

6203

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

**ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

---

---

**М. Ф. БАЛЖИ**

доцент, кандидат технических наук

**ИНЕРЦИОННЫЙ БЕССТУПЕНЧАТЫЙ  
ТРАНСФОРМАТОР  
КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА**

(ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ)

05.05.03

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**ЧЕЛЯБИНСК**  
1962

**ЧПИ**



Экспериментальные работы проводились в лаборатории гусеничных машин Челябинского политехнического института и в опытном отделе Челябинского тракторного завода.

## ВВЕДЕНИЕ

Решения XXII съезда КПСС на ближайшие годы одной из важнейших задач ставят создание материально-технической базы коммунистического общества. В этот период особо большое значение приобретают вопросы, связанные с повышением производительности труда. В области машиностроения, наряду с улучшением всех технико-экономических показателей, снижением металлоемкости и трудоемкости машин, необходимо всемерно добиваться повышения их производительности.

Процесс, осуществляемый любой машиной, может считаться наиболее производительным и экономичным лишь в том случае, когда он протекает на наивыгоднейших скоростях для данных условий работы.

Ряд факторов определяет наивыгоднейшую скорость течения рабочего процесса, но осуществляется она тогда, когда между двигателем и исполнительными органами машины имеется бесступенчатая передача.

Когда изменению скорости должно сопутствовать и соответствующее изменение крутящего момента, т. е. когда ставится задача использования полной мощности двигателя, то передача должна представлять собой бесступенчатый трансформатор крутящего момента.

В общем машиностроении (станкостроение, приборостроение, подъемно-транспортные машины и др.) все большее и большее распространение начинают получать механические фрикционные и импульсные трансформаторы, обеспечивающие при сравнительной простоте конструкции довольно высокий к. п. д.

Оба типа этих передач находят применение в области малых мощностей. Попытки установить их на машины большой мощности пока не дали положительных результатов как по надежности работы, так и по экономическим показателям.

Трансформаторы крутящего момента, устанавливаемые в трансмиссии транспортных и тяговых машин (автомобилей, тракторов, тягачей и др.), должны удовлетворять весьма тяжелым условиям работы, связанным с частыми изменениями внешних сопротивлений большого диапазона.

До настоящего времени ступенчатые передачи являются основными механизмами, применяющимися для изменения передаточного отношения между коленчатым валом двигателя внутреннего сгорания и ведущими органами машины. С помощью этих передач достигается изменение крутящего момента в зависимости от изменения величины внешних сопротивлений, а скорости движения — в зависимости от внешних условий.

Ступенчатые механические передачи относительно просты конструктивно, надежны в эксплуатации и обладают высоким к.п.д. Главным недостатком этих передач является затрудненный переход с одной скорости на другую, особенно в тяжелых машинах, где мощность двигателя достигает больших значений.

Наличие ступенчатых трансмиссий любых конструкций требует от водителя напряженного внимания во время движения машины; водитель должен своевременно выбирать оптимальную передачу для данных условий работы. Даже у опытного водителя двигатель работает с большими недогрузками, что снижает топливную экономичность и среднюю скорость движения, т. е. производительность.

Следует поэтому признать, что ступенчатые передачи в ряде случаев являются весьма несовершенным средством трансформации крутящего момента, широкое распространение которых обусловлено отсутствием другой, более рациональной конструкции.

Бесспорные теоретические преимущества бесступенчатой передачи над ступенчатой не нашли еще своего отражения в высокоэкономичной и надежной конструкции, отвечающей тяжелым условиям работы на таких машинах, как тягачи, грузовые автомобили и особенно тракторы.

Создание надежной бесступенчатой передачи, обладающей высоким к. п. д., является сложной общетехнической проблемой, значение которой трудно переоценить и которую можно отнести к весьма актуальным задачам современного машиностроения.

Одному из возможных вариантов решения этой задачи посвящена работа, освещаемая в настоящем автореферате. Автором разработаны новая схема, основы теории и расчета на прочность бесступенчатого трансформатора крутящего момента. Проведены экспериментальные исследования лабораторных моделей трансформаторов и бесступенчатой трансмиссии на гусеничном тракторе ЧТЗ.

Уже полученные результаты проделанной в этом направлении работы дают основание считать, что вопрос создания рациональной механической бесступенчатой передачи, обла-

дающей высоким к.п.д. и широким диапазоном изменения крутящего момента, может быть решен положительно.

Целью работы являлась разработка отправных данных, достаточных для проектирования инерционных трансформаторов крутящего момента силами заводских конструкторских бюро.

Объем работы определялся следующими задачами.

1. Разработка теоретических основ этого трансформатора.  
2. Вывод основных аналитических зависимостей, необходимых для построения механических характеристик и расчета на прочность главных деталей.

3. Проведение экспериментального исследования лабораторных моделей трансформатора и трактора с бесступенчатой трансмиссией с целью изучения их основных характеристик и свойств.

4. Анализ полученных экспериментальных данных и сравнение их с теоретическими.

5. Разработка методики расчета и проектирования трансформатора, рекомендуемых для практической конструкторской работы.

Объем работы по созданию промышленных образцов таких передач очень большой и должен состоять из следующих основных этапов:

а) разработка кинематической схемы и механической характеристики трансформатора для конкретной машины;

б) разработка конструкции и выпуск технической документации, необходимых для изготовления опытных образцов;

в) изготовление опытных образцов и всестороннее их исследование в лабораторных и эксплуатационных условиях;

г) доработка конструкции по результатам испытаний опытных образцов с целью получения требуемой долговечности и других основных эксплуатационных показателей;

д) разработка промышленных образцов для серийных машин.

Выполнение этих этапов работ будет во многом зависеть от назначения машины и, в зависимости от области ее применения, носить самый разнообразный характер. В каждом отдельном случае требуется конкретная постановка и решение задачи.

Рассматриваемая работа может служить основой для первого и второго этапов работ, являющихся, однако, общими и исходными при проектировании трансформаторов для машин различных назначений. Новый трансформатор крутящего момента может найти применение в самых различных областях машиностроения, но, учитывая, что отрасль транспортного

машиностроения предъявляет к ним самые высокие требования, в рассматриваемой работе основное внимание уделено задаче создания трансформаторов крутящего момента для автомобилей и тракторов как наиболее распространенных из транспортных и тяговых машин.

Методически работа, рассматриваемая в автореферате, построена следующим образом.

1. Изучение существующих конструкций бесступенчатых передач.

2. Анализ этих конструкций с точки зрения применения их на автомобилях и тракторах.

3. Разработка и обоснование требований на конструкцию рациональной бесступенчатой передачи для транспортных машин.

4. Обоснование рациональной конструктивной схемы трансформатора крутящего момента; разработка основ его теории и расчета на прочность.

5. Исследование различных опытных моделей такого трансформатора крутящего момента с целью изучения основных его характеристик и свойств.

6. Анализ, обобщение и сравнение полученных теоретических и экспериментальных данных.

7. Разработка методов, необходимых для решения практических задач проектирования инерционных трансформаторов крутящего момента.

Настоящая работа в соответствии с этим состоит из пяти глав.

В первой главе дан анализ существующих конструкций бесступенчатых передач в условиях применения их на автомобилях и тракторах.

Существующие бесступенчатые передачи отличаются большим разнообразием принципов действия и конструкций, поэтому для удобства дальнейшего изложения дана краткая классификация их по основным признакам.

Существующие бесступенчатые передачи разделены на три основные группы.

1. Электрические.

2. Гидравлические.

3. Механические.

Гидравлические, в свою очередь, подразделены на:

а) гидростатические;

б) гидродинамические.

Механические трансформаторы разделены на:

а) фрикционные;

б) импульсивные.

Импульсивные также разделены на:

- а) рычажные;
- б) инерционные.

И все бесступенчатые трансформаторы крутящего момента разделены на:

- а) регулируемые;
- б) автоматические.

Электрическая передача, чаще всего выполняемая по однопоточной схеме: двигатель внутреннего сгорания, непосредственно связанный с генератором электрического тока, который питает от одного до нескольких электрических двигателей, в свою очередь, связанных с ведущими элементами машины, — обладает хорошей тяговой характеристикой и автоматической приспособляемостью к изменениям внешних сопротивлений. Диапазон изменения скоростей ограничен величиной  $2\frac{1}{3}$ . При больших изменениях сильно падает и без того низкий к.п.д. Для увеличения диапазона требуется вводить механические ступени, что усложняет передачу.

Электрические трансмиссии относительно громоздки, тяжелы, сложны конструктивно и имеют низкий средний к.п.д.

Такие передачи нашли применение в тепловозостроении, где указанные недостатки относительно малозначащи, а решает главное достоинство — хорошая тяговая характеристика. На автомобилях, тракторах, тягачах и др. электропередачи в описанном виде почти не применяются и весьма малоперспективны.

Гидростатическая передача, состоящая из объемных насоса и мотора, регулируемого типа, может давать большой диапазон изменения крутящего момента. Попытки применения этих передач для транспортных машин делались и делаются, но распространения они пока не получили. Это объясняется трудностями конструктивного характера в осуществлении малогабаритной, надежной и долговечной передачи такого типа, обладающей высоким к. п. д.

Гидродинамический трансформатор, состоящий из центробежного насоса, направляющих аппаратов и двигателя — турбины, может на режимах, близких к прямой передаче, обращаться в гидромuftу. Эти трансформаторы, использующие кинетическую энергию рабочей жидкости, компактны и относительно просты конструктивно, имеют хорошую тяговую характеристику, автоматически приспособляются к изменениям внешних сопротивлений и легки в управлении. В автомобилестроении (США) они получили довольно большое распространение.

Основными недостатками их являются низкий средний

к.п.д. и малый диапазон изменения крутящего момента. В связи с малым диапазоном, в ряде случаев, в трансмиссию с гидродинамическим трансформатором вводят механические ступени, которые усложняют, удорожают трансмиссию и лишают ее, по существу, бесступенчатости, так как не найдено еще решение вопроса перехода с одной скорости на другую без перерыва передачи крутящего момента.

В силу этого, основные теоретические преимущества бесступенчатой передачи—большая экономичность и лучшее использование мощности двигателя полностью—не реализуются. Наоборот, при переходе на гидродинамическую передачу снижается экономичность машины и увеличивается мощность двигателя с целью компенсации указанных недостатков гидротрансформатора.

Из многочисленных типов фрикционных передач только конструкции с металлическими трущимися парами могут найти применение в трансмиссиях транспортных машин. Такая передача, состоящая из двух тороидальных чашек и зажатых между ними роликов, обладает довольно высоким к.п.д., но узким диапазоном изменения крутящего момента (от 3,5 до 4) и, следовательно, в ряде случаев также нуждается в дополнительных механических ступенях. Для изменения передаточного отношения требуется наличие специального регулирующего устройства. Применение таких передач, даже для машин малой мощности, не дало пока положительных результатов.

Импульсивная рычажная передача в принципе представляет собой эксцентрик, сидящий на ведущем валу, через рычаг, связанный с ведущим элементом механизма свободного хода, ведомый элемент которого закреплен на выходном валу трансформатора. Амплитуда качания рычага и, следовательно, число оборотов ведомого вала зависят от эксцентриситета эксцентрика, меняя который можно менять передаточное число механизма и величину крутящего момента на выходном валу. Такая передача дает возможность получить большой диапазон изменения крутящего момента, но для приспособления к изменению внешних сопротивлений нуждается в специальном устройстве.

Передачи этого типа находят применение в общем машиностроении, но на транспортных машинах распространения не получили.

Импульсивные инерционные передачи основаны на использовании энергии колеблющихся масс. Они обладают хорошей тяговой характеристикой, большим диапазоном изменения крутящего момента, высоким к.п.д. и автоматичностью действия. Из известных передач этого типа, наиболее приближаю-



щимися к требованиям установки на транспортные машины, являются передачи Спонтан и Хоббс. Эти передачи не получили распространения на транспортных машинах. Они сложны конструктивно и мало надежны в эксплуатации, главным образом из-за наличия механических аккумуляторов энергии обратного импульса.

Трудности, возникшие в свое время при попытках создать инерционные бесступенчатые трансмиссии для автомобилей, ослабили интерес к этому перспективному направлению и передачи этого типа на долгие годы были забыты. Между тем, разработка новых схем, использование современной технологии и материалов открывают в настоящее время большие возможности в создании механических бесступенчатых трансмиссий с инерционным трансформатором крутящего момента.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные советскими учеными: И. И. Артоболевским, Н. К. Куликовым, В. Ф. Мальцевым, В. А. Светозаровым, Б. А. Прониным, А. С. Антоновым, Г. И. Зайчиком и др., облегчают анализ бесступенчатых передач и определение направления в решении этой задачи.

Основываясь на анализе существующих конструкций, можно сделать вывод, что инерционные передачи в принципе своем наиболее перспективны для транспортных машин, и второй вывод, что удовлетворительной конструкции инерционного трансформатора для этих целей еще не было.

Инерционные передачи, как и вообще все импульсные передачи, имеют механизм свободного хода (автолог), который определяет возможность существования их и является в настоящее время наиболее слабым местом такой передачи.

Таким образом, вопрос применения инерционных передач на транспортных машинах в значительной мере определяется их кинематической схемой и конструкцией.

В первой главе также разработаны и обоснованы требования на конструкцию автотракторной бесступенчатой передачи, которые в основном сводятся к следующему.

**1. Малые габариты.** Понятие о габаритах вообще относительное, но нужно считать вполне удовлетворительным, если габариты бесступенчатой передачи не будут превышать габаритов ступенчатой передачи одинаковой работоспособности.

**2. Высокий к. п. д., малозависящий от изменения режима работы.** К. п. д. гидравлических и электрических передач при установке их на автомобили и тракторы в диапазоне изменения крутящего момента в пределах 2,5—3,5 не бывает выше 0,7—0,75. Увеличение диапазона до 8—10 вызывает необходимость ввода механических ступеней и, следовательно, еще

большого снижения к. п. д. Низкий к. п. д. в механизмах, передающих большую мощность и имеющих массовое распространение, допускать нельзя. Поэтому к. п. д. бесступенчатой передачи не должен уступать к. п. д. ступенчатой и не должен сильно меняться во всем диапазоне изменения крутящего момента. Только в этом случае будут полностью реализованы все преимущества бесступенчатой передачи.

**3. Достаточный диапазон регулирования передаточных отношений между коленчатым валом двигателя и ведущими органами машины.** Это требование исключает возможность применения дополнительных механических ступеней в диапазоне изменения передаточных чисел от 8 до 10.

**4. Автоматическая приспособляемость к изменению внешних сопротивлений.** Человек не может достаточно тонко и четко реагировать на изменение внешних сопротивлений, а ввод специальных регулирующих устройств сильно усложняет конструкцию передачи и снижает ее надежность.

Существуют передачи, которые в силу своей принципиальной сущности автоматически приспособляются к изменениям внешних сопротивлений (например гидротрансформатор). Такие передачи наиболее подходят для транспортных машин.

**5. Возможность работы на прямую.** В определенных условиях движения обороты ведущего и ведомого валов трансформатора могут сближаться. В этом случае целесообразна работа «на прямую», по аналогии со ступенчатой коробкой скоростей, что имеет особо важное значение для трансмиссий автомобилей. Так как это свойство в определенных условиях может повысить к.п.д. и долговечность, то оно должно быть сохранено и в рационально построенной бесступенчатой передаче.

**6. Легкое управление машиной в процессе работы.** Это требование связано с необходимостью вмешательства водителя в работу машины. Степень «прозрачности» характеристики трансформатора определяется величиной изменения момента и оборотов двигателя под влиянием внешних сопротивлений. Полностью «непрозрачные» трансформаторы крутящего момента (при полной загрузке) не оказывают влияния на режим работы двигателя. «Прозрачные» трансформаторы в зависимости от своих конструктивных параметров в той или иной степени влияют на работу двигателя. Но наличие как «прозрачного», так и «непрозрачного» трансформатора не исключает необходимости вмешательства водителя в работу передачи, что связано с вынужденными изменениями скорости движения машины. Поэтому выбор степени «прозрачности» должен определяться легкостью управления и может быть уверенно решен только экспериментальным путем.

**7. Возможность работы без муфты сцепления.** Этот пункт вытекает из необходимости создания простой конструкции с минимальными габаритами. Так как этому условию отвечают некоторые конструкции импульсных передач, то это свойство нужно сохранить и в хорошо сконструированной бесступенчатой передаче.

**8. Высокая долговечность и надежность конструкции.** Любая передача, отвечающая всем требованиям установки на транспортные машины, но не отличающаяся долговечностью и надежностью в работе, не получит распространения. Она не должна в этом отношении уступать хорошим конструкциям ступенчатых передач.

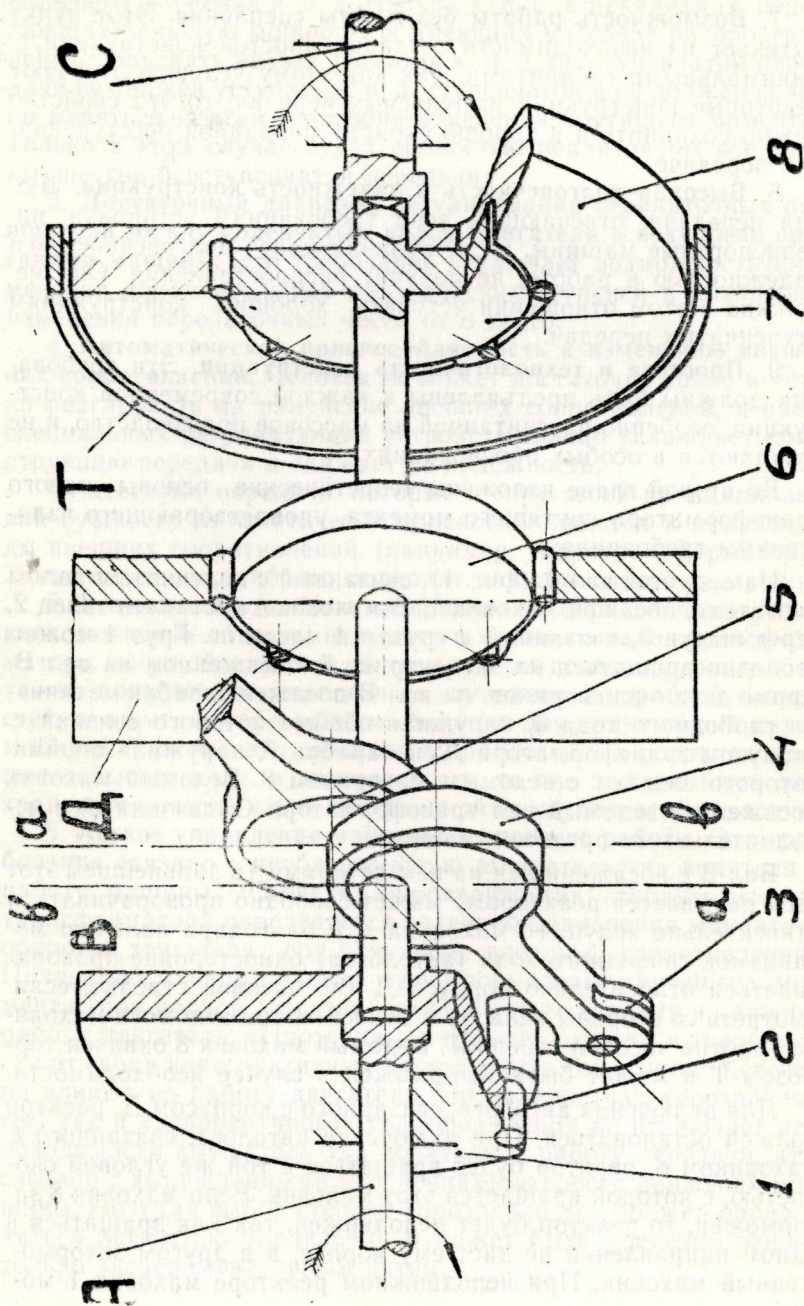
**9. Простота и технологичность конструкции.** Эти требования должны быть предъявлены к каждой современной конструкции, особенно рассчитанной на массовое производство, и не нуждаются в особых обоснованиях.

Во второй главе изложены теоретические основы нового трансформатора крутящего момента, удовлетворяющего изложенным требованиям.

На ведущий вал А (фиг. 1), связанный с коленчатым валом двигателя, посажен маховик 1. В маховик 1 поставлен палец 2, через шатун 3, связанный с грузом 4 массы  $m$ . Груз 4 может свободно вращаться на эксцентрикe 5, посаженном на вал В. Кроме двух эксцентриков, на вал В посажен барабан механизма свободного хода 6, наружная обойма которого связана с корпусом трансформатора Д, и барабан 7, наружная обойма которого связана с ведомым маховиком 8. Ведомый маховик посажен на ведомый вал трансформатора С, связанный с исполнительными органами машины.

Вал В с посаженными на нем деталями (в дальнейшем этот узел называется реактором) может свободно проворачиваться относительно ведущего маховика 1, и благодаря наличию механизмов свободного хода (автологов) односторонне проворачиваться относительно корпуса Д (по часовой стрелке, если смотреть со стороны вала А) и относительно ведомого маховика (против часовой стрелки). Ведомый маховик 8 охвачен тормозом Т и может быть заторможен в случае необходимости.

Для включения автолога, связанного с корпусом Д, реактор должен остановиться. При включении автолога, связанного с маховиком 8, реактор будет вращаться с той же угловой скоростью, с которой вращается этот маховик. Если маховик 8 заторможен, то реактор будет неподвижен, так как вращаться в одном направлении не даст ему корпус, а в другом заторможенный маховик. При неподвижном реакторе маховик 1 мо-



Фиг. 1. Пространственная кинематическая схема трансформатора крутящего момента.

жет вращаться и вращать грузы относительно эксцентриков реактора. При вращении вала С с числом оборотов меньшим, чем число оборотов вала А, грузы относительно эксцентриков будут вращаться с числом оборотов, равным разности оборотов валов А и С. При одинаковых оборотах валов А и С грузы не будут проворачиваться относительно эксцентриков.

Принцип действия трансформатора заключается в следующем. При вращении грузов массы относительно эксцентриков возникает центробежная сила инерции. Под действием этой силы, в связи с наличием эксцентриситета, на реактор будут действовать моменты от центробежных сил инерции. Момент при движении грузов от точек *аа* до точек *вв* будет передаваться через реактор маховику 8, а при движении от точек *вв* до точек *аа*, через реактор (после его остановки) на корпус трансформатора. При вращении трансформатора без нагрузки (при заторможенном вале С), средние значения этих импульсов будут равные по величине и разные по знаку. Момент, действующий на маховик, принят положительным, а на корпус — отрицательным.

Если допустить, что маховик 8 вращается с заданной угловой скоростью, то на разгон реактора (до включения автолога) будет затрачено какое-то количество энергии, тем большее, чем больше будет угловая скорость маховика 8. При торможении реактора моментом, создаваемым грузами в отрицательной части цикла, энергия, накопленная в реакторе при его разгоне (в положительной части цикла), будет возвращено обратно ведущим элементам. В этом принципиальное отличие рассматриваемого трансформатора от всех инерционных трансформаторов, известных в настоящее время.

Во время торможения, остановки и последующего разгона реактора ведомый маховик будет вращаться по инерции.

За один полный оборот грузов относительно реактора совершается полный цикл, после чего процесс повторяется вновь.

В общем случае трансформатором называется механизм, способный изменять характер протекания процесса по определенному закону. В рассматриваемом случае представляет интерес характер изменения крутящего момента на валу С в функции от числа его оборотов.

Величина момента, развиваемого грузами на реакторе, зависит от массы грузов  $m$ , радиуса расположения центра их тяжести, числа оборотов и положения груза относительно эксцентрика, т. е. от плеча  $e_1$  — расстояния между направлением центробежной силы и осью вращения реактора. Плечо  $e_1$  меняется за каждый цикл два раза от нуля до максимума и от

максимума до нуля. Момент на реакторе меняется соответственно изменению плеча  $e_1$ .

Как говорилось выше, на разгон реактора до оборотов маховика 8 необходимо затратить энергию тем большую, чем больше его обороты и чем больше момент инерции реактора  $I_p$ . До определенного значения оборотов маховика 8 крутящий момент, потребный на разгон реактора, будет увеличиваться.

Следовательно:

$$M_m = M_{m1} - M_p, \quad (1)$$

где  $M_m$  — средний момент, развиваемый на ведомом маховике в положительной части цикла;

$M_{m1}$  — средний момент, развиваемый грузами на реакторе в положительной части цикла;

$M_p$  — средний момент, потребный на разгон реактора от нуля до оборотов ведомого маховика.

Средний момент, действующий на картер трансформатора, также будет уменьшаться на величину среднего момента, потребного для торможения реактора.

Из сказанного следует, что момент, развиваемый на маховике 8, будет зависеть от его оборотов. С увеличением их он будет уменьшаться, а с уменьшением увеличиваться.

Так как энергия, потраченная на разгон реактора в положительной части цикла, в отрицательной его части возвращается обратно ведущим элементам, то для циклической работы двигатель должен компенсировать только ту энергию, которую маховик 8 получил безвозвратно в положительной части цикла, при совместном его разгоне с реактором.

Из описания принципа действия трансформатора следует, что данный механизм в течение полного цикла работы обладает переменной структурой. При неподвижном реакторе он представляет собой шарнирный четырехзвенник с одной степенью свободы, а при движущемся реакторе — шарнирный пятизвенник с двумя степенями свободы.

Дифференциальные уравнения движения механизма на режиме пятизвенника в форме уравнений Лагранжа будут иметь следующий вид.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\omega}_d} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_d} &= M_d, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\omega}_p} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_p} &= M_c, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $T$  — кинетическая энергия механизма;  
 $\alpha_d$  и  $\alpha_p$  — обобщенные координаты;  
 $\omega_d$  и  $\omega_p$  — обобщенные скорости;  
 $M_d$  — внешний момент, действующий на ведущий маховик;  
 $M_c$  — внешний момент, действующий на реактор.

$$T = T_r + T_{гр} + T_c = I_d \frac{\omega_d^2}{2} + I_{гр} \frac{(\omega_{гр} + \omega_p)^2}{2} + I_p \frac{\omega_p^2}{2}, \quad (3)$$

где  $T_r$  — кинетическая энергия ведущего маховика;  
 $T_{гр}$  — кинетическая энергия груза;  
 $T_c$  — кинетическая энергия реактора;  
 $\omega_p$  — угловая скорость реактора;  
 $\omega_{гр}$  — угловая скорость груза в его движении относительно реактора, равная:

$$\omega_{гр} = \frac{r \cdot \omega_d}{R} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \varphi},$$

где  $r$  — радиус расположения пальца шатуна в ведущем маховике;  
 $R$  — расстояние от центра эксцентрика до оси шарнира Д шатуна;  
 $\omega_d$  — угловая скорость ведущего маховика;  
 $\varphi$  — угол между  $R$  и осью шатуна;  
 $\gamma$  — угол между осью шатуна и  $r$ .

Кинетической энергией шатуна пренебрегаем вследствие ее малости. Приведенные моменты инерции механизма будут равны:

$$\left. \begin{aligned} I_{пр д} &= I_d + I_{гр} \left( \frac{\omega_{гр} + \omega_p}{\omega_d} \right)^2 + I_p \left( \frac{\omega_p}{\omega_d} \right)^2, \\ I_{пр р} &= I_p + I_{гр} \left( \frac{\omega_{гр} + \omega_p}{\omega_p} \right)^2 + I_d \left( \frac{\omega_d}{\omega_p} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $I_d$  — момент инерции ведущего маховика;  
 $I_p$  — приведенный момент инерции реактора;  
 $I_{гр}$  — момент инерции груза относительно его мгновенной оси вращения.

При включении автолога маховика второе уравнение системы (4) примет вид:

$$I_{пр м} = (I_p + I_m) + I_{гр} \left( \frac{\omega_{гр} + \omega_m}{\omega_m} \right)^2 + I_d \left( \frac{\omega_d}{\omega_m} \right)^2,$$

так как  $\omega_p = \omega_m$ , а момент инерции ведомых элементов станет  $I_p + I_m$ .

После подстановки этих выражений в уравнение Лагранжа (2) получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial}{\partial \omega_d} \left( I_{npd} \frac{\omega_d^2}{2} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \alpha_d} \left( I_{npd} \frac{\omega_d^2}{2} \right) &= M_d, \\ \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial}{\partial \omega_p} \left( I_{npp} \frac{\omega_p^2}{2} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \alpha_p} \left( I_{npp} \frac{\omega_p^2}{2} \right) &= M_c, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После дифференцирования и необходимых преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d \cdot I_{npd}}{d \alpha_d} \frac{\omega_d^2}{2} + I_{npd} \cdot \omega_d \frac{d \omega_d}{d \alpha_d} &= M_d, \\ \frac{d \cdot I_{npp}}{d \alpha_p} \frac{\omega_p^2}{2} + I_{npp} \cdot \omega_p \frac{d \omega_p}{d \alpha_p} &= M_c, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

или, учитывая, что  $\varepsilon = \omega \frac{d\omega}{d\alpha}$ , получим эти уравнения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} I_{npd} \cdot \varepsilon_d + \frac{\omega_d^2}{2} \frac{d I_{npd}}{d \alpha_d} &= M_d, \\ I_{npp} \cdot \varepsilon_p + \frac{\omega_p^2}{2} \frac{d I_{npp}}{d \alpha_p} &= M_c, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_p$  — угловые ускорения ведущего маховика и реактора.

Интегрируя первое уравнение системы (7), можно было бы найти закон движения ведущего вала импульсатора, а второе — закон движения реактора. Но точное интегрирование этих уравнений невозможно, так как они представляют собой нелинейную систему, в которой приведенные моменты инерции являются сложными функциями положения звеньев механизма. Для решения полученных уравнений можно применить лишь приближенный численный метод, который не дает возможности установить общие зависимости между кинематическими характеристиками механизма и его параметрами. В данном случае этот метод связан с очень трудоемкими вычислительными действиями, которые необходимо повторять каждый раз при назначении новых параметров механизма.



Эти обстоятельства послужили причиной тому, что задача нахождения момента трансформатора была решена методом энергетического анализа для характерных моментов времени в процессе его работы, т. е. на основе уравнения движения в форме живых сил:

$$\frac{I_{\text{пр}} \cdot \omega^2}{2} - \frac{I_{\text{пр}0} \cdot \omega_0^2}{2} = A, \quad (8)$$

где:

$$A = \int_{\alpha_0}^{\alpha} (M_{\text{д}} - M_{\text{с}}) d\alpha. \quad (9)$$

Так как в (9) из-за отсутствия механической характеристики трансформатора неизвестно подинтегральное выражение в функции угла поворота  $\alpha$ , то задача решена приближенно, через определенные интервалы (считая момент на некотором промежутке угла поворота величиной постоянной), тогда:

$$A = M_{\text{ср}} \cdot \alpha', \quad (10)$$

где  $\alpha'$  — угол поворота маховика относительно реактора.

Из (10):

$$M_{\text{ср}} = \frac{A}{\alpha'}. \quad (11)$$

Основываясь на (11), для построения характеристики трансформатора было найдено среднее значение момента импульсатора за положительную часть цикла и средний момент, потребный на разгон реактора до оборотов ведомого маховика.

Центробежная сила груза  $P_{\text{ц}}$ , действуя на плечо  $e_1$ , стремится повернуть реактор около его оси вращения.

$$e_1 = e \cdot \sin \beta, \quad (12)$$

где  $e$  — эксцентриситет эксцентрика;

$\beta$  — угол между направлением  $P_{\text{ц}}$  и направлением эксцентриситета.

Момент, действующий на реактор в положительной части, будет:

$$M_{\text{м1}} = \frac{P_{\text{ц}} \cdot e}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \beta d\beta =$$

$$\frac{P_{\text{ц}} \cdot e}{\pi} [-\cos 180^\circ - \cos 0^\circ] = \frac{2P_{\text{ц}} \cdot e}{\pi}.$$

Заменяв в этом выражении  $P_{ц}$  и учтя массу двух грузов, получим:

$$M_{м1} = 1,273 \cdot e \cdot m \cdot R \cdot \omega_d^2. \quad (13)$$

Выражение (13) дает величину момента от центробежных сил грузов при неподвижном реакторе, считая, что масса груза сосредоточена в шарнире  $D$  (фиг. 2). Если реактор вращается, то динамический момент, действующий на него, будет уменьшаться в отношении:

$$\frac{n_d - n_m}{n_d}.$$

Постоянство момента в соответствии с (13) будет сохраняться за счет статического момента двигателя, если величина его будет достаточной.

В общем же случае выражение для момента будет иметь следующий вид:

$$M_{м1} = 1,273 \cdot e \cdot m \cdot R_r \cdot \omega_{д\text{ ср}}^2 \frac{n_d - n_m}{n_d} + 2M_d, \quad (14)$$

где  $R_r$  — расстояние от оси вращения груза до его центра тяжести,

$\omega_{д\text{ ср}}$  — средняя угловая скорость ведущего маховика

$$\omega_{д\text{ ср}} = \frac{\omega_{д1} + \omega_{дII}}{2}, \quad (15)$$

т. е. является средним арифметическим угловых скоростей ведущего маховика в точках  $aa$  и  $bb$ .

В свою очередь:

$$\omega_{д1} = \sqrt{\frac{I_{в\text{ max}} \omega_d^2 - I_p \omega_{д1}^2}{I_{в\text{ min}}}}, \quad (16)$$

где  $I_{в\text{ max}}$  — максимальный момент инерции импульсатора:

$$I_{в\text{ max}} = I_d + 2I_r + 2 \cdot m \cdot R_x^2_{\text{ max}}, \quad (17)$$

$I_{в\text{ min}}$  — минимальный момент инерции импульсатора.

$$I_{в\text{ min}} = I_d + 2I_r + 2 \cdot m \cdot R_x^2_{\text{ min}}. \quad (18)$$

В выражениях (17) и (18):

$I_{\Gamma}$  — момент инерции груза относительно его центра тяжести;

$R_{x \max}$  — максимальный радиус расположения ц. т. грузов от оси вращения;

$R_{x \min}$  — минимальный радиус расположения ц. т. грузов от оси вращения;

$\omega_{M1}$  — угловая скорость вращения ведомого маховика в конце положительной части цикла.

$$\omega_{M1} = \sqrt{\frac{I_M \cdot \omega_d^2 \cdot i^2 (n_d - n_M) + 2\pi \cdot M_d \cdot n_d}{I_M (n_d - n_M)}}, \quad (19)$$

где  $I_M$  — приведенный момент инерции ведомых частей трансформатора,

$i = \frac{n_M}{n_d}$  — передаточное отношение трансформатора на данном режиме работы;

$n_d$  — средние обороты ведущего вала трансформатора;

$n_M$  — средние обороты ведомого вала трансформатора.

$$\omega_{dII} = \sqrt{\frac{(n_d - n_M) I_{B \max} \omega_d^2 + 2\pi M_d \cdot n_d}{I_{B \max} (n_d - n_M)}}, \quad (20)$$

Выражения: (14), (15), (16), (17), (18), (19) и (20) дают возможность определить  $M_{M1}$ , при различных значениях  $n_M$ .

Момент, потребный на разгон реактора, будет:

$$M_p = \frac{I_p (n_d - n_M) \left[ \frac{2\pi \cdot M_d \cdot n_d}{I_M (n_d - n_M)} + \omega_M^2 \right]}{2\pi \cdot n_d}. \quad (21)$$

Так как вторую, отрицательную часть цикла ведомый маховик вращается по инерции, то момент, действующий на него в течение всего цикла, будет:

$$M_{\Gamma} = \frac{M_{M1} - M_p}{2}. \quad (22)$$

Подставив в (22) значение  $M_{M1}$  из (14) и  $M_p$  из (21), получим:

$$M_{\Gamma} = \frac{n_d - n_M}{2n_d} \left\{ 1,273 \cdot e \cdot m \cdot R_{\Gamma} \cdot \omega_d^2 \text{ ср} - \frac{I_p \left[ \frac{2\pi M_d \cdot n_d}{I_M (n_d - n_M)} + \omega_M^2 \right]}{2\pi} \right\} + M_d. \quad (23)$$

Первый член в квадратных скобках выражения (21) зависит от мощности, передаваемой трансформатором. Если допустить, что эта мощность пренебрежимо мала, то:

$$M_p = \frac{I_p(n_d - n_m)\omega_m^2}{2\pi \cdot n_d} \quad \text{или} \quad M_p = \frac{\pi I_p}{1800} \left( n_m^2 - \frac{n_m^3}{n_d} \right).$$

Это выражение может быть приведено к виду уравнения:

$$y = ax^2 - bx^3, \quad (24)$$

т. е. алгебраической сумме квадратичной и кубической парабол.

Из рассмотрения (14) и (24) видно, что они (при условии  $\omega_{д\text{ ср}} = \text{const}$ ) дадут: первое значение  $M_{м1}$ , которое графически выражается наклонной прямой, а второе — значение  $M_p$ , которое графически выражается кривой параболического характера.

Построив график  $M_T = f(n_m)$  на основании (23), получим теоретическую характеристику трансформатора.

Так как характеристика идеального «непрозрачного» трансформатора отвечает уравнению:

$$M_T \cdot n = \text{const}$$

и представляет собою гиперболу, то рассматриваемый трансформатор будет обладать некоторой «прозрачностью».

Действительная механическая характеристика за счет внутренних потерь и передаваемой мощности будет несколько отличаться от теоретической.

Кроме построения теоретической характеристики, во второй главе построены теоретические характеристики трансформаторов для 100-сильного трактора Челябинского тракторного завода; автомобиля Урал-355М Уральского автомобильного завода и автомобиля «Победа» Горьковского автомобильного завода. Эти механические характеристики, построенные для конкретных машин, дают представление о таких свойствах трансформатора, как: устойчивость работы на заданном режиме, регулирование нагрузки, степень «прозрачности» и др.

В процессе построения характеристик для указанных машин были проанализированы степень влияния параметров:  $m$ ,  $R_r$ ,  $e$  и  $I_p$  и методы рационального выбора их.

Решение всех вопросов, связанных с конструированием такого трансформатора, представляет сложную техническую задачу, которая будет упрощаться только по мере накопления конкретных данных производства и эксплуатации механизмов.

С учетом всего изложенного во второй главе сделаны следующие теоретические выводы:

1. Рассматриваемый механизм является трансформатором крутящего момента, автоматически изменяющим его в зависимости от изменения величины внешних сопротивлений.

2. Трансформатор работает циклически. Изменение момента за цикл происходит в зависимости от изменения оборотов ведомого вала и момента, потребного на разгон реактора. Величина приведенного момента инерции реактора может сильно влиять на характеристику рассматриваемого трансформатора крутящего момента.

3. Трансформатор обладает весьма широким диапазоном изменения крутящего момента и свойством автоматически поддерживать заданный режим работы.

4. В силу того, что момент, развиваемый трансформатором, пропорционален квадрату оборотов ведущего маховика, характеристика его должна весьма чувствительно реагировать на их изменение, что даст возможность близко подходить к характеристике идеального трансформатора. Это позволяет добиться высокой степени использования мощности двигателя, что должно обеспечить машине наиболее высокие динамические показатели при данной максимальной мощности.

5. Регулирование нагрузки трансформатора обеспечивается простым изменением числа оборотов ведущего вала, что должно резко упростить управление машиной, так как все манипуляции, связанные с переключением передач в ступенчатых трансмиссиях, могут быть заменены простым воздействием на педаль подачи топлива.

6. Трансформатор исключает жесткие кинематические связи между трансмиссией и двигателем, что гарантирует его от заглохания. Это же свойство исключает возможность перегрузки как двигателя, так и трансмиссии.

7. Наличие корпусного автолога может обеспечить остановку машины на подъеме без применения тормозов, простым уменьшением подачи топлива и трогание с места в этих условиях — увеличением подачи.

8. Возможность работы на «прямую» ставит рассматриваемый трансформатор в исключительно выгодные условия в сравнении с другими бесступенчатыми передачами, не обладающими этим свойством. Это качество имеет особенно большое значение при установке его на автомобиле, который до 80—85% времени работает на прямой передаче.

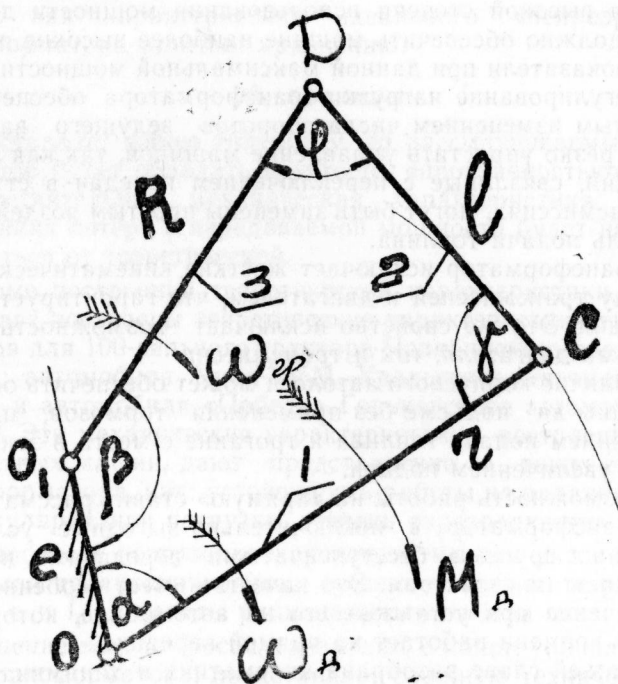
В третьей главе разобрана кинематика и динамика трансформатора, даны методы расчета на прочность основных деталей и разобраны некоторые возможные варианты его кон-

струкции. Особо в этой главе рассмотрены вопросы конструкции и расчета рационального механизма свободного хода (пластинчатого автолога), являющегося основным узлом любого импульсного трансформатора.

Исследование трансформатора проведено на основе анализа схемы, изображенной на фиг. 1.

Так как при неподвижном реакторе (вследствие минимальной длительности цикла) в механизме импульсатора возникают максимальные силы инерции, то определение расчетных усилий проведено на этом режиме, т. е. когда механизм представляет собой шарнирный четырехзвенник с одной степенью свободы (фиг. 2).

Для построения механической характеристики трансформатора достаточно знать средние значения моментов за цикл, для расчета же на прочность деталей необходимо знать максимальные значения сил, возникающих в течение цикла и характер их действия.



Фиг. 2. Схема импульсатора, работающего на режиме четырехзвенника с одной степенью свободы

Для получения возможности определения величины и характера действия сил, развивающихся в импульсаторе, исследована его кинематическая схема в зависимости от положения груза относительно эксцентрика. Выведенные формулы дают возможность определить положение всех звеньев механизма в зависимости от положения ведущего маховика относительно реактора.

Момент, развиваемый на импульсаторе, находится по формуле:

$$M_0 = m \cdot R_r \cdot \omega_{гр}^2 \cdot e \cdot \sin \beta, \quad (25)$$

где  $\beta$  — угол поворота груза относительно эксцентрика,  
 $\omega_{гр}$  — угловая скорость груза относительно эксцентрика.

$$\omega_{гр} = \frac{r \cdot \omega_d \cdot \sin \gamma}{R \cdot \sin \varphi}. \quad (26)$$

$M_0$  — момент, действующий на реактор в положительной части цикла, передается ведомому маховику, а в отрицательной — на корпус трансформатора.

Центробежная сила, развиваемая грузом, находится из выражения:

$$P_{ц} = m \cdot R_r \cdot \omega_{гр}^2. \quad (27)$$

Зная  $M_0$  и  $P_{ц}$ , можно произвести расчет ряда деталей и соединений, определяемых по конструктивной схеме трансформатора.

Особо рассмотрена методика определения реакций в подшипниках  $O_1$ , Д и С (см. фиг. 2).

Для определения реакций подшипников используется, на основе метода кинестатики (принцип Даламбера), условие равновесия внешних и инерционных сил.

Для определения реакций в подшипниках С и  $O_1$  ( $R_c$  и  $R_{o1}$ ) составлено уравнение равновесия внешних сил в векторной форме для системы  $O_1$ , Д и С.

$$\overline{P_r^{ин}} + \overline{P_{ш}^{ин}} + \overline{R_c} + \overline{R_{o1}} + \overline{R_c} + \overline{R_{o1}} = 0. \quad (28)$$

Для нахождения касательных составляющих используется уравнение моментов для шатуна:

$$\Sigma M_d = M_d(\overline{P_{ш}^{ин}}) + M_d(\overline{R_c}) + M_{ш}^{ин} = 0. \quad (29)$$

Из этого уравнения находится  $R_c$ .

Равновесие сил, действующих на груз, дает возможность из аналогичного уравнения найти значение  $R_{01}^{\tau}$ .

$$\Sigma M_D(\overline{P_r^{ин}}) + M_D(\overline{R_{01}^{\tau}}) + M_r^{ин} = 0. \quad (30)$$

Построив затем на основании векторного уравнения (28) замкнутый силовой многоугольник, определим нормальные составляющие реакции  $R_c^n$  и  $R_{01}^n$ .

Полные реакции в шарнирах найдутся из выражений:

$$R_c = \sqrt{(R_c^n)^2 + (R_c^{\tau})^2} \quad \text{и} \quad R_{01} = \sqrt{(R_{01}^n)^2 + (R_{01}^{\tau})^2}. \quad (31)$$

Силы инерции звеньев и моменты инерционных пар находятся из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} \overline{P_r^{ин}} &= -m_r \cdot \overline{a_{sr}} \\ \overline{P_{ш}^{ин}} &= -m_{ш} \cdot \overline{a_{sш}} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} M_r^{ин} &= -I_r \cdot \varepsilon_r \\ M_{ш}^{ин} &= -I_{ш} \cdot \varepsilon_{ш} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где  $a_{sr}$  и  $a_{sш}$  — полные ускорения центров тяжести груза и шатуна,

$\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_{ш}$  — угловые ускорения этих звеньев.

Оба вида этих ускорений определяются из плана ускорений для импульсатора-четырёхзвенника.

Значения  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_{ш}$  могут быть определены и аналитически.

$$\varepsilon_r = \frac{e \cdot r \cdot \omega_d^2}{R \cdot l} \left( \frac{\cos \gamma \cdot \sin \beta - \frac{r}{R} \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varphi}{\sin^2 \varphi} \right). \quad (34)$$

$$\varepsilon_{ш} = \frac{e \cdot r \cdot \omega_d^2}{R \cdot l^2} \left[ \frac{r \cdot \sin \alpha \cdot \cos(\varphi + \gamma) + R \cdot \sin \beta \cdot \cos(\varphi + \gamma)}{\sin^2 \varphi} - \frac{2 \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin(\varphi + \gamma)}{\sin^2 \varphi} \right]. \quad (35)$$

Для определения реакции  $R_D$  достаточно рассмотреть условия равновесия сил для шатуна или груза в графической форме — замкнутость силового треугольника.

Реакцию подшипника  $O$  можно не учитывать, так как она



независимо от режима работы равна лишь весовой нагрузке (наличие двух зеркально расположенных механизмов). Наиболее таким образом реакции являются исходными для расчета подшипников импульсатора.

Стержень шатуна рассчитывается:

1. На осевую нагрузку от касательных сил инерции.
2. На нагрузки, возникающие от собственных сил инерции стержня шатуна.

Для расчета на знакопеременное сжатие находится составляющая от касательной силы инерции груза —  $P_{т1}$ , действующая вдоль оси шатуна:

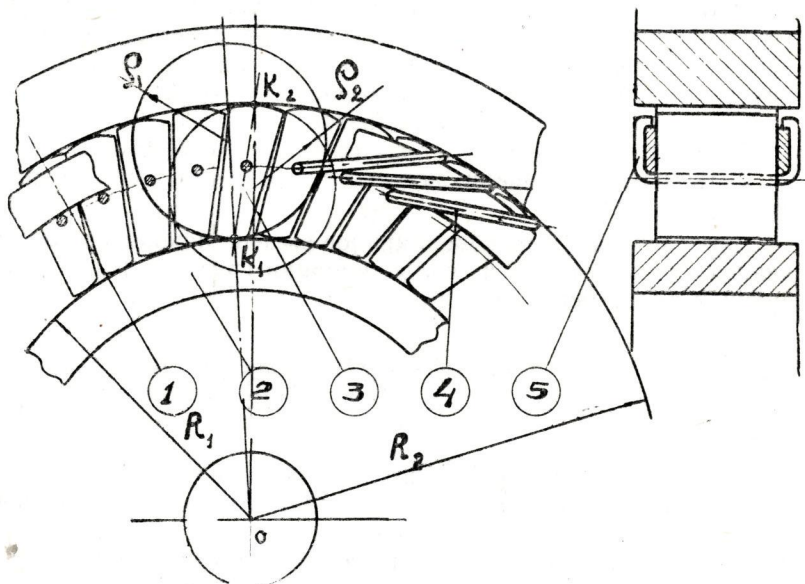
$$P_{т1} = \frac{m_r \cdot R_r \cdot \varepsilon_r \left( R_r + \frac{I_r}{m_r \cdot R_r} \right)}{R \cdot \sin \varphi} \quad (36)$$

Расчет на поперечный изгиб выполняется так же, как и для шатуна кривошипношатунного механизма двигателя внутреннего сгорания, но общий вид эпюр от инерционных сил не одинаков и, кроме этого, в рассматриваемом механизме находится положение, соответствующее максимальной поперечной нагрузке шатуна.

Кроме расчета импульсатора, особо большое внимание уделено механизму свободного хода, являющемуся одним из самых ответственных узлов трансформатора.

В существующих импульсивных передачах наибольшее распространение получили роликовые автологи, достигшие определенного конструктивного совершенства. Однако для тяжело нагруженных трансмиссий автологи продолжают оставаться самым тяжелым узлом в конструктивном решении. Все существующие автологи основаны на действии сил трения, которые развиваются между распорными элементами (ролики, эксцентрики и т. п.) и обоймами. В связи с тем, что коэффициент трения между элементами, работающими в масле, мал, на контактных поверхностях это вызывает большие нормальные силы. Высокие контактные напряжения, тяжелые условия работы (автолог может включаться и выключаться несколько сот раз и более в минуту) и относительно малые допустимые габариты создают большие трудности при конструировании надежного и долговечного механизма.

В работе исследуется конструкция пластинчатого автолога (фиг. 3), разработанная автором. Эта конструкция вытекает из стремления увеличения числа распорных элементов и радиусов кривизны их в точках контакта с обоймами.



Фиг. 3. Конструктивная схема пластинчатого автолога

Автолог такой конструкции состоит из наружной обоймы 1, внутренней обоймы 2, пластин 3, лежащих между кольцами 4, и пружин 5, индивидуально поджимающих каждую пластину к обоймам.

В результате теоретического исследования определены рациональные формы пластин с учетом сохранения устойчивого положения их и после некоторого износа контактных поверхностей и упругих деформаций элементов автолога; установлены рациональные зависимости между размерами обойм, пластин и углов трения; дан метод построения автолога в заданных габаритах.

Дан расчет напряжений, возникающих на контактных поверхностях.

Дан метод расчета пружин, поджимающих пластины к обоймам исходя из запаса потенциальной энергии в элементах автолога, возникающего в процессе заклинивания.

Исследованы возможности возникновения резонансных явлений в трансформаторе от крутильных колебаний и степень влияния их на работу автологов. В результате этого исследования дан метод расчета, исключающий возникновение резонансных колебаний автологов.

Для оценки пластинчатого и наиболее распространенного роликового автологов, на основании формулы Герца для наибольшего напряжения в середине контактной полоски, выведено следующее выражение:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma'_{\max}} \sqrt{\frac{i_n \cdot i_p (r_1 + R_2)}{i_p \cdot r_1 + R_2}}, \quad (37)$$

где  $\sigma_{\max}$  — наибольшее контактное напряжение по Герцу в роликовом автологе;  
 $\sigma'_{\max}$  — наибольшее контактное напряжение по Герцу в пластинчатом автологе;  
 $i_p$  — коэффициент, показывающий увеличение радиуса пластины в точке контакта с обоймой, в сравнении с радиусом ролика;  
 $i_n$  — коэффициент, показывающий увеличение числа пластин, в сравнении с числом роликов;  
 $r_1$  — радиус ролика;  
 $R_2$  — радиус обоймы.

Для реальных конструкций одинаковых габаритов контактные напряжения в пластинчатом автологе в 3,6÷3,7 раза меньше, чем в роликовом.

Чтобы получить такие же напряжения в роликовом автологе, нужно давление на ролики снизить в 13÷14 раз; что равносильно при заданном передаваемом моменте установке 13÷14 роликовых автологов, взамен одного пластинчатого.

После определения сил, действующих в импульсаторе, большинство деталей трансформатора легко рассчитывается общепринятыми методами.

Кроме расчетов на прочность, в главе III разработаны вопросы неравномерности вращения маховых масс и выбор коэффициентов неравномерности вращения.

Так как рассматриваемый трансформатор является импульсивным механизмом, то в основе работы его заложено колебание угловой скорости вращающихся масс. Поэтому разработаны методы определения величин моментов инерции ведущего и ведомого маховиков, обеспечивающие значения коэффициентов неравномерности вращения, не превышающие значений аналогичных величин для маховиков автомобильных и тракторных двигателей.

В этой же главе сделан анализ внутренних потерь на трение, определяющих к. п. д. трансформатора. Действительное значение к. п. д. определяется только путем лабораторных исследований, так как никакими теоретическими соображениями и расчетами нельзя учесть всех факторов, определяющих

к. п. д. действующего механизма. Ориентировочно, с большим приближением к действительности, можно оценить потери в трансформаторе в зависимости от потерь в отдельных простых механизмах, из которых он состоит.

Рассматривая конструктивную схему трансформатора (фиг. 1), можно разложить ее на следующие простые механизмы:

- а) опоры валов А, В и С, представляющие собой подшипники качения;
- б) подшипники грузов;
- в) шарниры шатунов;
- г) автолог ведомого маховика;
- д) автолог корпуса.

Так как опорные подшипники нагружены только весом деталей, потери в них можно считать пренебрежимо малыми.

Подшипники грузов и шарниров шатунов — подшипники качения, и поэтому они также весьма малозначащи.

Автологи могут быть причиной относительно больших потерь, так как для четкой работы их пластины должны быть прижаты к поверхностям обойм, относительно которых они в процессе работы перемещаются. Эти перемещения под нагрузкой вызывают потери на трение, которые зависят от силы нажатия пружин и коэффициента трения в месте контакта.

Анализ этих потерь дает основание считать, что они будут невелики, но все же могут достигать нескольких процентов от полной мощности, передаваемой трансформатором.

В рассматриваемом трансформаторе крутящего момента нет преобразований одного вида энергии в другой (как это имеет место в гидродинамическом трансформаторе и электропередачах), т. е. потери в нем не связаны с принципом трансформации. Поэтому есть все основания считать, что конструктивными мероприятиями внутренние потери на трение могут быть сведены к весьма малым величинам.

В конце главы рассмотрены варианты различных кинематических схем трансформатора и связь их с двигателем и трансмиссией, последующей за трансформатором.

Исследованы также факторы, влияющие на конструкцию трансформатора.

Установлено, что:

1. Момент, передаваемый трансформатором, прямо пропорционален квадрату оборотов ведущего вала —  $M_T = f(n_d^2)$ .

2. Мощность, протекающая через трансформатор, прямо пропорциональна кубу оборотов ведущего вала —  $N_e = f(n_d^3)$ .

3. Момент, развиваемый трансформатором, прямо пропор-

ционален пятой степени его линейных размеров, т. е. при полном геометрическом подобии  $M_T = f(\Gamma_T^5)$ .

Эти основные свойства, безусловно, положительны и дают конструктору большие возможности при проектировании. Рационально используя их, можно добиться легкой и малогабаритной конструкции трансформатора даже для весьма мощных машин с тихоходными двигателями.

Все изложенное в главе III дает возможность сделать следующие основные теоретические выводы.

1. Определенность сил, действующих в трансформаторе, дает возможность сделать уверенный расчет всех его силовых деталей на прочность.

2. Отсутствие жестких кинематических связей между ведущими и ведомыми элементами трансформатора исключает появление неконтролируемых нагрузок на силовые детали и, следовательно, напряжений в силовых деталях как самого трансформатора, так и всей трансмиссии.

3. Правильный выбор моментов инерции ведущего и ведомого маховиков должен обеспечить достаточно плавную работу трансформатора. Величина степени неравномерности ведущего и ведомого валов может быть уложена в нормы, принятые для двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и других подобных машин.

4. Разработанная конструкция автолога позволяет резко увеличить число тел заклинивания и увеличить радиусы кривизны их в местах контакта, что дает возможность в 3—4 раза уменьшить контактные напряжения в сравнении с существующими механизмами. Это обеспечивает весьма значительное увеличение грузоподъемности и долговечности автологов без увеличения их габаритов.

5. Принцип действия трансформатора обеспечивает уменьшение числа включений и выключений автологов по мере увеличения числа оборотов ведомого вала, вплоть до прекращения их работы при выходе на «прямую». Это является большим преимуществом в сравнении с рычажными импульсивными передачами, у которых число включений равно числу оборотов ведущего вала.

6. Коэффициент полезного действия трансформатора, вследствие отсутствия преобразований энергии из одного вида в другой в процессе работы, зависит лишь от его конструкции и может быть доведен до весьма высоких значений на всем диапазоне изменения крутящего момента.

7. Разработанная принципиально новая схема трансформатора крутящего момента позволяет выполнить его в различ-

ных конструктивных вариантах для автомобилей и тракторов любой мощности.

В четвертой главе изложены методы исследований, направленные на проверку основных положений теории трансформатора и основных его свойств, а также ход исследований и их результаты.

Исследования трансформатора проводились в двух направлениях:

а) исследование различных вариантов лабораторной модели;

б) исследование трансформатора, установленного в трансмиссии мощного гусеничного трактора Челябинского тракторного завода. При этом ставились следующие задачи:

а) исследование основных характеристик и свойств трансформатора под влиянием изменяющихся внешних нагрузок;

б) получение данных, необходимых для проверки основных положений и выводов теории трансформатора.

В принципе лабораторная модель полностью соответствовала схеме, изображенной на фиг. 1.

Установка для испытаний состояла из рамы, на которой был установлен сбалансированный электродвигатель типа ДК-800-Б ( $I=55$  а,  $V=110$  в,  $n=800$  об/мин), допускающий регулирование оборотов в большом диапазоне, лабораторная модель и тормозная установка типа Прони.

Так как лабораторные исследования должны были дать ответ на вопросы, поставленные рассматриваемой работой, то целью их в основном являлось:

а) исследование характеристик трансформатора под влиянием изменяющейся внешней нагрузки;

б) получение данных, необходимых для проверки положений и выводов теории трансформатора, изложенных во второй главе.

По первому пункту ставились следующие задачи:

1. Нахождение зависимости между оборотами ведомого вала и передаваемым им моментом при  $n_d = \text{const}$ .

$$M_T = f(n_M). \quad (38)$$

2. Зависимости между моментом двигателя и моментом ведомого вала трансформатора, также при  $n_d = \text{const}$ .

$$M_{кр} = f(M_T). \quad (39)$$

3. Нахождение момента трогания с места (начало вращения ведомого вала), в зависимости от изменения оборотов двигателя  $n_d$  т. е.:

$$M_{T \max} = f(n_d). \quad (40)$$

Получение этих характеристик, независимо от типа двигателя, приводящего трансформатор в движение, является необходимым и достаточным для оценки трансформатора, как основного узла бесступенчатой трансмиссии транспортной машины, определяющего ее тяговые свойства.

Кроме этого, целью лабораторных исследований являлось получение данных, характеризующих трансформатор с конструктивной точки зрения, а также зависимости между мощностью и оборотами двигателя:

$$N_e = f(n_d), \quad \text{при } i = \text{const}. \quad (41)$$

И, наконец, зависимость к. п. д. трансформатора от режима работы.

$$\eta_r = f(i). \quad (42)$$

При исследовании трансформатора, установленного в трансмиссии трактора ЧТЗ, ставились задачи выявления следующих его основных свойств в совместной работе с двигателем внутреннего сгорания.

1. Влияние на работу двигателя с всережимным регулятором.

2. Работа двигателя при перегрузках машины.

3. Автоматичность действия трансформатора.

4. Плавность хода (движения) машины.

5. Условия управления машиной:

а) работа на заданном режиме мощности;

б) выдерживание заданной скорости движения;

в) движение задним ходом;

г) осуществление поворотов.

Кроме этого, проверялись пластинчатые автологи в реальных условиях работы трактора.

Метод исследования и конструкция стенда обеспечили получение данных, необходимых для построения вышеуказанных характеристик.

В результате проведенных исследований лабораторных моделей и трактора ЧТЗ с инерционной трансмиссией получены данные по основным его характеристикам и свойствам. Сравнением этих данных с аналогичными расчетными величинами установлено:

а) практически достаточное совпадение характеристик (38), (39) и (40), построенных расчетным путем и полученных экспериментально;

б) при  $i = \text{const}$ ,  $N_e = f(n_d^3)$ , что обосновано и теоретически;

в) что зависимость характеристики трансформатора  $M_T = f(p_M)$  от величины момента инерции реактора —  $I_p$  соответствует теоретическим положениям;

г) что к. п. д. трансформатора зависит от режима его работы, но сохраняет высокое значение во всем диапазоне изменения крутящего момента.

Средние значения  $\eta_T$  в зависимости от режима работы приведены ниже.

i	0,1275	0,2000	0,2500	0,3337	0,5000	0,6007	1,000
$\eta_{гр}$	0,837	0,847	0,860	0,923	0,946	0,963	0,985

В диапазоне изменений передаточного числа, соответствующем рабочим скоростям тракторных трансмиссий, к. п. д. трансформатора меняется в пределах 0,923 до 0,953.

На режиме динамической муфты — режим прямой передачи, на которой автомобили движутся до 85% рабочего времени, к. п. д. достигает 0,985, что соответствует к. п. д. автомобильной ступенчатой коробки скоростей на прямой передаче.

Как известно, гидродинамический трансформатор также может работать на режиме муфты, но при наличии скольжения. Коэффициент полезного действия гидромуфты, соответствующий максимальной мощности (для двигателя внутреннего сгорания), достигает  $0,96 \div 0,97$ . При работе же двигателя на режиме максимального крутящего момента, вследствие падения оборотов двигателя, к. п. д. гидромуфты может снизиться до 0,9 и ниже.

Инерционный трансформатор, превращаясь в динамическую муфту, работает без скольжения и сохраняет высокий к. п. д. во всем диапазоне этого режима.

Гидротрансформатор и электропередача, вследствие низкого к. п. д., при относительно небольшом диапазоне трансформации крутящего момента ( $2 \div 3$ ), нуждаются в дополнительных механических ступенях. Инерционный трансформатор без дополнительных ступеней обеспечивает высокий к. п. д. во всем диапазоне изменения крутящего момента.

Результатами 25-часовых ходовых испытаний трактора ЧТЗ с инерционной трансмиссией установлено:

1. При движении трактора двигатель работал устойчиво, сохраняя заданные обороты и мало реагируя на изменение внешних сопротивлений. Даже при полной остановке тракто-



ра (путем торможения) двигатель почти не менял оборотов, так как работал на регуляторной характеристике.

2. Механическая инерционная бесступенчатая трансмиссия обеспечивает автоматическое изменение скорости движения в зависимости от изменения внешних сопротивлений, без вмешательства водителя.

3. На самых малых скоростях движения, граничащих с почти полной остановкой, трактор двигался плавно, без рывков.

4. Управление машиной значительно упрощается в сравнении со ступенчатой трансмиссией; исчезают частые операции, связанные с переключением скоростей.

5. Переход на задний ход не вызывал никаких затруднений. Необходимая скорость движения задним ходом осуществлялась установкой рычага акселератора в соответствующее положение.

6. Повороты трактора осуществлялись при больших радиусах поворота выключением бортовых фрикционов. Для получения малых радиусов требовалось соответствующее притормаживание. Наличие бесступенчатой трансмиссии позволяло трактору входить в крутой поворот (с резким торможением отстающей гусеницы) на любой скорости, так как необходимое снижение скорости происходит автоматически, так же, как и увеличение ее после окончания поворота.

7. Движение с заданной скоростью осуществлялось воздействием на рычаг акселератора, т. е. регулированием мощности в соответствии с заданной скоростью при переменных внешних сопротивлениях.

8. В процессе проведенных испытаний пластинчатые автологи обеспечили нормальную работу трансформатора.

Выводы по результатам исследований:

1. Конструкция лабораторной модели трансформатора и стенда для ее исследований отвечали своему назначению и обеспечили качественное выполнение всех этапов исследования.

2. Методика исследования соответствовала целям и задачам исследования. В результате проведенных исследований получены необходимые материалы для сравнения теоретических и экспериментальных данных.

3. Сравнение данных, полученных экспериментальным путем, с аналогичными данными, полученными расчетным путем, подтвердили правильность положений и выводов теории нового трансформатора крутящего момента.

4. Ходовые испытания трактора ЧТЗ с бесступенчатой инерционной трансмиссией подтвердили такие его свойства,

как: автоматичность действия, устойчивость работы, четкое реагирование на изменение внешних сопротивлений, упрощение и облегчение управления машиной в поступательном движении и на поворотах.

5. Испытания трактора ЧТЗ подтвердили то, что правильный выбор моментов инерции маховиков обеспечивает спокойную работу трансформатора и плавное движение машины.

6. Пластинчатые автологи, установленные в трансформаторе трактора ЧТЗ, обеспечили нормальную работу и подтвердили принципиальную возможность установки их в трансмиссии мощных тракторов.

7. Полученные значения к. п. д. инерционного трансформатора весьма высоки во всем диапазоне изменений крутящего момента (не ниже, чем для ступенчатых трансмиссий) и недостижимы для гидродинамических трансформаторов и электропередач существующих конструкций.

В пятой главе разработан порядок проектирования трансформатора для автомобилей и тракторов. Глава эта изложена в такой форме, что может служить основой проектирования трансформатора для конкретной машины любого назначения.

В начале главы на основе исходных данных:

а) машины, для которой проектируется трансформатор, и условия ее эксплуатации;

б) двигатель. Его тип, мощность, число оборотов, крутящие моменты и внешняя характеристика — даются рекомендации по выбору характера и расчету механических характеристик.

Затем изложены соображения по выбору кинематической схемы трансформатора и кинематической схемы трансмиссии.

На основе этого даются методы построения механической характеристики трансформатора и выбора основных его параметров ( $m$ ,  $R$ ,  $R_r$ ,  $e$ ,  $I_u$ ,  $I_m$ ,  $I_p$ ) и методы расчета на прочность и долговечность основных деталей трансформатора: шатуна, автологов, подшипников грузов и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа различных известных конструкций бесступенчатых передач разработана рациональная конструкция бесступенчатого трансформатора крутящего момента, удовлетворяющая требованиям установки на автомобили и тракторы. Разработана теория нового трансформатора и базирующийся на ней метод расчета механических характеристик и расчет его деталей на прочность.

Области применения нового трансформатора не ограничи-

ваются автомобилями и тракторами. Он может найти применение в любых отраслях машиностроения, так как в случае удовлетворения условиям установки на транспортные машины он сможет удовлетворить условиям установки на любую другую машину.

2. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований трансформатора крутящего момента, обосновано перспективное направление в решении задачи трансформации крутящего момента в трансмиссиях различных машин.

3. Полученными данными проведенных экспериментальных исследований лабораторной модели трансформатора и трактора Челябинского тракторного завода с инерционной трансмиссией подтверждена правильность разработанной теории и методов конструирования трансформаторов для конкретных условий работы.

4. Проведением рассматриваемой работы решена поставленная задача, а именно—разработаны отправные данные, позволяющие проектировать опытные конструкции трансформаторов для конкретных целей силами конструкторских бюро заводов.

5. На основе этой работы, разработаны и изготовлены конструкции бесступенчатых трансмиссий для трактора ЧТЗ и грузового автомобиля Уральского автозавода. Кроме этого, спроектирована и изготавливается бесступенчатая трансмиссия для нового трактора ЧТЗ Т-130.

6. Данные, полученные по основным свойствам трансформатора, его габаритам, весу и к. п. д., дают основание считать, что проблема инерционной бесступенчатой трансмиссии в основном решена.

Для получения промышленных образцов таких трансмиссий необходимо работать в направлении обеспечения заданной долговечности и надежности их в условиях реальной эксплуатации. Этот этап работ должен решаться совместно с промышленными предприятиями для конкретных машин.

В настоящее время такая работа ведется с Челябинским тракторным заводом в направлении создания инерционной бесступенчатой трансмиссии для нового мощного трактора ЧТЗ Т-130.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Балжи М. Ф. Автотракторный инерционный трансформатор. Сборник трудов Челябинского политехнического инсти-

тута «Расчет и конструирование машин» (дополнение к вып. 10), 1957 год.

2. Балжи М. Ф. Пластинчатый автолог (механизм свободного хода). Там же.

3. Балжи М. Ф. Лабораторные испытания инерционного трансформатора крутящего момента. Там же.

4. Балжи М. Ф., Васин Г. Г. Влияние линейных параметров импульсатора на некоторые показатели работы инерционного трансформатора момента. Известия вузов, Машиностроение, № 2, 1962 год.

5. Балжи М. Ф., Васин Г. Г. Автоматический бесступенчатый инерционный трансформатор крутящего момента. ЦИТЭИН, Москва, 1962 год (принята в печать).

---

ФБ10425. Подписано к печати 4/X-1962 г. Объем 2,25 п. л. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Тираж 150. Заказ 930.

---

Типография Челябинского политехнического института.  
Гор. Челябинск, проспект им. В. И. Ленина, 76.