это происходит во время переходных процессов работы ПВД в процессе входа и выхода из воды. Во время перемещения по воде работу водометов сопровождает существенная диссипация энергии. В данных условиях параметрические колебания наиболее существенны в режиме первого главного резонанса ($a = 1, p = 2\omega_0$), максимально опасного и мало чувствительного к действиям диссипативных сил. При достижении частотой критического значения, оно равно

$$p = 2\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta}{\pi}\right)^2} \pm \sqrt{\mu^2 - \left(\frac{\Delta}{\pi}\right)^2} + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta}{\pi}\right)^2, \text{ где } \Delta - \text{ является декрементом}$$

затуханий, $\Delta = \frac{2\pi\varepsilon}{\omega_0}$, ε – коэффициент затуханий.

Проведенный анализ современного состояния вопроса по динамической нагруженности ПВД БГАМ и выполненная предварительная оценка позволили обосновать цель исследования, необходимость решения ряда научных задач для ее достижения.

Во второй главе (*Теоретическое исследование динамической нагруженности ПВД БГАМ*) выполнен анализ кинематической схемы объекта исследования, математическое описание структурных составляющих динамической системы, результаты имитационного моделирования движения машины на плаву и их анализ.

Расчетная схема системы «двигатель-трансмиссия-водоходный движитель-машина» составлена в соответствии с кинематической схемой. Определены исходные данные и характеристики структурных составляющих: дизельного двигателя УТД-29В, передаточные числа трансмиссии и угловых редукторов, углы, характеризующие расположение валов карданных передач в пространстве, водометы с учетом присоединенных масс воды и собственно БГАМ. Общий вид привода водометных движителей БГАМ БТР-МДМ представлен на рис. 2.

Проведен кинематический и силовой расчет ПВД. Рассчитаны частоты вращения элементов привода водометов, крутящие моменты, нагружающих элементы привода водометов, определены напряжения в зубчатых колесах, валах, шлицевых соединениях при действии максимальной кратковременной нагрузки. Установлено, что расчетные напряжения не превышают допускаемых значений. Нагрузки на опоры валов и зубчатых передач ниже допускаемых значений, минимальный коэффициент запаса по статической грузоподъемности 1,21.

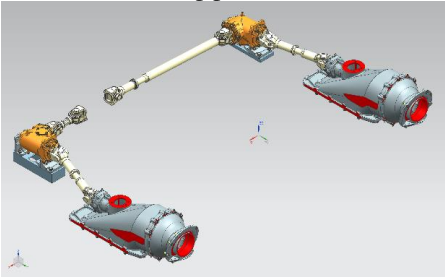


Рис. 2 - Привод водометных движителей БГАМ БТР-МДМ

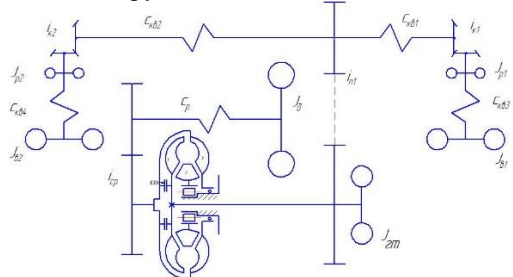


Рис. 3 – Динамическая модель привода водометов

Для определения путей снижения динамической нагруженности, возникающей в процессе передвижения БГАМ на плаву, в соответствии с кинематической схемой была разработана расчётная динамическая модель, приведенная на рис. 3, отражающая динамические связи рассматриваемой системы «двигатель – трансмиссия – привод водометов – водометный движитель». При

разработке расчетной схемы использованы подходы, сформулированные ранее в работах Альгина В.Б., Гришкевича А.И., Нарбута А.Н., Цитовича И.С. и др.

Для оценки динамической нагруженности, формируемой колебательными процессами составляется система дифференциальных уравнений, выражающая баланс между внешними силами, силами инерции, трения и упругости. Система является многомассовой (дискретная модель), и в матричной форме представлена в следующем виде:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{f\},$$

где $[M]$ - матрица масс; $[K]$ - матрица демпфирования; $[C]$ - матрица жесткости; $\{f\}$ - вектор внешних сил; $\{x\}$ - вектор реакций (перемещений). Имитационная модель системы (рис. 4) построена на основе математической и реализована в программной платформе LMS Imagine.Lab Amesim. В модели учтена асинхронность пространственно расположенной карданной передачи ПВД, приводящая к периодическим возмущениям в системе.

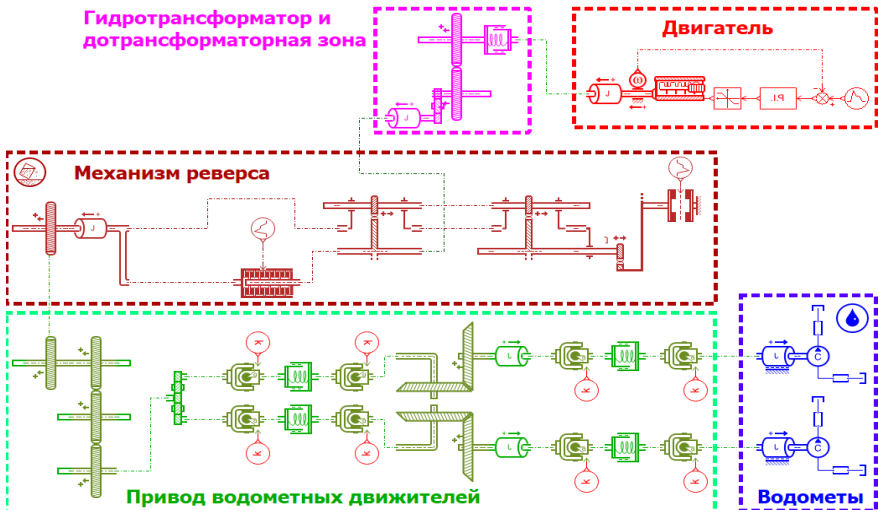


Рис. 4 - Имитационная модель привода водометных движателей

Наличие интерактивного графического интерфейса и обширных библиотек компонентов (двигателя, ГТ, зубчатых и карданных передач, и др.) позволяет эффективно проводить имитационное моделирование. Динамическая нагруженность ПВД определялась при следующих переходных процессах: разгон водометов на суше и на воде; вход и выход машины из воды при одновременной работе гусеничного и водометного движателей; включение реверса и др., а также на установившихся режимах движения машины с постоянной скоростью. В качестве примера результатов имитационного моделирования приведены временная функция динамического момента на валу ПВД при движении задним ходом, выключении механизма реверса и при последующем разгоне амфибийной машины (рис. 5).

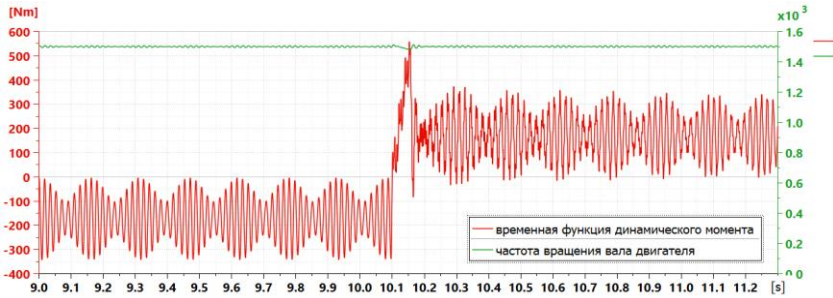


Рис. 5 – Временная функция динамического момента на карданных валах ПВД на установившемся режиме и в процессе изменения состояния механизма реверса

Полученные результаты моделирования иллюстрируют возможность возникновения особых форм колебательных процессов в системе (биения на установившихся режимах, и колебания на переходных). Из спектральной плотности процесса изменения динамического момента следует, что максимальная амплитуда спектральной плотности процесса соответствует «карданной», т.е. двойной частоте вращения приводного вала. Боковые лепестки данного пика отстоят на $\pm 6,45$ Гц и соответствуют колебаниям - биениям, вызванным близким совпадением частот вращения валов угловых редукторов (их передаточное число составляет 17/19). Таким образом, действительная амплитуда и частота динамического момента существенно превышает расчетные. При переходных процессах выключения механизма реверса на плаву и последующим разгоном коэффициент динамичности возрастает до $1.9 \dots 3,0$.

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет утверждать, что одной из главных причин ограничения долговечности элементов ПВД является резонансный режим и биения. Источником возмущения для возбуждения резонансного режима является свойство асинхронности шарниров Гука, когда при постоянной угловой скорости ведущей вилки шарнира скорость вращения входного вала углового редуктора изменяется дважды за оборот.

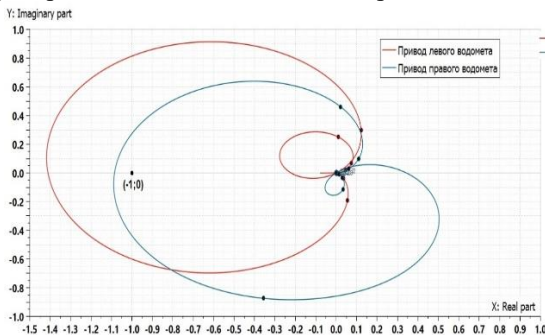


Рис. 6 - Оценка устойчивости моделируемой системы по диаграмме Найквиста

Разработанная имитационная математическая модель (см. рис. 4 и формулу (3) позволяет оценить устойчивость возникающих колебательных процессов упрощения динамической системы (рис. 6). Как следует из рисунка, годограф вектора

амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы охватывает точку с координатами $(-1; j0)$, что так же свидетельствует о неустойчивости системы.

Для оценки достоверности гипотезы об ослаблении болтов крепления опоры углового редуктора в условиях вибронегруженности вследствие проявления эффекта, описанного И.И. Блехманом – самопроизвольного ослабления болтовых соединений в нелинейной системе, в программном пакете ANSYS разработана конечно-элементная модель системы «**угловой редуктор – опора – корпус**» и выполнен анализ напряженно-деформированного состояния. Идентификация упруго-инерционных параметров расчетной модели выполнена по твердотельным чертежам и 3D модели. Следуя работам И.И. Блехмана, условие отсутствия вибрационного ослабления силы затяжки определяется из условия отсутствия проскальзывания тела неравенством

$$N > \frac{mA\omega^2}{f},$$
 где m - масса углового редуктора и опоры; $A\omega^2$ - пиковое значение виброускорения; f – коэффициент трения в резьбе при ослаблении.

Максимальное пиковое значение виброперемещения на частоте, соответствующей двойной частоте приводного вала, с учетом полученного максимального динамического момента, составляет 2,22 мм.

Расчет показывает, что в рассматриваемой конструкции $N = 21,38 < 23,37кН = \frac{mA\omega^2}{f}$. Таким образом, ослабление болтового соединения вполне вероятно.

При ослаблении на 0,1 мм крепления опоры, особенно при недостаточной ее жесткости, возникает колебательный процесс. Это приводит к уменьшению запаса прочности опоры и ее разрушению, следовательно, и всего привода.

Результаты имитационного моделирования показывают, что динамический момент на валах ПВД существенно превышает расчетные значения, формируемый колебательными процессами - биениями, а также возможными резонансными режимами при параметрических колебаниях. Кроме того, другой причиной, ограничивающей долговечность элементов ПВД, может быть проявление эффекта самопроизвольного ослабления болтов крепления недостаточно жесткой опоры углового редуктора к корпусу, исследованного И.И. Блехманом.

В третьей главе (*Экспериментальное исследование динамической нагруженности ПВД БГАМ*) приведены технические характеристики объекта исследования, сформулированы цель и задачи экспериментального исследования, комплекс информационно измерительной аппаратуры, результаты экспериментального определения динамической нагруженности при вариации частоты вращения вала двигателя.

При выполнении имитационного моделирования динамики ПВД принят ряд допущений, корректность которых, а также идентификация отдельных параметров системы определялись при экспериментальном исследовании в процессе движения амфибийной машины. Основной целью экспериментального исследования являлось определение силовых и кинематических параметров, характеризующих зависимость динамического момента от частоты вращения вала двигателя. А также решались следующие задачи:

1) определение динамических моментов, их частотных характеристик на валах ПВД при движении БГАМ на плаву.

2) Определение параметров вибронагруженности элементов конструкции привода.

3) Определение инерционных параметров рабочих колес водометов с учетом присоединенных масс воды.

Объектом экспериментального исследования является опытный образец изделия БТР-МДМ «Ракушка-М» массой 14000 кг, оснащенный двигателем УТД-29В мощностью 331 кВт, четырехступенчатой гидромеханической трансмиссией, ПВД, включающего карданные передачи, угловые редуктора, рабочие колеса водометов, размещенные на днище вдоль правого и левого бортов изделия.

Экспериментальное определение крутящих моментов на валах ПВД подразумевает автоматизацию ресурсоемких операций сбора и обработки экспериментальных данных по принципу целенаправленного повышения главных технических показателей систем информационно-измерительного оборудования. В связи с поставленными в диссертационном исследовании задачами, для проведения измерений был использован комплекс информационно-измерительной регистрирующей аппаратуры, состоящий из IBM-совместимого ЭВМ в исполнении ноутбук GETAC, многоканальной системы регистрации данных L-Card E 14-440, усилительных ячеек – нормирующих преобразователей низкого уровня и источника питания стабилизированный для питания системы регистрации данных, усилителей, тензомостов и датчиков. При этом управление системой регистрации данных производится с помощью программного обеспечения Power Graph Professional 3.3.9.

В процессе эксперимента определялись следующие параметры:

- 1 – крутящий момент на карданных валах ПВД;
- 2 – частота вращения вала двигателя;
- 3 – виброускорения по трем осям на корпусе углового редуктора.
- 4 – время.

Экспериментальное исследование выполнялось в соответствии с основными положениями типовой методики испытаний на плаву ПМ-796118 «БТТ. Машины плавающие гусеничные и колесные». На установившихся режимах работы частота вращения вала двигателя дискретно изменялась в диапазоне от минимально устойчивых 800 до 2370 об/мин с интервалом 200 об/мин. Фрагмент осциллограммы изменения динамического момента на установившемся режиме и его частотный спектр приведены на рис. 7.

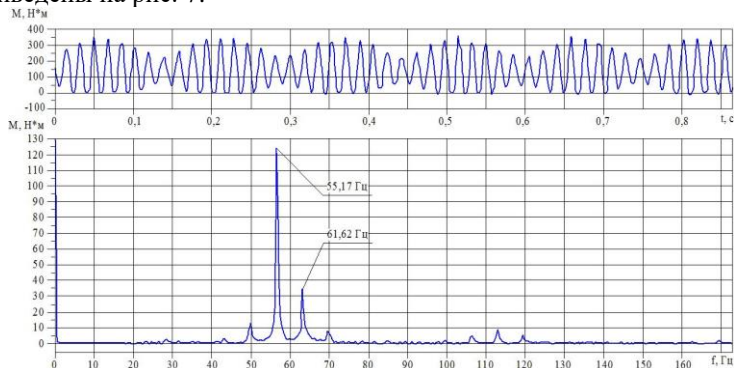


Рис.7 – Фрагмент осциллограммы изменения динамического момента и амплитудно-частотная характеристика при работе водомета на установившемся режиме

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что колебательный процесс носит характер «биений», что вызвано суммированием периодических составляющих момента близких по частоте. Это определяется величиной передаточного числа углового редуктора (19/17), в связи, с чем частоты периодических составляющих двух карданных валов одного борта на всех скоростных режимах работы двигателя отличаются друг от друга на 11,7 %. Из спектральной плотности процесса изменения динамического момента следует, что максимальная амплитуда спектральной плотности процесса соответствует «карданной», т.е. двойной частоте вращения приводного вала. Боковые лепестки данного пика отстоят на $\pm 6,45$ Гц и соответствуют колебаниям, вызванным близким совпадением частот вращения валов угловых редукторов (их передаточное число составляет 19/17). Таким образом, действительная амплитуда динамического момента и частота существенно превышает расчетные. При переходном процессе включения-выключения механизма реверса коэффициент динамичности возрастает до 1.9 ...3,0. Кроме режима биения в ПВД происходят так же параметрические колебания, формируемые карданными передачами с асимметричными шарнирами Гука. При постоянной угловой скорости ведущей вилки шарнира, соответственно и входного вала углового редуктора дважды за оборот изменяется угловая скорость.

Экспериментальные значения приведенных моментов инерции определялись при быстром разгоне машины по уравнению: $J_{np} = \frac{\Delta M \cdot t_p}{\Delta \omega}$, где ΔM - разность моментов динамического и статического; t_p - время разгона; $\Delta \omega = \Delta \omega_\delta \cdot U_{np}$ - скорость вращения водомета, $\Delta \omega_\delta$ - скорость вращения вала двигателя, U_{np} - передаточное ПВД. При движении на суше $J_{np} = 0,16$ кгм², а на плаву с учетом присоединенных масс воды $J_{np} = 0,16 \dots 0,17$ кгм².

Наибольшее значение виброускорения на корпусе углового редуктора наблюдается по оси у (в поперечном направлении). Максимальное пиковое значение виброускорения на частоте, соответствующей двойной частоте водомета составляет 271 м/с².

В четвертой главе (*Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования*) приводится оценка корректности имитационной математической модели ПВД, обосновывается необходимость совершенствования методики проектного расчета ПВД, учитывающая динамическую составляющую момента, нагружающего привод, излагаются технические решения, обеспечивающие снижение динамической нагруженности.

Статистическая обработка результатов имитационного моделирования динамики системы и экспериментальных данных о динамической нагруженности элементов конструкции ПВД при движении БГАМ на плаву свидетельствуют о достоверности разработанной имитационной модели. Результаты моделирования и экспериментальные данные (амплитуды колебаний динамического момента, частота процесса, параметры спектральной плотности процесса нагружения – рис. 8) отличаются не более чем 5...10 %. Это может быть вызвано нелинейностью рассматриваемой динамической системы.

Результаты выполненных расчетно-экспериментальных исследований позволяют утверждать, что основной причиной ограничения долговечности конструкции ПВД является несовершенство методики проектного расчета, в которой

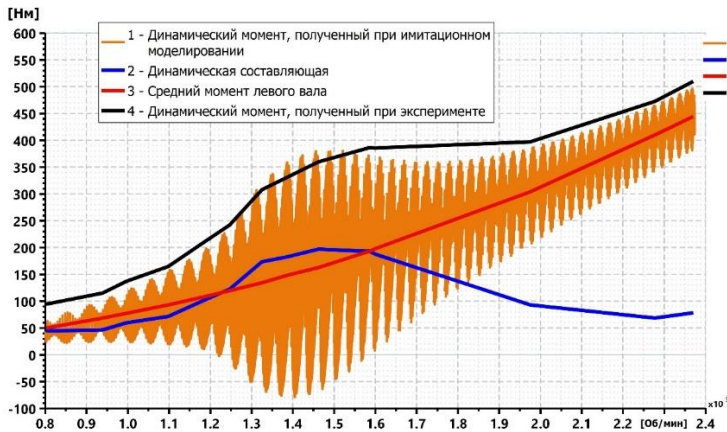


Рис. 8 - Сопоставление зависимости динамического момента в ПВД от частоты вращения вала двигателя. 1 – момент, полученный при имитационном моделировании; 2 – динамическая составляющая; 3 – средний момент левого вала; 4 – динамический момент, полученный при эксперименте.

не учитывается динамическая составляющая момента и колебательность процесса нагружения в форме биений, вынужденных и параметрических. За 50 часов работы ПВД на оборотах вала двигателя 1500 об/мин число дополнительных, не учитываемых при проектном расчете циклов нагружения при реальных значениях амплитуд и частот динамического момента составляет более одиннадцати миллионов.

В связи с этим обоснована необходимость и разработана усовершенствованная методика проектного расчета (рис. 9), **отличающаяся тем, что** ПВД рассматривается как система «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина», учитывающая кинематические и силовые, периодически изменяемые, свойства пространственно расположенных карданных передач, возбуждающих колебания, а также учитывающая нелинейные характеристики соединений опор углового редуктора ПВД с корпусом машины, приводящие к ослаблению болтовых соединений крепления опор, **кроме того**, дополнительно введены блоки расчета условий возбуждения резонансных режимов в ПВД и оценки их устойчивости, блоки условий оценки ослабления болтовых соединений картера редуктора с опорами крепления, а также блоки корректировки конструкции элементов ПВД.

В работе предложены технические решения, обеспечивающие снижение динамического момента, в частности введением в конструкцию гасителя колебаний, позволяющего отстроить резонансные режимы. Эффективным путем исключения **параметрических** колебаний является сокращение параметра глубины модуляции введением в конструкцию ШРУСов, у которых неравномерность вращения на порядок меньше, чем у асинхронных шарниров. Для предотвращения разрушения углового редуктора обоснована необходимость повышения жесткости опоры и разработка технологии фиксации болтовых соединений, предотвращающих самопроизвольное ослабление болтовых соединений в условиях вибронгруженности.

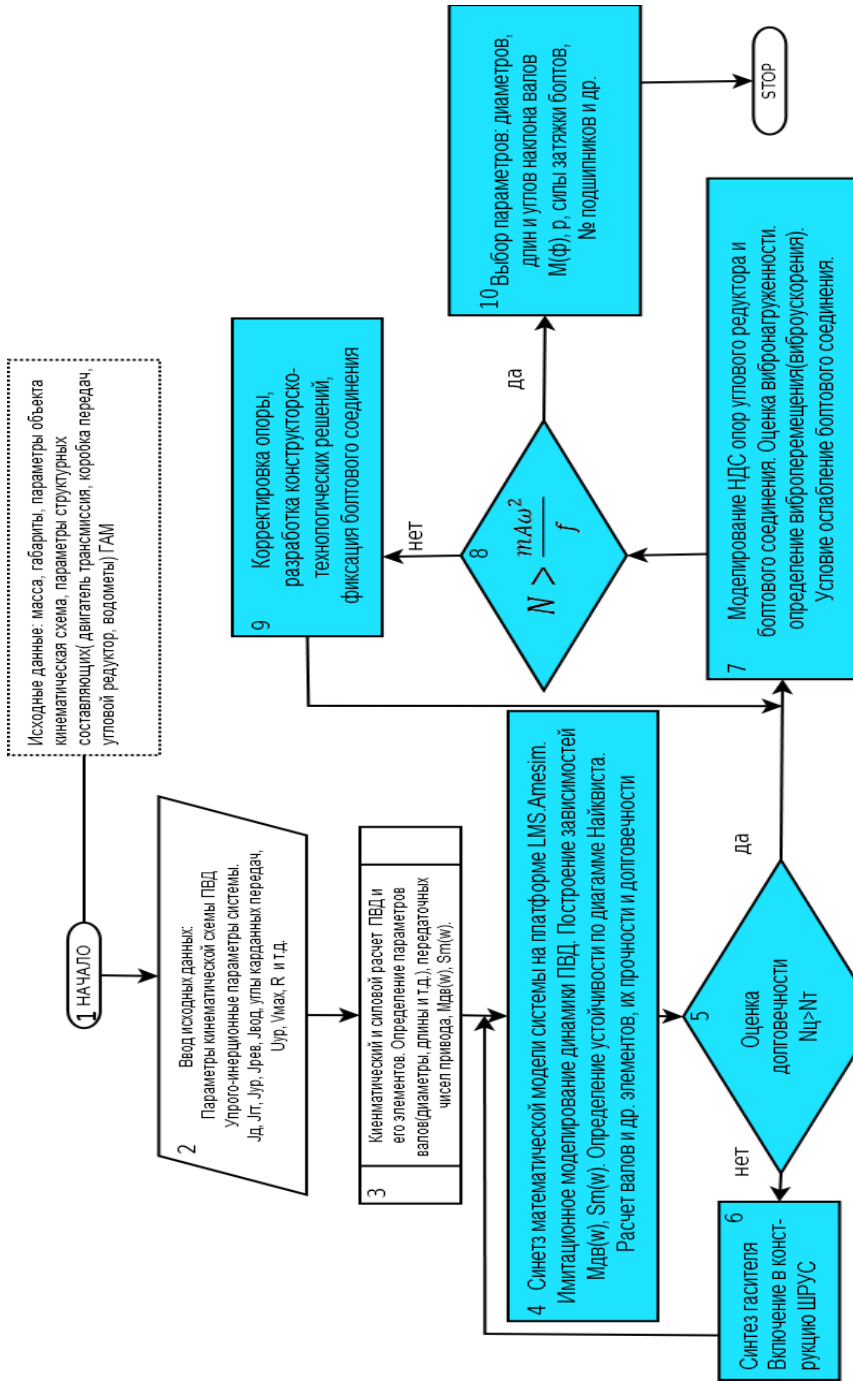


Рис. 9 - Блок-схема усовершенствованной методики проектного расчета привода водометного двигателя

Реализация результатов исследования позволила пройти государственные испытания изделиям БМД-4М и БТР-МДМ с положительным результатом, а также обеспечить требуемый ресурс привода водометных движителей, серийно выпускаемых амфибийных машин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. На основе разработанных расчетной схемы, математической и имитационной моделей выполнено теоретическое исследование динамической нагруженности системы «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина» на установившихся и переходных процессах. При этом установлено, что высокомоментные переменные динамические нагрузки имеют резонансный характер и формируются вследствие возбуждения в системе высокочастотных параметрических колебаний и низкочастотных «биений».

2. Выполненными экспериментальными исследованиями подтверждена адекватность математических и имитационных моделей, получены новые экспериментальные данные динамического нагружения привода водометных движителей, позволившие выявить ранее не исследованные эффекты возбуждения параметрических резонансов и режимов «биения» динамического момента при установившемся движении и при вынужденных колебаниях. При этом, не учитываемые динамические нагрузки имеют характер высокомоментных и высокочастотных колебаний, превышают расчетные значения в 2 ... 2,5 раза.

3. На основе обобщения результатов теоретического и экспериментального исследования научно обоснованы конструкторско-технологические решения, обеспечивающие требуемый ресурс привода водометных движителей. Установлено, что:

- наиболее эффективным способом исключения параметрических резонансов является снижение глубины модуляции путем уменьшения асинхронности вращения вилок карданных валов привода (разработано техническое решение по уменьшению угла γ карданной передачи с 19,41 до 12,84 градусов, а также вариант применения асинхронного шарнира). Данное техническое решение позволило снизить глубину модуляции в 3 раза, а переменную составляющую крутящего момента в 2 раза, ресурс привода водометного движителя увеличен в 3 раза, по сравнению с определенным в ТТХ на изделие и в 75 раз по сравнению с опытным образцом;

- эффективным способом исключения самопроизвольного ослабления болтовых соединений крепления опор углового редуктора является повышение приведенного коэффициента трения и увеличение жесткости опор углового редуктора ПВД (приведенный коэффициент трения в болтовом соединении увеличен в 2,5 раза - до $f=0,361$).

4. Научно обоснована и разработана усовершенствованная методика проектного расчета привода водометных движителей, **отличающаяся тем, что** ПВД рассматривается как система «двигатель - трансмиссия - водометный движитель - машина», учитывающая кинематические и силовые, периодически изменяемые, свойства пространственно расположенных карданных передач, возбуждающих колебания, а также учитывающая нелинейные характеристики соединений опор углового редуктора привода водометных движителей с корпусом машины,

приводящие к ослаблению болтовых соединений крепления опор, **кроме того**, дополнительно введены блоки расчета условий возбуждения резонансных режимов в ПВД и оценки их устойчивости, блоки оценки условий ослабления болтовых соединений картера редуктора с опорами крепления, а также блоки корректировки конструкции элементов привода.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Перечень публикаций в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Ненашев П.Н. Исследование динамической нагруженности привода водометных движителей амфибийных гусеничных машин. / П.Н. Ненашев, С.В. Абдулов, В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин, А.А. Волков. Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2020. Т. 20, № 4. С. 35–44. DOI: 10.14529/engin200404
2. Ненашев П.Н. Экспериментальное исследование динамической нагруженности привода водометных движителей амфибийной гусеничной машины. / П.Н. Ненашев, С.В. Абдулов, А.И. Тараторкин. Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева № 1 (132). С. 70–77. DOI: 10.46960/1810-210X_2021_1_70

Прочие публикации, в том числе в иностранных изданиях, индексируемых в SCOPUS и Web of Science

3. Nenashev P. Dynamic loading of a water jet propulsion drive of amphibious vehicles / Sergey Abdulov, Alexander Taratorkin and Pavel Nenashev. MATEC Web Conf., 224 (2018) 02042 DOI: 10.1051/mateconf/201822402042
4. Nenashev P. Increase of durability of an amphibious vehicle water jet propulsion drive / Pavel Nenashev, Sergey Abdulov, and Alexander Taratorkin. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 709, Issue 2, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033036>.
5. Nenashev P. Estimation of adequacy of the simulation model of a water-jet propulsion drive of high-speed tracked amphibious vehicles. / Pavel Nenashev, Sergey Abdulov, and Alexander Taratorkin. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971, Number 5, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052077>
6. Ненашев П.Н. Динамическая нагруженность привода водометного движителя амфибийных машин. сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов, обучающихся в магистратуре курганского государственного университета. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2016. Вып. XVIII. 70 с.

Научное издание

Ненашев Павел Николаевич

**СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДА
ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ АМФИБИЙНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ
ИСКЛЮЧЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В МЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.04.21 Формат 60×84 1/16 Заказ №55	Формат 60х84 1/16 Усл. печ. л. 1,2 Тираж 100 экз.	Бумага тип. № 1 Уч. – изд. л. 1,2 Бесплатно

РИЦ Курганского государственного университета,
640020 г. Курган, ул. Советская, 63 ст4.
Курганский государственный университет.