

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ЛЕОНОВ Анатолий Иванович

ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИИ ИНЕРЦИОННЫХ БЕССТУПЕНЧАТЫХ  
АВТОМАТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА  
С УПРУГИМИ МЕХАНИЗМАМИ СВОБОДНОГО ХОДА

01.02.06 - Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

Автореф.  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск  
1979

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук Вейц В.Л.,  
профессор, доктор технических наук Куликов Н.К.,  
профессор, доктор технических наук Завьялов Г.А.

Ведущая организация - Государственный научно-исследова-  
тельный институт машиноведения им.академика А.А.Благонраво-

Защита состоится "....".....1980 г.  
в .... часов, на заседании специализированного совета Д 053.  
Челябинского политехнического института им.Ленинского комсо-  
по адресу: 454044, г.Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябин-  
ского политехнического института.

Автореферат разослан "....".....1980 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Кошев А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В решениях XXV съезда КПСС подчеркивалась необходимость создания и широкого внедрения принципиально новой техники. Создаваемые машины, оборудование, приборы и технологические процессы по своим технико-экономическим показателям на единицу производительности и другого полезного эффекта должны превосходить лучшие отечественные и мировые достижения.

К новой перспективной технике относятся инерционные трансформаторы, являющиеся бесступенчатыми автоматическими по своей природе передачами механического типа, предназначенными для преобразования скорости и вращающего момента на рабочих органах машин. Обладая высоким к.п.д., близким к к.п.д. ступенчатых передач, они имеют в то же время компактные конструкции, позволяющие вписывать их в габариты ступенчатых приводов и в ряде случаев снижать существующие габариты, защищают двигатель от перегрузки и остановки в моменты затормаживания рабочих органов, допускают создание конструкций с коэффициентами трансформации момента большими, чем, например, у гидротрансформаторов. На режиме прямой передачи, характерном для автомобилей, инерционный трансформатор работает как упругая динамическая муфта, что определяет его более высокие защитные свойства по сравнению со ступенчатой передачей. При установке этого привода на горных, строительных и других машинах полезной оказывается вибрационная чистка момента на рабочий орган.

Актуальность создания и использования в машиностроении инерционных автоматических бесступенчатых приводов машин отмечена на Всесоюзных научно-технических конференциях по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам в 1969, 1972, 1977 годах (Челябинский политехнический институт) и на Всесоюзных научно-технических конференциях по вариаторам и передачам гибкой связи в 1968, 1972, 1976 годах (Одесский технологический институт).

Инерционная тематика, как одно из важнейших направлений создания новых машин, включена в координационный план АН СССР по теории машин и систем машин на X пятилетку.

Цель работы. Основная цель настоящей работы заключается в разработке на основе изобретений нового семейства механизмов — инерционных бесступенчатых автоматических трансформаторов вращающего момента с упругими механизмами свободного хода, создании теории инерционных трансформаторов с упругими механизмами свобод-

ногого хода, включающей необходимые обобщения, и внедрении разработанных конструкций в народном хозяйстве.

Научная новизна состоит в разработке новой теории инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода, создании нового семейства инерционных трансформаторов и микрохраповых механизмов свободного хода.

Основными новыми элементами теории являются

– введение обобщенной модели инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода и выделение предпочтительно-го семейства импульсных механизмов,

– нахождение аналитических решений систем нелинейных диффе-ренциальных уравнений инерционного трансформатора на всех участ-ках цикла режима трансформации момента, и подтверждение этих ре-шений расчетами на цифровых вычислительных машинах,

– построение периодических решений и изучение нелинейных колебаний инерционного трансформатора на режимах заторможенного ве-домого маховика и динамической муфты,

– выбор оптимальных областей параметров инерционного транс-форматора,

– обоснование ряда новых положений – значительного повышения вращающего момента на ведомом валу трансформатора с упругими ме-ханизмами свободного хода и снижения на этой основе масс грузовых звеньев, действия момента на заторможенный ведомый маховик в тек-чение всего цикла, существования класса импульсных механизмов, не обеспечивавших выход инерционного трансформатора на режим динами-ческой муфты, и других,

– методика расчета инерционного трансформатора, включающая алгоритм построения внешней характеристики трансформатора,

– подтверждение основных теоретических положений эксперимен-тальными исследованиями опытно-промышленных образцов.

Достоверность научных положений основывается на большом объеме экспериментальных исследований опытных и опытно-промышле-нных образцов, проводившихся на протяжении ряда лет в лаборатории инерционных приводов харфедры, на Колпском и Кусинском машино-строительных заводах, Уральском автозаводе. Как правило, испытывающиеся опытно-промышленные образцы предназначались для установ-ки на серийно выпускаемые машины (опытно-промышленные образцы инерционных трансформаторов погрузочной машины ПНБ2, скреперной подземной лебедки ЮЛС-2СМ, бурильной установки в погрузочной ма-шине ПНБ2Б, гайковертов, импульсный привод забрасывателей топли-ва ЗП-400, ЗП-600 и другие).

Внедрение результатов работы. Разработаны конструкции инерционных автоматических трансформаторов и упругих микрохраповых механизмов свободного хода для ряда машин и механизмов, в частности, бурового станка СВБ-2М, погрузочной машины ПНБ2, автомобиля ЗАЗ-968 "Запорожец", автомобиля УАЗ-469, стенда для ускоренных испытаний привода, инерционных гайковертов, буропогрузочной машины ПНБ2Б, скреперных лебедок, автомобилей "Урал", импульсных забрасывателей топлива ЗП-400, ЗП-600, стартеров и других машин.

Изготовлены в металле, прошли экспериментальную проверку, испытания и конструктивную отработку ряд конструкций для различных машин и механизмов. Каждая из этих передач в процессе отработки изготавливается в нескольких конструктивных вариантах.

На Кусинском машиностроительном заводе:

- а) внедрен в серийное производство упругий микрохраповой механизм свободного хода в импульсном приводе забрасывателей топлива ЗП-400, ЗП-600;
- б) внедряется в серийное производство импульсный бесступенчатый, автоматический привод толок.

На Копейском машиностроительном заводе:

- а) внедрен опытно-промышленный образец инерционного трансформатора погрузочной машины ПНБ2;
- б) внедрено два промышленных образца инерционного трансформатора буропогрузочной машины ПНБ2Б.

Предполагается переход к серийному производству инерционных трансформаторов для буропогрузочных машин.

На Уральском автозаводе внедрена партия промышленных образцов инерционных автоматических гайковертов, включающих импульсные механизмы Чалмерса и упругие микрохраповые МСХ. Намечено изготовление следующих партий промышленных образцов инерционных гайковертов.

На заводе АТЭ-1 (г. Москва) внедряется партия промышленных образцов упругих микрохраповых механизмов свободного хода в приводе стартера с целью дальнейшего перехода к серийному производству.

Имеется внедрение опытно-промышленных образцов инерционных трансформаторов на Кыштымском машиностроительном заводе и других организациях.

Все указанные конструкции внедрены впервые в мировой практике.

Ведутся дальнейшие работы по подготовке к внедрению разра-

ботаних, а также новых конструкций (инерционных трансформаторов с регулируемыми параметрами и др.).

Экономический эффект от внедренных разработок, подтвержденный двухсторонними актами, приложенными в диссертации, составил более 3 млн. рублей. Ожидаемый экономический эффект, который будет достигнут за счет внедрения конструкций в ближайшие годы, составляет несколько млн. рублей.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на:

1. У совещании по основным проблемам теории механизмов и машин (г.Сухуми, 1967г.).

2. Третьей, четвертой и пятой Всесоюзных научно-технических конференциях по вариаторам и передачам гибкой связи (г.Одесса, 1968, 1972, 1976 г.г.).

3. Первой Всесоюзной научно-технической конференции по инерционным преобразователям и механизмам передачи вращающего момента (г.Челябинск, 1969 г.).

4. Первой и второй Всесоюзных научно-технических конференциях по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (г.Челябинск, 1972, 1977 г.г.).

5. Киевском Всесоюзном семинаре по теории механизмов и машин (г.Киев, 1973 г.).

6. Харьковском семинаре "Научные основы прочности" (г.Харьков, 1973 г.).

7. Международном симпозиуме по теории вибрационных механизмов (г.Вильнюс, 1973 г.).

8. Первом Всесоюзном съезде по теории механизмов и машин (г.Алма-Ата, 1977 г.).

9. Пятом Всемирном конгрессе по теории машин и механизмов (г.Монреаль, Канада, 1979 г.).

Публикации. По результатам работы имеется 57 публикаций. Основные результаты диссертационной работы изложены в монографии автора "Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента". - М.: Машиностроение, 1978 г.

Структура работы. В соответствии с поставленной целью диссертация включает анализ существующих разработок по инерционным трансформаторам и обоснование решаемой в диссертации научной проблемы (глава I), теорию инерционных трансформаторов с упругими механизмами свободного хода (главы II-VIII), описание созданных конструкций и результаты экспериментального исследования опытно-промышленных

образцов (глава IX), раздел по внедрению результатов работы в народном хозяйстве, раздел по основным направлениям работ по инерционным трансформаторам с упругими механизмами свободного хода, заключение и литературу. Имеется приложение I (описание конструкций известных инерционных передач) и приложение 2 (акты внедрения разработанных конструкций в народном хозяйстве).

Основным методом, принятим в диссертации, является аналитический метод с широким применением вычислительной техники для обоснования найденных аналитических решений и проведения трудоемких расчетов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Обоснование решаемой в диссертации проблемы

Методы исследования, использованные в работе, базируются на трудах советских ученых И.И.Артоболевского, Н.Н.Красовского, А.П.Филиппова, С.Н.Кожевникова, В.В.Болотина, К.В.Фролова, К.С.Колесникова, Д.Л.Волкова, Д.Н.Решетова, А.П.Бессонова, И.И.Блехмана, В.Л.Вейца, Н.К.Куликова, К.М.Рагульского, В.П.Когаева, М.З.Коловского, А.Ф.Крайнева, В.А.Светлицкого, И.И.Бульфона и других.

Вопросам теории, расчета и экспериментальным исследованиям инерционных передач посвящены работы С.Н.Кожевникова, А.П.Бессонова, Н.К.Куликова, М.Ф.Балжи, Г.Г.Васина, В.Ф.Мальцева, А.А.Благонравова, Г.Д.Есина, Г.А.Завьялова, А.Т.Полецкого, С.П.Баженова, В.А.Умняшкина, Р.Н.Болдырева, Е.И.Кромского, В.И.Пожбелько, Г.В.Архангельского, А.А.Цымбалюка, И.Ф.Сорока, С.Ф.Левина, А.П.Полякова, Ю.А.Гончарова, С.М.Крупицкого, Б.Л.Диковского, С.Ф.Харина, Б.Н.Крылова, Б.Н.Дмитриева, В.Г.Белоглазова, А.В.Геренштейна, Ф.В.Костикевича, А.Ф.Машенко, Б.А.Ляпунова, А.С.Суетина, А.Ф.Дубровского, С.М.Пономарева и других авторов.

Общей чертой большинства проведенных теоретических и экспериментальных работ по инерционным передачам явилась разработка модели с жесткими механизмами свободного хода (МСХ). Обращение исследователей к этой модели следует признать естественным. Решение сложных проблем на первой стадии исследований, когда не найден путь, ведущий к цели, обычно начинается с реализации наиболее простых идей.

Однако, большие усилия, затраченные на создание трансформа-

тора на основе модели с жесткими МСХ (в дальнейшем будем называть ее просто жесткой моделью), не привели к долговечной конструкции и внедрению результатов в народном хозяйстве. Некоторые опытные образцы не удалось вывести на расчетный режим максимальных оборотов двигателя из-за их разрушения. Выкладки в диссертации показывают, что упругости позволяют значительно повысить врачающий момент трансформатора. Видимо, в ряде случаев конструкции оказывались упругими и повышение момента по сравнению с расчетом приводило к недопустимым перегрузкам.

По мере создания теории жесткой модели инерционного трансформатора накапливалось все более фактов, которые не могла объяснить эта теория. Не соответствовали действительности такие важные положения теории жесткой модели как неподвижность реактора на режиме заторможенного ведомого маховика и на участках выстоя реактора при трансформации момента, одинаковые законы движения реактора и ведомого маховика на участке их совместного движения, характер протекания врачающего момента на выходе трансформатора, утверждение о максимальных нагрузках в трансформаторе на режиме заторможенного ведомого маховика.

Таким образом, жесткая модель не могла объяснить важные свойства инерционного трансформатора и оказалась неэффективной на данном этапе создания инерционных передач.

С другой стороны, созданные образцы инерционных трансформаторов имели существенные конструктивные недостатки, затрудняющие создание долговечной конструкции.

Применяемые роликовые механизмы свободного хода, а также ряд других фрикционных механизмов свободного хода обладают недостатком принципиального характера – передают врачающий момент с помощью сил трения. Нормальные силы, определяющие контактные напряжения, согласно известной формуле механики оказываются, по крайней мере, на порядок выше. В микрохраповых механизмах свободного хода указанный недостаток отсутствует, так как момент передается с помощью нормальных сил и контакт между зубом храповика и рабочим телом осуществляется по площадке.

Используемые в конструкциях трансформаторов импульсные механизмы обладали существенными недостатками в силу отсутствия обобщенной теории, позволяющей выделить оптимальные схемы. Например, непараллелограммный импульсный механизм, использованный в передачах Балжи и Спонтан имеет свойство неравномерного вращения грузо-

вых звеньев при равномерном вращении ведущего маховика. Это приводит к значительному увеличению инерционных пиков нагрузок по сравнению со средними во всей силовой цепи передачи.

В известных конструкциях с упругими элементами последние вводились за пределами механизма свободного хода и только в качестве или корпусных или выходных упругих элементов (как правило, между корпусным МСХ и корпусом передачи).

Проведенный анализ показывает необходимость перехода к более эффективной модели инерционного трансформатора и создания более совершенных конструкций инерционных трансформаторов.

Поэтому в диссертации ставится и решается новая научная проблема - разработка обобщенной теории инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода, создание на основе теории и изобретений нового семейства механизмов и их внедрение в народном хозяйстве.

#### Обобщенная модель инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода

На рис. I дана обобщенная физическая модель трансформатора с упругими механизмами свободного хода, разработанная на основе анализа известных конструкций и являющаяся общей для ряда схем. При исключении одной из упругостей 6 или 9 МСХ имеем в зависимости от использованного импульсного механизма схемы Спонтан, Хоббса, Чалмерса и другие. Если исключаются обе упругости, получаем жесткую схему Балки и ее модификации при различных импульсных механизмах. Использование обеих упругостей и обобщенной схемы импульсного механизма, описываемой далее, дает

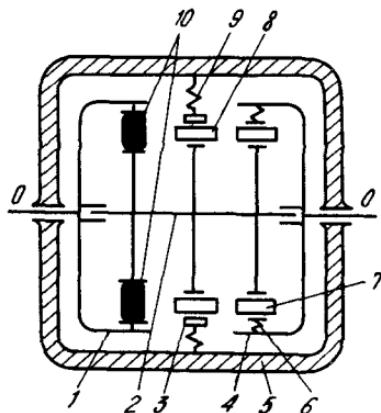


Рис. I. Обобщенная физическая модель трансформатора

исследуемую физическую модель с упругими механизмами свободного хода.

Ведущий маховик I приводит в движение грузовые звенья 10 импульсного механизма. В схеме может быть использован любой импульсный механизм, поэтому грузовые звенья показаны условно. При вращении ведущего маховика инерционные силы грузовых звеньев создают знакопеременный крутящий момент на промежуточном валу 2 (реакторе). Импульс момента, стремящийся повернуть реактор в направлении вращения вала двигателя (прямой или положительный импульс), передается через МСХ 7 и упругие элементы 6 на ведомый маховик 4. Импульс момента, стремящийся повернуть реактор в направлении, противоположном вращению вала двигателя (обратный или отрицательный импульс), передается через МСХ 8, обойму 3 и упругие элементы 9 на корпус 5 трансформатора. Упругие элементы 9 назовем корпусными упругими элементами, элементы 6 – упругими элементами ведомого маховика. Аналогично МСХ 8 назовем корпусным МСХ, МСХ 7 – выходным МСХ или МСХ ведомого маховика. Физическая модель отражает главные особенности инерционного трансформатора, присущие любой конструкции. Радиальные дополнительные устройства не показаны, чтобы просматривалась только основная функция трансформатора.

Для инерционного трансформатора характерны три режима работы: стоповый режим, режим трансформации момента и режим динамической муфты. Стоповый режим соответствует заторможенному ведомому маховику при работающем двигателе. Возможность осуществления такого режима является важным достоинством инерционных передач по сравнению со ступенчатыми, так как при резких остановках машины принудительная остановка двигателя не происходит. Режим трансформации момента характерен различными средними угловыми скоростями вращения ведущего и ведомого маховиков, соответствующими некоторому передаточному отношению. Режим трансформации момента имеет место, когда средний вращающий момент на входе в трансформатор меньше среднего момента сопротивления на выходе из трансформатора. На режиме динамической муфты преобразование среднего вращающего момента отсутствует, трансформатор передает момент двигателя. Средние угловые скорости ведущего и ведомого маховиков равны.

Режиму трансформации соответствует циклическая работа. В течение цикла работы можно выделить характерные участки, на которых дифференциальные уравнения движения системы не меняются. Полному циклу соответствуют участки: I) накопления корпусными упругими

элементами потенциальной энергии и отдачи ее при разгоне реактора; 2) разгона реактора под действием инерционных сил грузов до угловой скорости ведомого маховика; 3) совместного движения реактора и ведомого маховика; 4) торможения реактора до остановки. На малых передаточных отношениях совместное движение реактора и ведомого маховика происходит при действии корпусных упругих элементов.

На рис.2 показана обобщенная схема импульсных механизмов, описывающая на основе представленных ниже кинематических зависимостей большинство известных импульсных механизмов.

Схема получена на основе сопоставления различных свойств импульсных механизмов, отбора и описания общих свойств, необходимых для записи дифференциальных уравнений. Звено 1 обозначает ведущий маховик, 2 – реактор, 3 – грузовое звено. Центр тяжести грузового звена расположен в точке  $S$ , для упрощения показано одно грузовое звено. При вращении ведущего маховика 1 грузовые звенья 3 приводятся в движение и создают на реакторе 2 знакопеременный вращающий момент. Углы  $\alpha, \beta, \varphi$  обозначают углы поворота ведущего маховика, реактора и грузового звена.

Схема отражает общее свойство описываемых импульсных механизмов, обусловленное кинематическими связями и выражющееся в том, что механизмы имеют точку на грузовом звене, скорость которой является линейной формой обобщенных скоростей

$$V_B = \alpha \dot{\alpha} + \beta \dot{\beta}, \quad (I)$$

где  $\alpha, \beta$  – постоянные, определяемые конструкцией механизма.

Для планетарных импульсных механизмов точка  $B$  – центр сателлита, параллелограммного и непараллелограммного – точка крепления грузового звена на реакторе, кулачкового – точка крепления грузового звена на ведущем маховике и т.д.

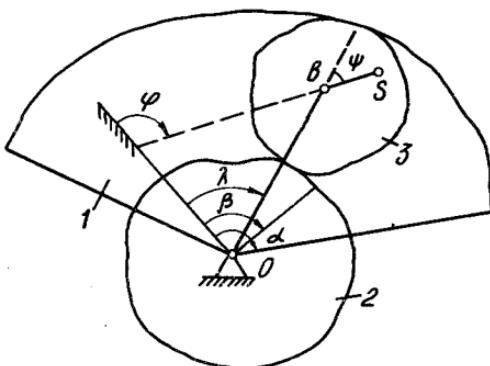


Рис.2. Обобщенная схема импульсного механизма

Угол  $\lambda$  в обобщенной схеме обозначает угол поворота радиуса  $OB$ ,  $\psi$  — угол поворота грузового звена относительно звена  $OB$ . Связь между углами  $\alpha, \beta, \lambda, \psi$  выражается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} e\lambda &= \alpha\lambda + \beta\psi, \\ \psi &= \psi(\alpha - \beta), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $e = OB$ ,  $\psi$  — функция разности  $\alpha - \beta$ .

Первое из уравнений (2) находится интегрированием равенства (1), в котором  $V_B = e\lambda$ . Справедливость второго уравнения очевидна, так как изменение угла  $\psi$  в рассматриваемых схемах возможно только за счет изменения разности  $\alpha - \beta$ . При  $\alpha = \beta$  импульсный механизм вращается как одно целое и угол  $\psi$  не изменяется.

Угол  $\psi$ , как видно из рис.2 равен

$$\psi = \lambda + \varphi \quad (3)$$

Уравнения (1-3) и схема на рис.2 описывают предлагаемый обобщенный импульсный механизм. Различные конструкции импульсных механизмов определяются в этой схеме только параметрами  $\alpha, \beta$  и видом функции  $\psi$ , что показано с помощью выражения для кинетической энергии произвольного импульсного механизма.

Все импульсные механизмы, которым свойственно уравнение (1),

в координатах  $\alpha, \beta$  располагаются на одной прямой (рис.3)

$$\beta = -\alpha + e.$$

Точки I соответствуют импульсным механизмам — непараллелограммный, параллелограммный, Чалмерса, кривошипно-кулисный с поступательной парой. Точка 5 — кулачковый, Хоббса, кривошипно-кулисный с ведущим кривошипом. Импульсному механизму Левина с ведущим эпицикликом могут соответствовать различные точки на прямой между серединой отрезка I-5 и точкой 5 в зависимости от соотношения между радиусами  $r_1$ , центральной шестерни и  $r_2$ , сателлита. Так, точке 2 соответствует механизм Левина, для кото-

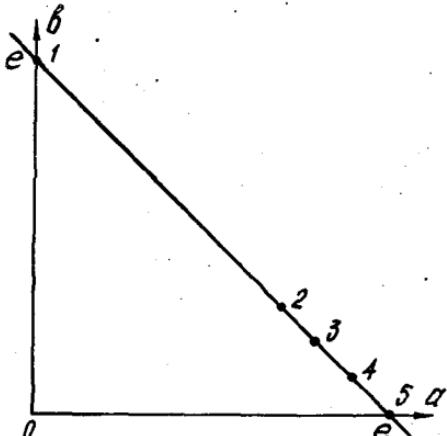


Рис.3. График расположения импульсных механизмов в координатах  $\alpha, \beta$

рого  $\varepsilon_1 = 2\varepsilon_2$ , точке 3 —  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , точке 4 —  $2\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . Выше середины отрезка механизмы с ведущим эпициклическим не располагаются, так как в этом случае  $\alpha > \delta$ . Для механизмов Левина с ведущим солнцем  $\delta > \alpha$ , и им соответствуют точки на прямой между серединой отрезка I-5 и точкой I. Обобщенные планетарные механизмы могут располагаться на всем отрезке между точками I и 5. За пределами отрезка I-5 (при отрицательном  $\alpha$  или  $\delta$ ) лежат обобщенные планетарные механизмы, имеющие комплановки с солнечными или эпициклическими шестернями ведущего маховика и реактора.

На основе описанной физической модели построена математическая модель, которая в нашем случае представляет системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающие движение инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода на различных участках цикла. Системы дифференциальных уравнений составлены для каждого режима движения трансформатора. Например, на участке накопления корпусными упругими элементами потенциальной энергии и отдачи ее при разгоне реактора, дифференциальные уравнения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A_1 \ddot{\alpha} + A_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2 &= M_g, \\ A_2 \ddot{\alpha} + (A_3 + J_3) \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2 &= M_2 - U\beta, \\ J_4 \ddot{\delta} &= -M_c - M_2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

$$A_1 = J_1 + nma^2 + \left(\frac{\alpha}{e} + \psi'\right)^2 nJ_B + 2nma h \left(\frac{\alpha}{e} + \psi'\right) \cos \psi,$$

$$A_2 = nma\beta + \left(\frac{\alpha}{e} + \psi'\right) \left(\frac{\beta}{e} - \psi'\right) nJ_B + nmh \left[\frac{2a\delta}{e} + (\delta - \alpha)\psi'\right] \cos \psi,$$

$$A_3 = J_2 + nm\beta^2 + \left(\frac{\beta}{e} - \psi'\right)^2 nJ_B + 2nm\beta h \left(\frac{\beta}{e} - \psi'\right) \cos \psi,$$

$$A_4 = \left(\frac{\alpha}{e} + \psi'\right) \psi'' nJ_B + nma h [\psi'' \cos \psi - \left(\frac{\alpha}{e} + \psi'\right) \psi' \sin \psi],$$

$$A_5 = \left(\frac{\beta}{e} - \psi'\right) \psi'' nJ_B + nm\beta h [\psi'' \cos \psi + \left(\frac{\beta}{e} - \psi'\right) \psi' \sin \psi],$$

$$A_6 = nmeh \psi' \sin \psi, \quad \psi' = \frac{d\psi(\alpha - \beta)}{d(\alpha - \beta)}, \quad \psi'' = \frac{d^2\psi(\alpha - \beta)}{d(\alpha - \beta)^2},$$

$J_1, J_2, J_3, J_4$  — моменты инерции ведущего маховика и приведенных к нему масс двигателя, реактора, наружной обоймы корпусного МСХ и приведенных к ней масс, ведомого маховика и приведенных к нему

масс ведомых элементов;  $I_B$  - момент инерции грузового звена относительно оси, проходящей через точку  $B$ ;  $m$  - масса грузового звена;  $n$  - число грузовых звеньев;  $h = 35$  - расстояние между точкой  $B$  и центром масс  $S$  грузового звена;  $\omega, \dot{\omega}, \delta$  - угловые скорости ведущего маховика, реактора и ведомого маховика;

$M_g$  - момент двигателя;  $M_c$  - момент сопротивления, приведенный к ведомому валу трансформатора;  $M_2$  - момент трения в механизме свободного хода ведомого маховика;  $U$  - жесткость корпусных упругих элементов.

При условии постоянства момента  $M_g$  двигателя и момента  $M_c$  сопротивления записаны первые интегралы дифференциальных уравнений на всех участках цикла. На участках разгона и торможения реактора найден еще один первый интеграл, соответствующий квазициклической обобщенной координате  $\lambda$ .

#### Предпочтительное семейство импульсных механизмов

Повышение долговечности инерционных трансформаторов помимо прочих факторов может быть достигнуто за счет выбора наилучших импульсных механизмов. Поэтому предпочтительное семейство импульсных механизмов выделяется, исходя из критерия минимальности нагрузок в силовой цепи трансформатора.

Принцип создания знакопеременного момента на реакторе одинаков для всех импульсных механизмов и обусловлен действием инерционных сил грузовых звеньев на некотором переменном плече. Однако, при одинаковых средних моментах, создаваемых различными импульсными механизмами на реакторе за положительную и отрицательную части цикла, динамическая напряженность трансформатора оказывается существенно различной.

Все импульсные механизмы, описываемые обобщенной схемой, подразделены на два семейства. Одни импульсные механизмы имеют постоянную функцию  $\psi'$

$$\psi' = \text{const} , \quad (5)$$

другие - переменную. К первым относятся параллелограммный импульсный механизм, планетарные Хоббса, Чалмерса, Левина, обобщенный планетарный механизм и предельный кривошипно-кулисный механизм с поступательной парой. Второе семейство составляют непараллелограммный механизм, кулачковые, кривошипно-кулисные механизмы и другие.

Показано, что семейство механизмов, подчиняющееся условию (5), имеет при заторможенном реакторе и  $\dot{\omega} = \text{const}$ . постоянную уг-

ловую скорость грузовых звеньев. В то же время механизмам, имеющим переменную функцию  $\Psi'$ , свойственны большие колебания угловой скорости грузовых звеньев, возрастающие с увеличением максимального плеча действия инерционных сил на реактор.

Таким образом, основное различие двух семейств импульсных механизмов с постоянной и переменной функциями  $\Psi'$  состоит в принципиально отличных законах изменения угловой скорости грузовых звеньев.

Колебания угловой скорости грузовых звеньев у механизмов с переменной функцией  $\Psi'$  определяют существенные изменения сил инерции. Последнее приводит к значительным колебаниям нагрузок в импульсном механизме, дополнительной неравномерности вращения двигателя, дополнительным нагрузкам на МСХ. Показано, что отрицательные следствия неравномерного вращения грузовых звеньев сохраняются и на режиме трансформации момента, причем устранить их в классе механизмов с переменной функцией  $\Psi'$  не представляется возможным.

С другой стороны, импульсные механизмы с постоянной функцией  $\Psi'$  обеспечивают протекание процессов в трансформаторе с меньшими нагрузками и неравномерностью двигателя. Следовательно, недостатки импульсных механизмов с переменной функцией  $\Psi'$  не связаны с природой инерционного трансформатора и обусловлены свойствами этого семейства механизмов. Наконец, импульсные механизмы с переменной функцией  $\Psi'$  не имеют каких-либо решающих преимуществ по сравнению с механизмами, имеющими постоянную функцию  $\Psi$ .

Поэтому признана неперспективность применения импульсных механизмов с переменной функцией  $\Psi$  в инерционных трансформаторах и выделены механизмы с постоянной функцией  $\Psi'$  как семейство предпочтительных.

Изучены свойства предпочтительного семейства импульсных механизмов. Закон протекания момента, действующего на МСХ при заторможенном реакторе, имеет гармонический характер и одинаков для всех импульсных механизмов предпочтительного семейства. Нагрузки на детали импульсного механизма и неравномерность вращения ведущего маховика зависят от положения механизма на отрезке I-5 (рис.3). При движении к точке I снижается уровень и колебания нагрузки на детали импульсного механизма. Чем дальше от точки I в ту или иную сторону расположен импульсный механизм, тем большую неравномерность ведущего маховика он создает.

Согласно полученным результатам обобщенную схему импульсного

механизма можно трактовать как аналитическую модель, которая дает непрерывное изменение свойств с изменением параметров. Конкретные конструктивные схемы импульсных механизмов занимают вполне определенные положения в этой непрерывной модели и имеют свойства, которые можно предсказать заранее на основе общего исследования.

Интегрирование дифференциальных уравнений  
обобщенной модели в случае переменности их  
структурны

Переменность структуры инерционного трансформатора на режиме трансформации обуславливает изменение дифференциальных уравнений движения от участка к участку. Законы движения звеньев обобщенной модели находятся на всех участках цикла и в последующих главах служат основой для выбора оптимальных параметров и исследования различных вопросов динамики. Основным методом при нахождении законов движения звеньев является метод малого параметра.

Построение решения с помощью метода малого параметра проводим на участке накопления потенциальной энергии и отдачи ее при разгоне реактора. Система дифференциальных уравнений (4) распадается на систему первых двух уравнений и независимое третье уравнение. Решение строим для предпочтительного семейства импульсных механизмов, у которых  $\psi' = g, \psi'' = 0$ . В коэффициентах  $A_1, A_2, A_3$  выделим переменные части

$$A_i = B_i + \beta_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (6)$$

где

$$\beta_1 = 2nmah\left(\frac{\alpha}{\epsilon} + g\right)\cos\psi,$$

$$\beta_2 = nmh\left[\frac{2\alpha\dot{\beta}}{\epsilon} + g(\beta - \alpha)\right]\cos\psi, \quad \beta_3 = 2nm\beta h\left(\frac{\beta}{\epsilon} - g\right)\cos\psi.$$

С учетом выражений (6) первые два уравнения системы (4) примут вид

$$\left. \begin{aligned} (B_1 + \beta_1)\ddot{\alpha} + (B_2 + \beta_2)\ddot{\beta} + A_4(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6\dot{\beta}^2 &= M_g, \\ (B_2 + \beta_2)\ddot{\alpha} + (B_3 + \gamma_3 + \beta_3)\ddot{\beta} + A_5(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6\dot{\alpha}^2 &= M_e - U\beta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Согласно структуре коэффициентов дифференциальных уравнений  $B_1, B_2, B_3, A_4, A_5, A_6$  меньше  $B_3$ , и малы по сравнению с  $B_1$ , так как последний кроме параметров грузовых звеньев включает  $\gamma_3$ . Мощ-

мент  $M_g$  мал, например, по сравнению со слагаемым  $A_6 \dot{\alpha}^2$ , имеющим порядок момента на заторможенном реакторе от действия инерционных сил грузовых звеньев. Тем более малым оказывается  $M_2$ .

В связи с высказанными соображениями представляется возможным ввести параметр  $\gamma^4$  следующим образом

$$\left. \begin{aligned} B_1 \ddot{\alpha} + B_2 \ddot{\beta} + \gamma^4 [B_1 \ddot{\alpha} + B_2 \ddot{\beta} + A_4 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6 \dot{\beta}^2] &= \gamma^4 M_g, \\ B_2 \ddot{\alpha} + (B_3 + J_3) \ddot{\beta} + \gamma^4 [B_2 \ddot{\alpha} + B_3 \ddot{\beta} + A_5 (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6 \dot{\alpha}^2] &= \gamma^4 M_2 - \mathcal{U} \beta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Уравнения (7) получаются из уравнений (8), если в последних положить  $\gamma^4 = 1$ .

Введение параметра является ответственным моментом исследования. Сказать заведомо, какой способ введения параметра дает наилучшие результаты (и дает ли вообще), невозможно. Целесообразность того или иного способа определяется оценкой полученного приближенного решения и возможностью использования его в дальнейших исследованиях.

Решение системы (8) ищем в виде рядов по параметру

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0(t) + \gamma \alpha_1(t) + \gamma^2 \alpha_2(t) + \dots, \\ \beta &= \beta_0(t) + \gamma \beta_1(t) + \gamma^2 \beta_2(t) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя ряды (9) в уравнения (8) и полагая  $\gamma^4 = 0$ , получим порождающую систему уравнений

$$\begin{aligned} B_1 \ddot{\alpha}_0 + B_2 \ddot{\beta}_0 &= 0, \\ B_2 \ddot{\alpha}_0 + (B_3 + J_3) \ddot{\beta}_0 &= -\mathcal{U} \beta_0. \end{aligned}$$

Решение последних уравнений при начальных условиях

$$t=0, \alpha=\alpha_{10}, \beta=0, \dot{\alpha}=\dot{\alpha}_{10}, \dot{\beta}=0$$

имеет вид

$$\dot{\alpha}_0 = \dot{\alpha}_{10}, \quad \alpha_0 = \alpha_{10} + \dot{\alpha}_{10} t, \quad \beta_0 = 0, \quad \dot{\beta}_0 = 0. \quad (10)$$

Порождающее решение (10) позволяет достаточно просто вычислить последующие приближения и в то же время оказывается близким к точному решению по обобщенной координате  $\alpha$ . Момент двигателя  $M_g$  представим разложением в ряд Фурье

$$M_g = M_0 + M = M_0 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i \sin\left(\frac{i\omega}{n_t} t + \alpha_i\right),$$

где  $n_t = 1$  для двухтактного двигателя;  $n_t = 2$  для четырехтактного двигателя.

Не останавливаясь на дальнейших выкладках, запишем приближенное решение с учетом двух членов рядов (9)

$$\dot{\beta} = \frac{D}{\kappa^2 - \varepsilon^2} [k \sin g, \sin kt - \varepsilon \cos g, \cos kt + \varepsilon \cos(\varepsilon t + g_1)],$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_{10} + \frac{B_3 + \gamma_3}{\Delta} M_0 t + \frac{D_1}{\varepsilon} [\cos g_1 - \cos(\varepsilon t + g_1)] - \frac{B_2 \mathcal{U} D}{\Delta K (\kappa^2 - \varepsilon^2)} [\sin g, \sin kt + \\ + 2 \frac{\varepsilon}{K} \cos g, \sin \frac{kt}{2}] + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{n_i M_i}{i \omega} [\cos \alpha_i - \cos(\frac{i \omega}{n_i} t + \alpha_i)],$$

где

$$D = \frac{n \pi e h g d_{10}^2}{\Delta} \left\{ B_1 \left[ 1 - \frac{\beta}{e} \left( \frac{\beta}{e} - g \right) \right] - B_2 \frac{\alpha}{e} \left( \frac{\alpha}{e} + g \right) \right\},$$

$$D_1 = \frac{n \pi e h g d_{10}^2}{\Delta} \left\{ \left[ 1 - \frac{\beta}{e} \left( \frac{\beta}{e} - g \right) \right] \frac{B_2}{\left( \frac{\kappa}{e} \right)^2 - 1} - \frac{\alpha}{e} \left( \frac{\alpha}{e} + g \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left[ \frac{B_2^2 \mathcal{U}}{\Delta (\kappa^2 - \varepsilon^2)} - B_3 - \gamma_3 \right] \right\}, \quad \Delta = B_1 (B_3 + \gamma_3) - B_2^2,$$

$$g_1 = g \alpha_{10}, \quad \varepsilon = g \dot{\alpha}_{10}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{B_1 \mathcal{U}}{\Delta}}$$

Сходимость построенных рядов и достаточность использования двух членов с хорошим приближением к точному решению можно было бы попытаться установить с помощью аналитических оценок. Однако последние дают как правило заниженные результаты. Поэтому в работе для оценки решений систематически используются цифровые вычислительные машины.

Найдены аналитические решения законов движения звеньев инерционного трансформатора на всех участках цикла режима трансформации момента. Сравнением машинных и приближенных аналитических решений показана достаточная инженерная точность последних.

Проведен анализ аналитических решений, который выявил важное свойство инерционных трансформаторов, заключающееся в малом влиянии колебаний моментов двигателя и сопротивления (случайного или неслучайного характера) при условии постоянства их средних значений на динамические процессы в трансформаторе.

На режиме трансформации момента подтверждено свойство предпочтительных импульсных механизмов, сформулированное в предыдущей

главе: чем дальше от полюса I (рис.3) расположен импульсный механизм, тем большую неравномерность вращения ведущего маховика он создает.

При интегрировании дифференциальных уравнений на всех участках цикла выявилась общая черта в законах движения звеньев инерционного трансформатора – малое влияние схемы импульсного механизма предпочтительного семейства на движение реактора и существенное влияние на неравномерность вращения ведущего маховика. Расчет проводился по двум вариантам параметров, представляющим параллелограммный импульсный механизм и механизм Хоббса. Однаковыми в обоих случаях были заданы моменты инерции ведущего и ведомого маховиков, средний момент на заторможенном реакторе от инерционных сил грузовых звеньев, параметр  $\vartheta$ , жесткости упругих элементов МСХ, моменты двигателя и сопротивления, начальные условия. Оба механизма удовлетворяли условию выхода на прямую передачу. Несмотря на то, что механизмы различно влияют на двигатель, кривые угловых скоростей и углов поворота реактора мало отличаются одна от другой (в пределах инженерной точности одна из кривых может быть заменена другой). Такой же результат получается по угловым скоростям и углам поворота реактора для обобщенного планетарного механизма и механизма Левина, занимающих промежуточные положения между планетарным Хоббса и параллелограммным.

Существенно отличались колебания угловой скорости ведущего маховика. У механизма Хоббса неравномерность вращения ведущего маховика в 2–3 раза превышает неравномерность вращения, свойственную параллелограммному импульсному механизму.

#### Нелинейные колебания обобщенной модели инерционного трансформатора на режимах заторможенного ведомого маховика и динамической муфты

На режимах заторможенного ведомого маховика и динамической муфты структура инерционного трансформатора не меняется. На режиме заторможенного ведомого маховика реактор, будучи подпружиненным с обеих сторон упругими МСХ, совершает нелинейные колебания под действием инерционных сил грузовых звеньев. Ведущий маховик при установившемся движении вращается с некоторой средней угловой скоростью, на которую накладываются колебания за счет действия двигателя и импульсного механизма. На режиме динамической муфты ведущий маховик, грузовые звенья, реактор и ведомый ма-

ховик вращаются как одно целое. Вследствие возмущений на устabilившееся движение звеньев накладываются колебания.

С помощью теории квазилинейных колебаний построены периодические решения, описывающие нелинейные колебания звеньев обобщенной модели на том и другом режимах. Проведен анализ периодических решений. Рассмотрена возможность возникновения резонансных колебаний.

На основе найденных аналитических решений дифференциальных уравнений на режимах трансформации момента и заторможенного ведомого маховика получены выражения для максимальных нагрузок на МСХ, соответствующих максимальным деформациям. Проведенные расчеты показывают, что режим заторможенного ведомого маховика не является наиболее нагруженным. Максимальные деформации упругих элементов на режиме трансформации момента примерно в 1,5 раза больше, чем на режиме заторможенного маховика.

Вывод о наибольших деформациях МСХ на режиме трансформации момента является важным. Ранее, согласно теории, описываемой жесткой моделью инерционного трансформатора, считалось, что наибольшие нагрузки имеют место на режиме заторможенного ведомого маховика. При расчете на максимальные напряжения рассматривался именно этот режим. Видимо допускаемые при подобном расчете ошибки являлись одной из причин выхода из строя опытных конструкций инерционных трансформаторов. Жесткости МСХ созданных ранее образцов соизмеримы с жесткостями, фигурирующими в наших расчетах.

Найдены условия выхода инерционного трансформатора на режим динамической муфты. По этим условиям выбираются параметры трансформатора с целью обеспечения выхода трансформатора на режим динамической муфты или ограничения угловой скорости ведомого маховика заданным передаточным отношением. Показано, что существует класс импульсных механизмов, которые не обеспечивают выход инерционного трансформатора на режим динамической муфты при любом выборе параметров. Указаны области параметров, которым соответствуют наибольшие возможности по выбору момента инерции реактора.

На основе анализа периодических решений на режиме динамической муфты установлено, что трансформатор на этом режиме является гасителем колебаний в трансмиссии. С физической стороны снижение колебаний объясняется тем, что трансформатор на режиме прямой передачи представляет упругую динамическую связь между ведущим и ведомым валами.

Исследована устойчивость равномерного вращения инерционного трансформатора на режиме динамической муфты при постоянно действующих возмущениях. Найдена область устойчивости. Теоретические результаты по устойчивости равномерного вращения трансформатора на режиме динамической муфты хорошо подтверждаются практикой испытаний опытно-промышленных образцов.

#### Оптимальная область параметров инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода

Выбор оптимальной области параметров инерционного трансформатора основывается на аналитических решениях, полученных при интегрировании дифференциальных уравнений. Рассматриваются различные передаточные отношения режима трансформации момента. В качестве основных критериев при выборе оптимальной области приняты минимальная цикличность нагрузений МСХ при передаче импульса момента, максимум потенциальной энергии упругих элементов МСХ, обеспечивающих снижение масс грузовых звеньев и нагрузок во всей цепи трансформатора, минимальные деформации упругих элементов МСХ.

Проведено исследование работы корпусных и выходных упругих элементов при использовании всего обратного и прямого импульсов, а также при частичном использовании импульсов, что характерно для различных передаточных отношений. Найдены области параметров, в которых исключаются и возможны размыкания МСХ во время передачи импульса момента. Выведены выражения для потенциальной энергии упругих элементов, по которым определены параметры, соответствующие максимуму потенциальной энергии. Оценены относительные углы поворота обойм МСХ для различных областей параметров.

На основе сопоставления результатов исследования оптимальной для корпусных упругих элементов оказывается область

$$1,5 < \frac{K}{\varepsilon} < 2 . \quad (II)$$

Выражения для  $K$  и  $\varepsilon$  приведены на стр. I6.

В случае выходных упругих элементов  $K/\varepsilon$  в этом выражении заменяется на  $K_1/\varepsilon_1$ , где  $K_1 = \sqrt{U_1(\beta_1 + \frac{B_1}{\Delta})}$ ;  $\varepsilon_1 = g(\dot{\alpha}_{30} - \dot{\beta}_{30})$ ;  $\Delta = B_1 B_3 - B_2^2$ ;  $U_1$  — жесткость выходных упругих элементов;  $\dot{\alpha}_{30}, \dot{\beta}_{30}$  — начальные скорости участка совместного движения реактора и ведомого маховика.

Во-первых, выбор параметров в указанной области по сравнению с областями  $K/\varepsilon > 2$  позволяет наиболее полно запастись потенциальную энергию и максимально снизить нагрузки в трансформаторе в

случае использования всего обратного импульса. С увеличением передаточного отношения использование обратного импульса снижается, и корпусной МСХ разгружается.

Во-вторых, обеспечивается минимальная цикличность нагружения корпусного МСХ на режиме трансформации момента.

В-третьих, в этой области исключаются возможные размыкания и удары во время действия обратного импульса на режиме трансформации момента. В других областях опасность размыкания сохраняется в определенной зоне передаточных отношений. Следует заметить, что даже если весь МСХ не размыкается в этих областях, но нагрузка на него колеблется во время передачи импульса момента, то возможны выключения и включения с ударом отдельных наименее нагруженных рабочих тел (например, некоторых пластин микрохрапового МСХ или роликов фрикционного МСХ). Всегда имеется часть рабочих тел МСХ, воспринимающих меньшую, по сравнению со средним уровнем, нагрузку.

В-четвертых, наиболее полное использование обратного импульса позволяет значительно снизить вес грузовых звеньев и трансформатора.

Наконец, область (II) оказывается конструктивно осуществимой.

Оптимальная область (II) получена в безразмерном виде безотносительно к какой-либо конструкции, что позволяет считать ее достаточно общей рекомендацией.

Подставляя значения  $K$  и  $\varepsilon$ , неравенство (II) представим в виде

$$1,5 < \sqrt{\frac{u[\gamma_1 + nma^2 + (\frac{a}{\varepsilon} + g)^2 n \gamma_B]}{\gamma_1 [\gamma_2 + \gamma_3 + nmb^2 + (\frac{b}{\varepsilon} - g)^2 n \gamma_B] + (\gamma_2 + \gamma_3)[nma^2 + (\frac{a}{\varepsilon} + g)^2 n \gamma_B] + nmeg^2 n \gamma_B}} < 2$$

$g \omega_{10}$

Из последнего выражения следует, что рекомендуемая область связывает геометрические параметры, массу грузовых звеньев, моменты инерции, жесткости и угловую скорость ведущего маховика, то есть практически все параметры инерционного трансформатора.

Проведенное при выборе оптимальной области исследование затрагивает общие вопросы, справедливые для всех конструкций МСХ. Для частных типов конструкций оптимальная область может быть уточнена, исходя из других критерии, например, минимальности напряжений в упругих элементах или элементах МСХ. Если какой-ли-

бо из дополнительных критериев будет решающим, то в этом случае оптимальными могут оказаться и последующие области:  $2 \leq \frac{K}{E} < 3$ ,  $3 \leq \frac{K}{E} < 4$ , ... . Однако, чем дальше используемая область отстоит от оптимальной  $1,5 < \frac{K}{E} < 2$ , тем более ухудшаются такие важные факторы, как нагрузки в импульсном механизме, контактные напряжения в МСХ, массовые параметры и др.

Наилучшим в любом случае окажется вариант, когда по всем критериям проходит рекомендуемая область (II).

### Расчет инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода. Методика выбора параметров

На основе аналитических решений дифференциальных уравнений и оптимизации параметров разработана методика расчета инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода.

Сформулированы и обоснованы преимущества модели с упругими МСХ по сравнению с моделью с жесткими МСХ. Главное преимущество заключается в снижении максимальных и средних нагрузок на МСХ. Согласно теории жесткой модели момент на заторможенный ведомый маховик действует только в течение половины цикла, в другой половине цикла момент воспринимается корпусным МСХ трансформатора. Как показали исследования, в упругой модели момент действует в течение всего цикла. Результаты интегрирования момента за весь цикл показали, что при одних и тех же средних моментах на заторможенном ведомом маховике в жесткой и упругой модели максимальный момент, действующий на МСХ в упругой модели, снижается в 1,57-2 раза.

Показано, что на режиме трансформации момента в упругой модели также имеет место снижение максимального момента, действующего на МСХ, по сравнению с жесткой моделью. Средний момент, действующий на корпусной МСХ на режиме трансформации, падает вследствие того, что время включения в обеих схемах отличается мало, а максимальный момент в упругой модели существенно ниже.

Второе важное достоинство трансформатора с упругими МСХ – снижение масс грузовых звеньев. Показано, что реальным является снижение масс грузовых звеньев в упругой модели по сравнению с жесткой в 2-3 раза.

Остановимся кратко на физическом обосновании снижения масс грузовых звеньев. Рассмотрим только случай корпусных упругих элементов, поскольку рассуждения по выходному МСХ оказываются аналогичными. Известно основное положение теории упругих систем: измен-

нение частоты воздействия при неизменной амплитуде возмущающей силы приводит к изменению амплитуды колебаний системы. Именно это положение применимо в нашем случае. Снижение масс грузовых звеньев получено вследствие оптимального выбора  $\kappa/\varepsilon$ . Но  $\varepsilon = \dot{\varphi}^2$  представляет относительную скорость  $\dot{\varphi}$  грузового звена при заторможенном реакторе. Если учесть, что воздействие в трансформаторе инерционное и определяется относительной скоростью вращения грузовых звеньев, то величина  $\varepsilon$ , по сути дела, определяет частоту действия возмущающей силы. В то же время величина  $\kappa$  определяется параметрами системы (массовыми, геометрическими и параметрами упругих элементов). Следовательно, выбор оптимального отношения  $\kappa/\varepsilon$  означает выбор оптимальной частоты возмущающей силы. Естественно, что таким путем может быть получено увеличение деформации упругих элементов и, как следствие, увеличение действующего момента или снижение масс грузовых звеньев при условии постоянства среднего момента на выходе.

Показано, что снижение масс грузовых звеньев в упругой модели трансформатора приводит к снижению массовых параметров основных деталей трансформатора.

Третье преимущество упругой модели – снижение нагрузок на импульсный механизм. Наибольшие нагрузки в импульсном механизме определяются нормальными составляющими сил инерции. Поскольку максимальные скорости звеньев жесткой и упругой моделей отличаются мало, а массы в упругой модели снижаются в 2–3 раза, то и нагрузки на импульсный механизм снижаются в 2–3 раза.

Можно назвать другие преимущества трансформатора с упругими МСХ – более плавный (с меньшей перегрузкой двигателя) процесс перехода с режима динамической муфты на режим трансформации момента, снижение неравномерности вращения ведомого и ведущего маховиков и т.д.

Как видно, совокупность преимуществ трансформатора с упругими МСХ по сравнению с трансформатором с жесткими МСХ оказывается значительной.

Расчет инерционного трансформатора при разработке конструкции – достаточно трудоемкая задача, осуществляемая методом последовательных приближений. На этапе проработки эскизного проекта конструктор должен иметь простую методику, требующую минимальных затрат при выборе параметров. На этом этапе выбирается схема трансформатора, проводится элементарный прочностной расчет, осуществляется первая прикидка габаритов и массовых параметров транс-

Форматора, оценка его конкурентоспособности. Стадию детальной разработки конструкции сопровождает точный расчет, проводимый, как правило, на цифровых вычислительных машинах. На этой стадии рассчитывается внешняя характеристика во всем диапазоне передаточных отношений, проводится детальный прочностный расчет, учитываются специфические требования, накладываемые разными условиями работы машин и т.д.

Таким образом, рекомендуется проведение расчета инерционного трансформатора в два этапа: приближенный аналитический расчет параметров трансформатора и уточненный расчет параметров на цифровых вычислительных машинах.

Приведена методика приближенного аналитического расчета параметров трансформатора, основанная на теоретических исследованиях всех режимов трансформатора и использующая рекомендации по выбору оптимальных параметров трансформатора и оптимальных схем импульсных механизмов. Рекомендуется алгоритм расчета внешней характеристики трансформатора, используемый на этапе уточненного расчета параметров.

Показаны различные характеристики, рассчитанные с помощью рекомендуемого алгоритма. Характеристики подтверждают, что в широкой зоне передаточных отношений трансформатор с упругими элементами при одних и тех же массах грузовых звеньев может обеспечивать врачающий момент, в 2-3 раза превышающий момент трансформатора без упругих элементов.

Обосновывается возможность пренебрежения колебаниями моментов двигателя и сопротивления (случайного и неслучайного характера) при расчете основных характеристик инерционного трансформатора с упругими МСХ.

#### Конструкции и экспериментальное исследование опытно-промышленных и промышленных образцов инерционных трансформаторов с упругими МСХ

Описан ряд конструкций инерционных трансформаторов, созданных коллективом научных сотрудников под руководством автора. В разработке и изготовлении образцов большое участие принимали сотрудники конструкторских бюро Ульяновского и Уральского автомобилестроительных заводов, Копейского, Кыштымского, Каршинского и Кусинского машиностроительных заводов. В частности, отражены конструкции инерционных приводов бурового станка СВБ-2М, погрузочной машины

ПНБ2, стенда для ускоренных испытаний привода, автомобиля УАЗ-469, буропогрузочной машины ПНБ2Б. Сформулированы свойства инерционного трансформатора как бесступенчатой передачи (автоматичность, прозрачность, к.п.д., защитные свойства и т.д.). Проведено сравнение инерционных передач с передачами других типов, которое подтверждает высокую конкурентоспособность инерционных трансформаторов.

Приведены результаты экспериментальных исследований опытно-промышленных образцов инерционных трансформаторов, проведенных в лаборатории Челябинского политехнического института.

Экспериментальные исследования проведены с целью проверки главных теоретических положений созданной теории. Основное положение теории – значительное повышение врашающего момента на выходе трансформатора за счет применения упругих элементов, снижение на этой основе масс грузовых звеньев и нагрузок во всей силовой цепи трансформатора. Поэтому первой и главной задачей экспериментального исследования явилось построение внешней характеристики опытно-промышленного образца трансформатора с упругими элементами и сравнительный анализ характеристик упругой и жесткой моделей.

Второе важное положение – утверждение о протекании момента на заторможенном ведомом маховике выше оси абсцисс. Этот момент, передаваемый выходным МСХ, находится по результатам исследования нелинейных колебаний реактора. В случае закона изменения момента, протекающего выше оси абсцисс, максимальное значение момента в упругой модели значительно меньше максимального значения момента в жесткой модели (при условии равенства средних моментов на выходном МСХ за цикл). Соответственно вторая задача экспериментального исследования сводилась к определению момента, передаваемого выходным МСХ на режиме заторможенного ведомого маховика.

Третьей задачей являлось определение одной из основных характеристик – к.п.д. инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода.

Четвертая задача исследования – определение максимальной угловой скорости ведомого маховика при отсутствии момента сопротивления. В ряде машин выход инерционного трансформатора на режим прямой передачи не должен осуществляться по условиям технологического процесса. Максимальная скорость ведомого маховика в этом случае ограничивается. Ограничение достигается выбором определенного момента инерции реактора. Важной представлялась проверка возможности подобного ограничения скорости.

Выполнение намеченного объема экспериментальных работ по сути дела представляет экспериментальную проверку приближенных аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов позволяет проверить, насколько точно решение нелинейных дифференциальных уравнений отражает действительные законы движения звеньев трансформатора.

Экспериментальный стенд включает асинхронный электродвигатель марки КОФ-214 мощностью 15 квт, 1470 об/мин, инерционный трансформатор вращающего момента, редуктор с передаточным отношением 4,72, корпус стендса и тормозное устройство.

Анализ результатов экспериментальных исследований привел к следующим важным выводам.

1. Достигнута хорошая сходимость теоретических и экспериментальных результатов. Внешняя характеристика является обобщающим показателем, расчет которой основывается на результатах интегрирования дифференциальных уравнений движения трансформатора и исследования корпусных и выходных упругих элементов. Поэтому хорошая сходимость результатов теории и эксперимента по внешней характеристике указывает на правильность основных теоретических положений и хорошее соответствие принятой физической модели исходному объекту – инерционному трансформатору с упругими МСХ.

2. Подтвержден основной теоретический вывод о возможности значительного увеличения вращающего момента за счет применения упругих элементов и снижения на этой основе масс грузовых звеньев. Сравнение кривых показывает, что вращающий момент трансформатора с упругими МСХ по экспериментальной характеристике практически во всем диапазоне передаточных отношений превышает вращающий момент жесткой модели в 2-3 раза.

3. Подтвержден теоретический вывод о снижении момента на выходе трансформатора с увеличением жесткости упругих элементов механизмов свободного хода.

4. Подтверждены теоретические результаты исследования нелинейных колебаний реактора на режиме заторможенного ведомого маховика. На всех осциллограммах вращающий момент на заторможенном ведомом маховике проходит выше оси абсцисс и прикладывается к ведому маховику в течение всего цикла. Экспериментальная частота колебаний момента точно совпадает с теоретической частотой. Хорошее совпадение имеет место и по амплитудам момента.

5. Подтвержден высокий к.п.д. инерционных трансформаторов с упругими механизмами свободного хода.

6. Подтвержден вывод о возможности ограничения скорости ведомого маховика трансформатора за счет выбора соответствующего момента инерции реактора.

Таким образом, экспериментальное исследование подтвердило основные теоретические положения диссертации.

По одной из разработанных конструкций проведена оценка долговечности трансформатора, которая показала, что могут быть созданы механизмы, удовлетворяющие запросам народного хозяйства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Основным теоретическим итогом работы явилось создание теории инерционного автоматического трансформатора вращающего момента с упругими механизмами свободного хода. Теория построена для обобщенной модели трансформатора, основана на интегрировании дифференциальных уравнений движения на всех участках цикла режима трансформации, рассмотрении нелинейных колебаний на режимах заторможенного ведомого маховика и динамической муфты, оптимизации параметров, завершается методикой расчета инерционных трансформаторов с упругими МСХ и характеризуется рядом новых положений, в том числе,

– введение упругих элементов как в корпусном, так и в выходном механизмах свободного хода позволяет существенно повысить вращающий момент на выходе трансформатора и снизить на этой основе массы грузовых звеньев, вес трансформатора и нагрузки (как максимальные, так и средние) на механизмы свободного хода и импульсный механизм,

– вращающий момент на заторможенном ведомом маховике даже для достаточно жестких механизмов свободного хода протекает выше оси абсцисс и действует на ведомый маховик в течение всего цикла, что указывает на существенную неточность в расчетах по прежней жесткой модели, согласно которой момент на ведомый маховик действует только на протяжении половины цикла,

– максимальные нагрузки на механизмы свободного хода имеют место в области малых передаточных отношений и даже могут сдвигаться в область средних передаточных отношений. Это также указывает на существенный недостаток прежней модели, согласно которой максимальные нагрузки имели место на режиме заторможенного ведомого маховика,

- наименьшую динамическую напряженность трансформатора обеспечивает семейство импульсных механизмов с постоянной функцией  $\psi'$ ,
- семейство импульсных механизмов с переменной функцией  $\psi'$  имеет существенные недостатки - значительное увеличение неравномерности вращения двигателя, большие пиковые нагрузки на импульсный механизм и механизмы свободного хода,
- на режиме динамической муфты инерционный трансформатор является гасителем колебаний в трансмиссии,
- существует семейство импульсных механизмов, которое по своим свойствам не обеспечивает выход трансформатора на режим динамической муфты.

П. Конструкции для ряда машин, разработанные под руководством автора в содружестве с конструкторскими бюро заводов, позволили доказать конкурентоспособность инерционных трансформаторов с упругими МСХ по сравнению с применяемыми ступенчатыми и бесступенчатыми передачами.

Ш. Экспериментальные исследования опытно-промышленных образцов показали обоснованность принятой физической модели инерционного трансформатора. Подтверждены главные теоретические положения, в частности

- достаточная точность найденных приближенных аналитических выражений,
- значительное увеличение вращающего момента на выходе трансформатора за счет введения упругих элементов в корпусном и выходном механизмах свободного хода,
- снижение вращающего момента на выходе трансформатора с увеличением жесткостей корпусного и выходного механизмов свободного хода,
- протекание вращающего момента на заторможенном ведомом маховике выше оси абсцисс,
- высокий к.п.д. инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода.

ИУ. Главным конечным итогом всей проделанной работы явилось создание на основе разработанной теории и изобретений нового семейства механизмов - инерционных автоматических трансформаторов вращающего момента с упругими механизмами свободного хода и внедрение разработанных конструкций в народном хозяйстве, осуществленное впервые в мировой практике.

Основные публикации по теме диссертации

Монография

1. ЛЕОНОВ А.И. Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента. - М.: Машиностроение, 1978.

Работы

2. ЛЕОНОВ А.И. Исследование импульсного механизма параллелограммного типа в инерционном трансформаторе момента. - В кн.: Теория машин и механизмов, вып. I05-I06, М., Наука, 1965.

3. А.С.174044 (СССР) Импульсный механизм инерционного трансформатора крутящего момента. Авт.изобрет.А.И.Леонов. Опубл. в Б.И.1965, №16.

4. ЛЕОНОВ А.И. Устойчивость и колебания параллелограммного импульсного механизма инерционного трансформатора крутящего момента. - Машиноведение, 1965, № 6.

5. ЛЕОНОВ А.И. Исследование двух схем импульсного механизма инерционного трансформатора крутящего момента. - Известия вузов. Сер.Машиностроение, 1965, № 10.

6. ЛЕОНОВ А.И. К выбору оптимальных параметров непараллелограммного импульсного механизма. - Науч.тр./ЧИ, 1966, вып.36. Конструирование и расчет гусеничных машин.

7. ЛЕОНОВ А.И. Выбор оптимальных параметров параллелограммного импульсного механизма инерционного трансформатора момента. - Науч.тр./ЧИ, 1966, вып.36. Конструирование и расчет гусеничных машин.

8. ЛЕОНОВ А.И., КОРНЕЕВ Н.В., ОГОРОДНИКОВ И.Н., МУШКАТИНА Б.Б. Исследование динамики инерционного трансформатора крутящего момента на электронной моделирующей установке ЭМУ-10. - В кн.: Механика машин, вып.5-6, М., Наука, 1967.

9. ЛЕОНОВ А.И. Использование обратного импульса в инерционных преобразователях крутящего момента. - Известия вузов. Сер. Машиностроение, 1969, № 5.

10. ЛЕОНОВ А.И., НОЗДРИН П.Ф. Характеристики инерционного трансформатора без использования обратного импульса. - Науч. тр./ЧПИ, 1969, № 77. Вопросы улучшения динамических характеристик машин.

11. А.С.283758 (СССР) Автоматический инерционный трансформатор крутящего момента. Авт.изобрет.Леонов А.И., Суетин А.С. Опубл. в Б.И. 1969, № II.

12. ЛЕОНОВ А.И. Некоторые особенности применения метода малого параметра при решении задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. - Науч.тр./ЧПИ, 1971, № 99. Машиноведение и прикладная математика.

13. ЛЕОНОВ А.И. К теории инерционных трансформаторов. - Известия вузов. Сер.Машиностроение, 1972, № II.

14. ЛЕОНОВ А.И. К теории инерционных преобразователей крутящего момента, использующих обратный импульс. - Машиноведение, 1972, № 4.

15. ЛЕОНОВ А.И. Выделение предпочтительного семейства на основе анализа импульсных механизмов. - В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по вариаторам и передачам гибкой связью. Одесса, ОТИШ им.М.В.Ломоносова, 1972.

16. ЛЕОНОВ А.И. Основы теории инерционных трансформаторов с упругими элементами. - В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по вариаторам и передачам гибкой связью. Одесса, ОТИШ им.М.В.Ломоносова, 1972.

17. ЛЕОНОВ А.И. Упругие элементы в инерционном трансформаторе как источник снижения динамической напряженности схемы. - В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, ЧПИ, 1972.

18. ЛЕОНОВ А.И., ТИМОНИН Л.В., НОЗДРИН П.Ф., КУЗНЕЦОВ В.И., ЛАПШИН С.М. Экспериментальное исследование инерционного привода погружочной машины ИПНБ2. - В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, ЧПИ, 1972.

19. ЛЕОНОВ А.И. Нелинейные колебания инерционного трансформатора крутящего момента. - В кн.: Механика машин, вып.41, М., Наука, 1973.

20. ЛЕОНОВ А.И. Анализ импульсных механизмов. - Науч. тр./ЧПИ, 1973, № 123. Проблемы машиностроения.
21. ЛЕОНОВ А.И. Обобщенный планетарный импульсный механизм. - Науч.тр./ЧПИ, 1973, № 125. Машиноведение.
22. ЛЕОНОВ А.И. Предпочтительное семейство импульсных механизмов.-Науч.тр./ЧПИ, 1973, № 125. Машиноведение.
23. Леонов А.И. К выбору оптимальных параметров корпусных упругих элементов.-Науч.тр./ЧПИ, 1973, № 129. Динамика машин и рабочих процессов.
24. ЛЕОНОВ А.И. Исследование выходных упругих элементов инерционного трансформатора.-Науч.тр./ЧПИ, 1973, № 129. Динамика машин и рабочих процессов.
25. ЛЕОНОВ А.И. Проблема инерционного бесступенчатого трансформатора – прогрессивного привода вибрационных машин и пути ее решения. - В кн.: Теория вибрационных механизмов (материалы Международного симпозиума, Бильнюс, 1973) Каунас, 1973.
26. ЛЕОНОВ А.И. Построение характеристики инерционного трансформатора с упругими элементами.-Науч.тр./ЧПИ, 1974, № 142. Машиноведение.
27. ЛЕОНОВ А.И. Условие выхода инерционного трансформатора с упругими элементами на режим динамической муфты.-Науч. тр./ЧПИ, 1974, № 142. Машиноведение.
28. ЛЕОНОВ А.И. К общей теории инерционных трансформаторов вращающего момента. Известия вузов. Сер. Машиностроение, 1975, № 7.
29. А.С.482585 (СССР) Храповой механизм свободного хода. Авт.изобрет. А.И.Леонов. Опубл. в Б.И. 1975, № 32.
30. ЛЕОНОВ А.И. Инерционный трансформатор вращающего момента – результаты работ и перспективы создания. - Науч.тр./ЧПИ, 1976, № 173. Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств.
31. ЛЕОНОВ А.И. Обобщенная схема импульсных механизмов. - Науч.тр./ЧПИ, 1976, № 173. Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств.
32. ЛЕОНОВ А.И. Методика выбора параметров инерционных трансформаторов с упругими элементами. - Науч.тр./ЧПИ, 1976, № 173. Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств.

33. ЛЕОНОВ А.И., ДУБРОВСКИЙ А.Ф., ПОНОМАРЕВ С.М., ДЕВЯТКИН П.В., МЕЛЬНИК А.Н. Экспериментальное исследование инерционного трансформатора с упругими элементами. - Науч. тр./ЧПИ, 1976, № 173. Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств.
34. ЛЕОНОВ А.И. Основные результаты и направления работ по инерционным автоматическим трансформаторам вращающего момента с упругими элементами. - В кн.: Тезисы докладов У Всеобщей конференции по вариаторам и передачам гибкой связи. Одесса, ОТИПИ им. М.В.Ломоносова, 1976.
35. ЛЕОНОВ А.И., МОРОЗОВ А.И., МЕЛЬНИК А.Н. К оптимизации параметров инерционного трансформатора вращающего момента с упругими элементами. - В кн.: Тезисы докладов Всеобщего съезда по теории машин и механизмов. Алма-Ата, 1977.
36. ЛЕОНОВ А.И. Развитие работ по инерционным трансформаторам вращающего момента. - В кн.: Тезисы докладов II Всеобщей конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, ЧПИ, 1977.
37. ЛЕОНОВ А.И., ДУБРОВСКИЙ А.Ф. Обзор конструкций инерционных трансформаторов с упругими элементами. - В кн.: Тезисы докладов II Всеобщей конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, ЧПИ, 1977.
38. ЛЕОНОВ А.И., НОВДРИН П.Ф., МЕЛЬНИК А.Н., ДЕВЯТКИН П.В. Экспериментальные исследования инерционного трансформатора. - В кн.: Тезисы II Всеобщей конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, ЧПИ, 1977.
39. А.С.643692 (СССР) Инерционный трансформатор вращающего момента. Авт. изобрет. А.И. Леонов, Н.Г. Танов. Опубл. в Б.И. 1979, № 3.
40. LEONOV A.I. and DUBROVSKY A.F. Dynamics of inertial stepless automatic transformers of driving moment with elastic elements. The Fifth World Congress on the theory of machines and mechanisms. Montreal, Canada, 1979.

Sk