М296992

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РАЙСКИЙ Виталий Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТАРНОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕХАНИЗМА В СИЛОВОМ ИНЕРЦИОННОМ ПРИВОДЕ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

/ 05.05.03 - автомобили и тракторы /

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М о с к в а 1976

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана и Челябинском политехническом институте имени Ленинского Комсомола.

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент Красненьков В.И.

Официальные оппоненты –
доктор технических наук, профессор Фаробин Я.Е.
кандидат технических наук, доцент Шувалов С.А.

Ведущее предприятие – Челябинский ордена Кутузова Первой степени и ордена Красной Звезды тракторный завод.

Автореферат разослан "3" ноября 1976 г.

Защита диссертации состоится "20" декабря 1976 г. в ____ часов на заседании специализированного Ученого Совета по транс[illegible]а по адресу: 107005

С
МВТУ им

Пр[illegible]ересую-
щихся т[illegible] Ученого
Совета [illegible]енных
печатью

Се
по
к.

М-89011 [illegible]р.100.

М296992

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей проблемой современного транспортного машиностроения является создание совершенного энергетически экономичного силового привода, обеспечивающего выполнение рабочих процессов на оптимальных режимах и значительно упрощающих управление машинами.

Одним из путей совершенствования силового привода является введение в его состав автоматических бесступенчатых передач. В настоящее время одной из перспективных передач такого типа является инерционный трансформатор крутящего момента (ИТКМ), состоящий из импульсного механизма (ИМ) и устройства отбора мощности (УОМ) в виде механизмов свободного хода (МСХ) или силовых связей. Применение ИТКМ в составе силового привода обеспечивает автоматичность рабочего процесса в широком диапазоне изменения момента сопротивления.

Работы Артоболевского И.И., Айзермана М.А., Балжи М.Ф., Благонравова А.А., Бессонова А.П., Кожевникова С.Н., Куликова Н.К., Мальцева В.Ф., Рагульскиса К.М. и др. позволили правильно оценить значимость инерционной передачи в составе силового привода. Актуальность применения ИТКМ в приводах машин и механизмов была отмечена в решениях IУ Всесоюзной научно-технической конференции по вариаторам и передачам гибкой связью (Одесса,I972), I Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (Челябинск,I972) и проблемной записке по теории машин, составленной ведущими учеными под руководством академиков Артоболевского И.И. и Благонравова А.А. (АН СССР,М.,"Наука", I966).

В настоящее время известно значительное количество фундаментальных исследований, посвященных ИТКМ. Большинство из них выполнено в Челябинском политехническом институте, Одесском технологическом институте пищ.пром. Рижском институте инженеров гражданской авиации, Ижевском машиностроительном заводе. Эти работы привели к созданию ряда опытных образцов инерционных передач, дальнейшее распространение которых задерживается надежностью и долговечностью отдельных элементов конструкции.

№296992

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1296992
Райскин В.В.Исследование

Одним из путей дальнейшего совершенствования ИТКМ является разработка методов оценки и путей повышения долговечности и надежности важнейших узлов механизма. Для этого, в свою очередь, необходим анализ законов движения звеньев и нагруженности основных пар передачи. Однако, истинный характер усилий в элементах импульсного механизма до сих пор изучен слабо. В опубликованных работах не содержится и конкретных рекомендаций по оценке надежности и долговечности импульсных механизмов.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование планетарного ИМ, оценка нагруженности основных пар передачи и факторов на нее влияющих; разработка методов определения надежности и долговечности ИМ на основе модели долговечности "слабейшего звена"; разработка упрощенных методов расчета ИМ и основных его элементов.

Методы исследования. В работе использованы расчетно-аналитические и экспериментальные методы исследования. Основу аналитических исследований составляют методы теоретической механики, теории нелинейных дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической статистики. Для проведения расчетов использованы электронные цифровые вычислительные машина (ЭЦВМ). Экспериментальные исследования проводились на опытном образце планетарного импульсного механизма трансмиссии автомобиля М-21 "Волга" и стенде с замкнутым силовым контуром. По специально разработанной методике на этих стендах была оценена сравнительная надежность импульсного механизма.

Научная новизна. Уравнения движения планетарного ИМ впервые решены аналитически. Проведен, силовой анализ исследуемого механизма и выявлено влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на нагруженность основных его элементов. Разработаны методика сравнительного расчета надежности ИМ и метод ускоренного испытания зубчатой кинематической пары. Получены зависимости для упрощенного расчета основных параметров планетарного ИМ.

Практическая ценность. Проведенный комплекс исследований позволил оценить истинную нагруженность элементов ИМ и

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

пути ее снижения. Предложенная методика оценки сравнительной долговечности весьма проста и может быть применена для практических расчетов. Экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическими, что позволяет сделать вывод о возможности использования полученных аналитических зависимостей в расчетно-конструкторской практике.

Реализация работы. Результаты исследований использованы в процессе совместной работы кафедры "Гусеничные машины" Челябинского политехнического института имени Ленинского Комсомола и Волгоградского тракторного завода имени Ф.Э. Дзержинского по созданию инерционной импульсной трансмиссии и стенда для испытания агрегатов гусеничных машин. Ожидаемый от применения предложенной методики расчета параметров механизма и оценки долговечности годовой экономический эффект составит 15-20 тыс.руб. (акт внедрения от 1 апреля 1975 г).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр К-2 МВТУ им. Баумана и "Гусеничные машины" ЧПИ им.Ленинского Комсомола (1973-75 г.г.), на заседании Челябинского филиала семинара по ТММ АН СССР, на заседании секции НТО Машпрома Волгоградского тракторного завода им.Ф.Э.Дзержинского, на научно-технических конференциях ЧПИ им.Ленинского Комсомола и Ижевского механического института (1975г.).

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 5 научных работ, в том числе одно изобретение. Список приведен в конце автореферата.

Объем работы. Диссертация выполнена в объеме 131 страниц, содержит 105 страниц машинописного текста, 39 иллюстраций, 136 наименований библиографии, 3 страницы приложения и состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проводимых исследований, определена цель исследования, поставлены задачи, подлежащие рассмотрению и коротко изложено содержание всех глав диссертации.

В первой главе на основании анализа литературных источников показано, что в области исследования инерционных им-

пульсных передач в настоящее время ведутся обширные работы. И хотя сейчас уже существует достаточное число опытных образцов различных импульсных механических передач, до сих пор нет оценки их долговечности и надежности. Вопрос определения этих показателей тесным образом связан с всесторонним анализом нагруженности передачи, т.к. долговечность находится в прямой зависимости от нагрузов (точнее - удельного давления) в основных элементах конструкции.

В результате анализа различных схем ИМ установлено, что возможны два принципиально различных способа трансформации момента. В первом на движение реактора автологами МСХ накладываются две односторонние кинематические связи, во втором - эти связи силовые в виде моментов сопротивления.

ИМ, основанные на использовании второго способа трансформации момента имеют большую удельную мощность, увеличенный ресурс за счет снижения сил и моментов в узлах механизма и исключения из схемы МСХ. Однако, такого типа передачи могут быть применены лишь в приводах машин, для которых направление импульсов момента на выходном валу безразлично.

В планетарном ИМ, который считается сейчас одним из перспективных для применения в силовых приводах транспортных машин, имеются два основных узла, от надежной работы которых зависит нормальное функционирование механизма в целом. Это подшипник грузового звена (неуравновешенного сателлита) и зубчатое зацепление сателлит - солнечная шестерня (реактор). Если вопрос о надежной конструкции подшипника грузового звена исследован достаточно полно, то этого нельзя сказать о зубчатом зацеплении. До сих пор не определены его истинные нагрузочные параметры, не выяснен вопрос о влиянии ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность этой пары, нет экспериментальных данных о работе указанного зацепления. Поскольку зубчатое зацепление является "слабейшим" звеном планетарного ИМ, то по оценке его надежности и долговечности можно судить о надежности и долговечности механизма в целом.

Зубчатая пара ИМ работает в специфических условиях, вызванных особенностями протекания цикла трансформации момента.

В этой связи представляет интерес исследование зацепления грузовое звено – реактор планетарного ИМ.

Исследования зубчатых передач, выполненные А.А.Артоболевским, Е.Бакингемом, А.И.Беляниным, М.Д.Генкиным, В.К. Гринкевичем, М.А.Елизаветиным, Я.Г.Кистьяном, В.Н.Кудрявлевым, В.П.Остроумовым, З.П.Павловым, А.И.Петрусевичем, Д.Н.Решетовым, Э.А.Сателем, С.В.Серенсеном, Г.К.Трубиным, М.М.Хрущовым и др. позволили установить особенности их раб-ты, нагруженность, долговечность, разработать методы испытания. В большинстве случаев вопросы нагруженности и долговечности зубчатых передач решались для случая, когда нагрузка изменялась по знакопостоянному циклу. Испытания и анализ долговечности зубчатых передач, работающих при знакопеременных нагруз..ах, какие имеют место в ИМ, влияния на долговечность частоты нагружения зубьев и цикличности работы передачи в (специальной) литературе не приводятся.

В соответствии с выполненным анализом, в работе была поставлена задача исследования зубчатого зацепления планетарного ИМ и оценка на этой основе присущей механизму долговечности и надежности.

Во второй главе проведено теоретическое исследование планетарного импульсного механизма по скоростным и нагрузочным параметрам.

ИМ представляет собой систему с двумя степенями свободы. Приняв в качестве обобщенных координат угол поворота ведущего звена θ и относительный угол поворота грузового звена φ, движение рассматриваемого механизма можно описать системой дифференциальных уравнений, которая в форме Лагранжа имеет вид

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left\{\dot\theta(A+2a\cos\varphi)+\dot\varphi(B+a\cos\varphi)\right\} &= M_\theta - M_\varphi \\ C\ddot\varphi + (B+a\cos\varphi)\ddot\theta + a\dot\theta^2\sin\varphi &= -\frac{M_\theta}{\lambda} \end{aligned}\right\}, \qquad (I)$$

где A,B,C,a,λ – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров механизма, M_θ и M_φ – моменты сил действующих и сил сопротивления.

Для импульсной передачи наиболее тяжелым является режим остановленного реактора, когда наблюдаются максимальные нагрузки в элементах конструкции. Поэтому можно принять нагру-

зочные характеристики этого режима за расчетные. При этом закон движения звеньев механизма можно описать дифференциальным уравнением

$$\left(1+2\kappa\cos\varphi\right)\frac{dp_1}{d\varphi} - 2\kappa p_1 \sin\varphi = 2\ell, \qquad (2)$$

где $\kappa = \frac{d}{D}$; $p_1 = \left(\frac{d\varphi}{d\tau}\right)^2$; $\ell = \frac{M_\theta}{a\dot{\gamma}^2 D}$; $d = 1 - \frac{1}{\lambda}$;

$D = \frac{1}{a}\left(-\frac{A}{\lambda} + 2B - C\lambda\right)$; $\tau = \dot{\gamma}t$; $\dot{\gamma} = \dot{\theta}(1-\lambda)$.

На установившемся режиме работы, когда продолжительности i-го и $(i+1)$-го циклов трансформации момента равны между собой, можно принять $\ell = Const$. Это допущение подтверждено экспериментальными исследованиями и было использовано многими авторами. Анализ реальных конструкций ИМ позволяет сделать еще одно допущение $\kappa \ll 1$. Тогда решение уравнения (2) можно представить в виде

$$p_1 = \frac{2\ell\varphi}{1+2\kappa\cos\varphi} + \frac{C_1}{1+2\kappa\cos\varphi}. \qquad (3)$$

Постоянная интегрирования C_I определяется из начальных условий и если движение начинается из состояния покоя, $C_I = 0$. Перейдя от переменной τ к переменной t, получим зависимости

$$\varphi = \frac{M_\theta \cdot t^2}{2H}; \quad \dot{\varphi} = \frac{M_\theta \cdot t}{H}; \quad \ddot{\varphi} = \frac{M_\theta}{H}, \qquad (4)$$

где $H = \frac{A - 2\lambda B + C\lambda^2}{-\lambda} = \frac{\mathcal{J}_1 + \mathcal{J}_2'\cdot 2(1-\lambda) + m'(R+r)^2 + m''\left[\rho^2 + 2\rho^2(1-\lambda)\right]}{-\lambda}$,

$\mathcal{J}_1$ – приведенный момент инерции ведущего вала, $\mathcal{J}_2'$ – момент инерции уравновешенной части грузового звена, λ – внутренее передаточное число механизма, R и r – радиусы делительных окружностей солнечного колеса и сателлита, m' и m'' – массы уравновешенной и неуравновешенной частей грузового звена, ρ – смещение центра тяжести грузового звена.

Оценка корректности проведенного аналитического решения была сделана на ЭЦВМ М-222. Результаты машинного и аналитического решений отличаются друг от друга не более, чем на 7%, что говорит о правомерности принятых при аналитическом решении допущений.

Зависимости (4) позволяют определить закон движения звеньев механизма на режиме остановленного реактора и на этой основе перейти к силовому исследованию ИМ.

В результате силового исследования механизма в период разгона на режиме остановленного реактора получена зависимость, позволяющая определить усилие R_τ в зубчатом зацеплении сателлит – солнечная шестерня.

$$R_\tau = 2K_1 \cdot K_2 - \frac{4K_2^2 K_3}{\lambda} t^2 Sin(K_2 t^2), \qquad (5)$$

где $K_1 = \frac{J_2' + m'' \rho^2}{\tau}$; $K_2 = \frac{M_\theta}{2H}$; $K_3 = m'' \rho$.

Анализ зависимости (5) позволил получить приближенную формулу для определения усилия в зубчатом зацеплении

$$R_\tau = -4\lambda m'' \rho \omega_g^2 Sin\varphi = f(\varphi), \qquad (6)$$

где ω_g – угловая скорость ведущего вала передачи.

Было выявлено, что степень точности изготовления деталей ИМ оказывает существенное влияние на нагруженность зубчатой пары. При этом, действительная величина усилия в зацеплении определяется зависимостью

$$R_{\tau g} = R_\tau + \Delta R_\tau = -4\lambda \omega_g^2 Sin\varphi \cdot m'' \rho \left(1 + \frac{\Delta m'' \rho + m'' \Delta \rho}{m'' \rho}\right), \qquad (7)$$

где $\Delta R_\tau, \Delta m'', \Delta \rho$ – приращение усилия R_τ, массы дисбаланса и смещения центра тяжести грузового звена за счет неточностей изготовления деталей.

Численные расчеты показывают, что при изготовлении основных поверхностей деталей ИМ по 2 кл.точности (ОСТ 1012) за счет отклонений размеров деталей в пределах полей допусков возможно приращение усилия R_τ в интервале -8÷+4%.

Анализ крутильных колебаний системы импульсной передачи, проведенный на ЭЦВМ М-222 показал, что при передаточном числе, близком к 0,7 могут возникать резонансные явления. При этом возможно увеличение R_τ до 50%.

Третья глава посвящена описанию экспериментального исследования планетарного импульсного механизма и состоит из двух частей. В первой изложена методика экспериментов, во второй приведены их результаты.

Целью проведения эксперимента явилось опытное изучение процессов нагружения зубчатого зацепления сателлит - солнечная шестерня и определения особенностей износа этой пары для получения данных, позволяющих определить ее долговечность (надежность). Сложность и разнообразие явлений, сопровождающих упомянутые выше процессы, потребовали разработки специальной методики экспериментальных исследований и создания некоторых устройств, предусматривающих её осуществление.

При постановке эксперимента ставились задачи:

- исследование процесса нагружения зубчатой пары грузовое звено - реактор и факторов, влияющих на этот процесс;
- исследование динамики износа зубьев грузового звена;
- исследование особенностей износа зубьев грузового звена в планетарном импульсном механизме;
- определение абсолютной величины износа зубьев грузового звена.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце импульсной передачи для автомобиля М-21 "Волга" и лабораторном стенде с замкнутым силовым контуром. На первом стенде изучались вопросы, связанные с общими задачами эксперимента. Второй стенд обеспечивал получение данных об износе зубьев обычных прямозубых шестерен для сравнительного анализа.

В соответствии с целями и задачами эксперимента в процессе проведения опытов регистрировались частота вращения входного и выходного валов ИМ, момент на выходном валу передачи, момент закрутки торсиона стенда с замкнутым силовым контуром, время работы стендов, число пусков и остановок, характер и величина износа зубьев испытуемых шестерен.

Так как результаты испытания на износ зависят от свойств материала, геометрических характеристик сопрягаемых поверхностей, нагрузочного режима, свойств смазки, температурных условий и др., то в процессе подготовки и проведения эксперимента принимались возможные меры для обеспечения неизменности этих факторов.

Испытуемые шестерни в обоих стендах изготовлялись из стали 45 ГОСТ 1050-60 без последующей термообработки. Это позволило значительно сократить время проведения испытаний и в то же время получить необходимые данные для оценки сравнительного износа зубьев шестерен в первом и втором стендах.

Величина износа зубьев определялась методом искусственных баз по слепкам из пластмассы бутакрил. Измерение слепков проводилось на двойном микроскопе МИС-11. Погрешность этого метода не превышает 5%, слепки весьма точно воспроизводят поверхность зубьев и являются документальным свидетельством их рабочего состояния.

Угловые скорости замерялись тахогенераторами ТГП-1 и тахоскопом "Qagent - 25С", оценка нагруженности элементов передачи производилась тензозвеньями с применением усилителя 8АНЧ-7М и осциллографа К-115. Продолжительность времени работы стендов фиксировалась электронными часами.

Обработка осциллограмм, полученных в результате эксперимента, осуществлялась непосредственным измерением величин. Для каждого режима на осциллограмме расшифровывалось по нескольку десятков точек. При обработке данных были использованы элементы теории выборок. При оценке износа зубьев шестерен объем выборки был $n = 10$, что при принятой вероятности $\alpha = 0.9$ обеспечивало удовлетворительную величину максимального отклонения объекта регистрации от номинала.

Статистической обработке подвергались износ зубьев шестерен обоих стендов и усилие в зацеплении сателлит - солнце импульсного механизма.

При проведении измерений были приняты возможные меры, исключающие систематические погрешности и уменьшающие случайные. Погрешность измерений оценивалась известными методами и не превышала 5-7%.

В четвертой главе на основании материалов экспериментального определения износа зубьев шестерен была проведена сравнительная оценка долговечности и надежности планетарного ИМ и редуктора стенда с замкнутым силовым контуром.

Исследование поведения реализаций износа, проведенное методами корреляционного анализа, позволяет считать: процесс износа обладает свойством сильного перемешивания (переплетения) реализаций и достаточно полно отвечает предложенной модели

$$\delta(t) = a't + b',$$

где $\delta(t)$ – величина износа рабочей поверхности в момент времени t, a' и b' – независимые случайные величины; средняя скорость износа постоянна и подвержена случайным вариациям; начальное качество объектов однородно и мало влияет на характер износа.

Пусть в случайные моменты времени возникают равновеликие "единичные" износы поверхностей зубьев шестерен. Тогда при накоплении τ_u "единичных" износов произойдет отказ механизма. Если $\tau_u(T)$ число "единичных" износов, накопленных к моменту времени T, то величина износа в этот момент будет

$$\delta(T) = a' \tau_u(T)$$

и за время Δt может с вероятностью γ' получить приращение

$$\delta(T+\Delta t) - \delta(T) = a'[\tau_u(T+\Delta t) - \delta(T)],$$

либо с вероятностью $(1-\gamma')$ получить нулевое приращение. В такой модели математическое ожидание приращения износа будет

$$M\{\delta(T+\Delta t) - \delta(T)\} = M\{\delta(T+\Delta t)\} - M\{\delta(T)\} = \gamma' a' + (1-\gamma')0 = a'[\eta \Delta t + 0 \cdot \Delta t],$$

где η – постоянный коэффициент. Переходя к пределу при $\Delta t \to 0$, получим

$$d M\{\delta(T)\} = \eta a' dt.$$

Это равенство говорит о независимости средней скорости износа ($\eta a'$) от времени, о её постоянстве и также подтверждается анализом реализаций износа.

Такой схеме накапливающихся повреждений весьма полно отвечает гамма – распределение времени τ_p безотказной работы. При этом вероятность безотказной работы механизма определяют равенством

$$P\{\tau_p > T\} = 1 - F(T) = 1 - \frac{\eta^{\tau_u}}{\Gamma(\tau_u)} \int_0^T t^{\tau_u - 1} \exp(-\eta t) dt,$$

где $\Gamma(\tau_u)$ - гамма - функция, $F(T)$ - интегральная функция распределения времени безотказной работы, η и τ_u - параметры распределения.

По данным o к' реализациях износа на n' равных интервалах наблюдения Δt при заданном предельном уровне износа зуба шестерни Δ для каждой реализации были вычислены среднее приращение износа $d\delta_{cp}$, общее среднее приращение износа $d\delta_{cp}^{общ}$, дисперсия приращений износа σ^2 и средняя дисперсия σ_{cp}^2. Проверив известными критериями согласия состоятельность гипотезы об однородности начального качества объектов, можно вычислить параметры распределения

$$\eta = \frac{(d\delta_{cp}^{общ})^2}{\sigma_{cp}^2 \cdot \Delta t}; \quad \tau_u = \frac{\Delta}{a'}; \quad a' = \frac{\sigma_{cp}^2}{d\delta_{cp}^{общ}}.$$

При оценке параметров распределения оказалось, что τ_u достаточно велико и возможна замена гамма-распределения нормальным, что дает весьма ощутимые преимущества в вычислении, т.к. существуют подробные таблицы функции Лапласа.

Рассмотрена модель возникновения отказа вследствие износа одного из элементов ИМ - зубчатого зацепления грузовое звено - реактор. Но в исследуемом механизме есть еще один важный узел - подшипник грузового звена. Исследования показывают, что он является более стойким. Тогда модель отказов ИМ будет эквивалентна модели долговечности элемента, отказавшего первым, т.е. модели долговечности зубчатого зацепления.

Итак, вероятность безотказной работы ИМ (его надежность) можно определить зависимостью

$$R(T) = P\{\tau_p > T\} = 1 - F(T),$$

где $F(T) = \Phi\left(\frac{T-c}{\sigma}\right)$ - функция Лапласа с параметрами

$$c = M\{\tau_p\} = \frac{\tau_u}{\eta}; \quad \sigma^2 = D\{\tau_p\} = \frac{\tau_u}{\eta^2}.$$

Графики функций надежности $R(T)$, построенные по результатам эксперимента, позволяют заключить, что специфические условия нагружения элементов ИМ сравнительно мало влияют на его надежность. Поэтому, методы проектирования зубчатого

зацепления ИМ не должны отличаться от общепринятых для расчета обычных зубчатых передач. При этом необходимо учитывать лишь особенность нагружения пары, определяемого выражением (6). Если же расчет ИМ будет проведен правильно, его надежность и долговечность будет на уровне этих же показателей для известных механических коробок передач, например, планетарных.

В пятой главе приводятся упрощенные методы расчета некоторых параметров планетарного импульсного механизма.

Важнейшим параметром грузового звена является произведение массы дисбаланса на смещение центра тяжести ($m''\rho$), определяющее создание требуемого момента инерционных сил. С учетом проведенного силового анализа получено выражение

$$m''\rho = -\frac{M_д D_т}{2{,}56\, R\, n_{ст}\, \lambda\, \omega_д^2},$$

где $M_д$ – расчетный момент двигателя, $D_т$ – диапазон трансформации, $n_{ст}$ – число сателлитов.

Во второй главе была выведена зависимость (6) для определения нагрузки в зубчатом зацеплении. Вывести такие же простые зависимости для определения усилия в подшипнике грузового звена точными методами не удалось, но приближенно величина удельного давления ρ и удельной мощности трения ρV могут быть представлены в виде

$$\rho = U\left(\frac{\Lambda}{\Gamma^3} + M\Gamma^2\right) = f(\Gamma);\quad \rho V = U'\left(\frac{\Lambda}{\Gamma^2} + M\Gamma^3\right) = f(\Gamma),$$

где Г – радиальный габарит конструкции,

$$U = 0{,}293\, M_д D_т \frac{(1-\lambda)(2-\lambda)^3(1-a_2^2)}{n_{ст}\lambda^2 a_1 b_3 (1-a_2^3)};\quad U' = U\frac{a_1(1-\lambda)}{2-\lambda}\omega_д;\quad \Lambda = \frac{\beta_c}{\sin\beta_c} + \kappa_5;$$

$$M = 1{,}7\gamma_м \frac{n_{ст}\lambda^2}{(2-\lambda)^5}\kappa_6 \frac{\omega_д^2}{M_д D_т};\quad \kappa_5 = \frac{2}{3}(1-\lambda)\frac{1-a_2^3}{1-a_2^2};\quad \kappa_6 = \pi\frac{b_1(a_2^2-a_1^2)}{(1-a_2^2)(b_2-b_1)}\left(\frac{1-a_1^2}{a_2^2-a_1^2} + \frac{b_3}{b_1} - 1\right),$$

$\gamma_м$ – плотность материала шестерни, a_i, b_i – постоянные коэффициенты.

Исследованием функций $\rho = f(\Gamma)$ и $\rho V = f(\Gamma)$ на экстремуме установлено, что они имеют оптимальные значения при радиальном габарите конструкции $\Gamma^5 = \frac{\Lambda}{M}$ и угле β_c "развала"

грузовой части определяемом из уравнения

$$\frac{\beta_c}{\sin\beta_c} + K_s = \frac{K_6}{\sin\beta_c}.$$

Установлено также, что оптимальное число сателлитов в импульсном механизме должно быть 5-6.

ВЫВОДЫ

I. Для силового инерционного привода транспортных машин наиболее рациональным является планетарный импульсный механизм, обеспечивающий, по сравнению с другими конструкциями, меньшую нагруженность основных элементов и большую удельную мощность.

2. Работоспособность планетарного импульсного механизма определяется работоспособностью наиболее нагруженных элементов зубчатых зацеплений грузовых звеньев (неуравновешенных сателлитов) с реактором (солнечной шестерней) и подшипников грузовых звеньев.

3. В качестве расчетного рекомендуется режим остановленного реактора, когда звенья импульсного механизма испытывают наибольшие нагрузки.

4. Движение грузовых звеньев на расчетном режиме описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка, приближенное решение которого получено аналитически; правомерность принятых при этом допущений подтверждена численным решением на ЭЦВМ "М-222".

5. Использование аналитического решения уравнений движения позволило построить достаточно простую расчетную формулу, позволяющую определить усилие в зацеплении грузового звена с реактором при различных конструктивных и эксплуатационных параметрах и хорошо согласующуюся с результатами выполненных автором экспериментальных исследований опытного силового инерционного привода автомобиля М-21 "Волга".

6. Экспериментальными исследованиями, проведенными по методике ускоренной сравнительной оценки износа зубчатых пар, на режиме остановленного реактора выявлена значительная неравномерность распределения величин износов по зубьям гру-

вового звена, обусловленная особенностями нагружения; однако усредненная по зубьям интенсивность износа приблизительно совпадает с интенсивностью износа шестерни в обычном прямозубом цилиндрическом редукторе.

7. Для оценки долговечности и надежности планетарного импульсного механизма может быть применена методика, основанная на линейной модели возникновения отказов и анализе группы реализаций износа зубьев грузового звена; расчеты, выполненные по предложенной методике, выявили практически одинаковый уровень надежности импульсного механизма и планетарной зубчатой передачи.

8. Проведенный комплекс исследований позволил получить упрощенные расчетные формулы для определения рациональных размеров грузового звена и планетарного импульсного механизма, обеспечивающих наименьшую нагруженность элементов конструкции.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

I. Балжи М.Ф., Болдырев Р.Н., Крупицкий С.М., Райский В.В. Кулачковый импульсатор инерционного трансформатора крутящего момента. А.с № 297834, кл. F I6 h.

2. Красненьков В.И., Крупицкий С.М., Райский В.В. Нагруженность пары неуравновешенный сателлит - солнечная шестерня. "Известия ВУЗов, Машиностроение" № 5, I975.

3. Райский В.В. К вопросу исследования инерционной передачи, В сб.: "Автомобили, тракторы и двигатели". Вып.I6I, Челябинск, ЧПИ, I975.

4. Злотник М.И., Крупицкий С.М., Райский В.В. О влиянии отклонений размеров деталей от номинального значения на нагруженность планетарного импульсатора. В сб.: "Автомобили, тракторы и двигатели". Вып.I6I, Челябинск, ЧПИ, I975.

5. Болдырев Р.Н., Крупицкий С.М., Райский В.В. Методика экспериментального определения долговечности зубчатой пары планетарного импульсатора. В сб.: "Автомобили, тракторы и двигатели". Вып.I6I, Челябинск, I975.

6. Леванидов В.В., Райский В.В. Об одном способе интегрирования дифференциального уравнения движения планетарного импульсного механизма при разгоне. В сб.: "Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств". Вып.I78, Челябинск, ЧПИ, I976. В печати.