

02.02

183

21

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ДАНИЛОВ Николай Павлович

УДК 621.825.5 (088.8)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ  
МИКРОХРАНОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО МЕХАНИЗМА СВОБОДНОГО ХОДА  
С МИНИМАЛЬНЫМ ХОДОМ ВКЛЮЧЕНИЯ В ТРАНСМИССИЯХ МАШИН

Специальность 05.02.02 - "Машиноведение  
и детали машин"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1986

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Н.П. Катков;

кандидат технических наук,  
доцент В.К. Салтеев.

Ведущее предприятие - Ордена Ленина завод дорож-  
ных машин имени Д.В. Колющенко.

Зщита диссертации состоится "19" октября 1988 г.,  
в 15 часов, на заседании специализированного совета К 053.13.02  
в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсо-  
моля по адресу: 454044, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ им.  
Ленинского комсомола.

Автореферат разослан "19" сентября 1988 г.

Ваше отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью,  
заверенной печатью, просим направлять по указанному адресу.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук,

доцент

• В.В. КЕСТКОВ

## СЕЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На XXVII съезде КПСС уделено значительное внимание машиностроению, отмечена необходимость создания машин и механизмов высокого уровня. В некоторых трансмиссиях машин применяются механизмы свободного хода (МСХ), что позволяет простым путем осуществить различную автоматизацию. Однако актуальной задачей является дальнейшее совершенствование МСХ, поскольку существующие механизмы часто не удовлетворяют требованиям практики. Среди различных типов МСХ известны микрохраповые, имеющие мелкий шаг зубьев ( $1\div 3$  мм) и содержащие множество тел заклинивания - пластины. Последние постоянно поджаты к храповику пружинами. Микрохраповые МСХ имеют высокую нагрузочную способность и быстродействие. Они надежно заклинивают, несмотря на износ при работе.

Такие механизмы могли бы получить широкое распространение и решить бы многие задачи различных трансмиссий. Однако этого не происходит из-за их разрушения в момент достижения угловой скорости свободного хода около 1000 об/мин и выше, последнее, как правило, часто возникает на практике. Разрушение характеризуется поломкой пружин поджатия, пластин и вызвано их вибрацией, возбуждаемой быстров движущейся зубчатой поверхностью храповика.

Отмеченный недостаток можно устранить только ликвидацией контакта пластин с храповиком в рассмотренной фазе, при этом пластины неизбежно образуют с внешним диаметром храповика некоторый зазор. Однако важным аспектом является то, что выборка зазора перед заклиниванием создает серьезную предпосылку для появления в механизме повышенного обратного хода или - хода включения. Известно, что повышенный ход включения МСХ ( $1 \div 2^{\circ}$  и выше) вызывает в большинстве трансмиссий удары больших масс, а это не допускается. Таким образом, возникает техническое противоречие: ликвидация отмеченного контакта неизбежна для расширения сферы применения перспективных микрохраповых МСХ, но в связи с этим возможно появление повышенного хода включения. Поэтому создание и применение таких МСХ, с неконтактным свободным ходом, теснейшим образом связано с решением задачи, обеспечивающей прежде всего минимальный ход включения в любых трансмиссиях (менее  $1^{\circ}$ ). Решение отмеченной задачи возможно на основе предложенных в работе микрохраповых управляемых МСХ (УММСХ), в которых пластины управляются поводковыми дисками (для размыкания и замыкания с храпови-

ком), с одновременным исследованием хода включения механизмов. Отсутствие рекомендаций по проектированию УММСХ с неконтактным свободным ходом и вместе с тем с минимальным ходом включения, направлении на расширение применения перспективных микрохраповых МСХ в различных трансмиссиях, определило необходимость проведения исследований по ним.

Работа соответствует тематике НИР Челябинского политехнического института им. Денинского комсомола, темы по МСХ включены в Координационный план НИР АН СССР по проблеме "Теория машин и систем машин" на 1986-1990 гг. Актуальность исследований по МСХ отмечена на различных научных конференциях.

Цель работы. Разработка конструкций и методов расчета микрохраповых управляемых механизмов свободного хода, позволяющих реализовать минимальный ход включения перед заклиниванием и отвод пластин от храповика в период свободного хода.

Научная новизна. Для УММСХ, защищенных А.с. № 836415 и А.с. № 1027448, разработана исходная математическая модель полного движения системы "обобщенный привод - УММСХ" для фазы включения. Найдено аналитическое решение задачи по расчету хода включения устройства управления УММСХ в виде явных зависимостей, в которые входят параметры механизма и параметры агрегатируемого с ним привода. Решена задача минимизации этого хода при различных ускорениях включения, имеющих место в разных приводах, что позволило в итоге создать в дальнейшем инженерные методы расчета УММСХ.

Практическая ценность. Разработан новый микрохраповой МСХ с управляемыми пластинами, способный без поломок работать на повышенной скорости свободного хода благодаря отсутствию контакта пластин с храповиком в этом режиме. Эксплуатационная скорость свободного хода УММСХ в 2 + 3 раза выше, чем в МСХ с обычным поджатием пластин к храповику, которые из-за этого не находят широкого применения.

Разработанные методы расчета позволяют конструктору проектировать УММСХ так, чтобы зведенное устройство управления не вызывало появления на всех режимах работы большого хода включения, приводящего к быстрому разрушению и при этом обеспечивало высокие скорости свободного хода. Методы расчета параметров на языке "Бейсик" позволяют выполнить качественные и точные расчеты на стадии поиска и проектирования. При отсутствии вычислительной техники могут быть использованы полученные аналитические формулы.

Внедрение результатов. Новый УМСХ, конструктивные рекомендации, методы инженерного расчета и математическое моделирование на ЭЦВМ процесса включения было использовано при проектировании и создании опытно-промышленного образца инерционного трансформатора (два экземпляра) в качестве бесступенчатого привода лебедки каротажного подъемника, предназначенного для исследования геологоразведочных скважин на нефть и газ. Работа выполнена для Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института геофизических исследований геологоразведочных скважин (ВНИИГиС) и использована в его опытно-промышленном производстве с ожидаемым экономическим эффектом 9,2 тыс. рублей на один подъемник ПК-2В и 3,8 тыс. рублей на подъемник ПКС-Э.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на У1 Всесоюзной научно-технической конференции по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью (г. Одесса, 1980, 1986 гг.), на III Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (г. Челябинск, 1982 г.), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Челябинского политехнического института (1980-1986 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 печатных работ и получено 13 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложения. Работа выполнена на 140 страницах машинописного текста, содержит 93 рисунка, 6 таблиц. Библиографический список включает в себя 87 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Анализ механизмов свободного хода

На первом этапе в диссертационной работе решался вопрос о выборе типа МСХ для дальнейшего совершенствования. В этой связи было предложено рассмотреть работу известных конструкций МСХ в трансмиссии с наиболее тяжелыми условиями их функционирования. Такой подход позволяет более обоснованно решить данный вопрос.

В результате предварительного анализа, за основу совершенствования был выбран МСХ микрохрапового типа. Однако, дальнейший

анализ привел к выводу о необходимости ликвидации контакта пластины с храповиком в фазе свободного хода в таких типах МСХ, что в известных устройствах отсутствует. Это позволяет расширить функциональные возможности микрохраповых механизмов и применять их в различных областях техники. Однако, в связи с отмеченным предложением, принципиально меняется характер работы УММСХ перед заклиниванием - в фазе включения.

Исследования фазы включения рассматриваемых механизмов, когда заклинивающие кромки пластин находятся по времени в начале указанной фазы, а в пространственном положении - на некотором удалении от вершин зубьев храповика, естественно не были проведены из-за отсутствия подобных устройств с множеством тел заклинивания. Поэтому для практических расчетов при проектировании нет возможности воспользоваться готовыми формулами из научно-технической литературы, и, тем более, определить их простыми выкладками, поскольку предполагаемая связь управления пластин с храповиком не может быть простой кинематической связью. В последнем случае не потребовалось бы исследования. Случайный подбор параметров приводит при ускоренном процессе включения к запаздыванию заклинивания. Однако упомянутый расчет, во избежание ударов больших масс звеньев трансмиссий при несвоевременном заклинивании, неизведен при каждом проектировании УММСХ и для конкретных случаев.

В связи с изложенным, в работе сформулированы следующие решаемые задачи:

1. Разработать функционально простые схемы и устройства УММСХ, в которых во время фазы свободного хода заклинивающие пластины отводятся на постоянное удаление от внешнего диаметра храповика и подводятся к нему в фазе хода включения.
2. Численным и аналитическим методами решить теоретическую задачу по расчету хода включения УММСХ при любых комбинациях параметров, влияющих на этот ход.
3. Исследовать зависимость хода включения от параметров и получить рекомендации по выбору их оптимальных значений.
4. Проверить полученные теоретические результаты с помощью экспериментальных исследований на лабораторной установке управляемой пластины.
5. Внедрить конструкции УММСХ в ИТВМ-Т. Выполнить комплекс натурных экспериментов.

## 2. Математические модели движения системы "обобщенный привод - УММСХ" в фазе включения

В работе изложен принцип действия новых УММСХ (рис. 1) и их достоинства. Заклинивающие пластины 1, в отличии от прототипа, не поджаты постоянно к храповику 2, поскольку соответствующие пружины устраниены.

Конструктивные схемы УММСХ

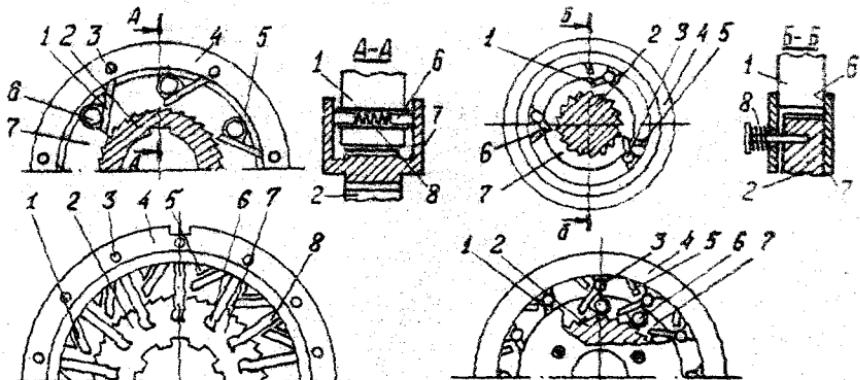


Рис. 1

При вращении храповика против часовой стрелки (фаза свободного хода) пластины 1 отводятся от первого до упоров 5 посредством сухариков 6, относительно слабо прижатых к полированным поверхностям поводковых дисков 7, закрепленных на храповике. В процессе включения пластины обратно подводятся к храповику. Упрощенные конструкции не имеют сухариков, их роль выполняют боковые поверхности пластин, к которым прижаты поводковые диски. В других конструкциях роль сухариков выполняют упругие скобы из полосовой стали. Скобы обжимают боковые поверхности храповика. В фазе свободного хода износ зацепления и вибрация пластин отсутствует, что сохраняет требуемую надежность.

Различные конструкции УММСХ объединены в физической модели фазы включения с обобщенным приводом (рис. 2). Исследуется новый элемент хода включения  $\delta_y$ , вызванный временем на управление пластинами и физически оканчивающийся при подводе пластин к внешнему диаметру храповика, поэтому последний отсутствует при моделировании.

Физическая модель фазы включения УММСХ с обобщенным приводом

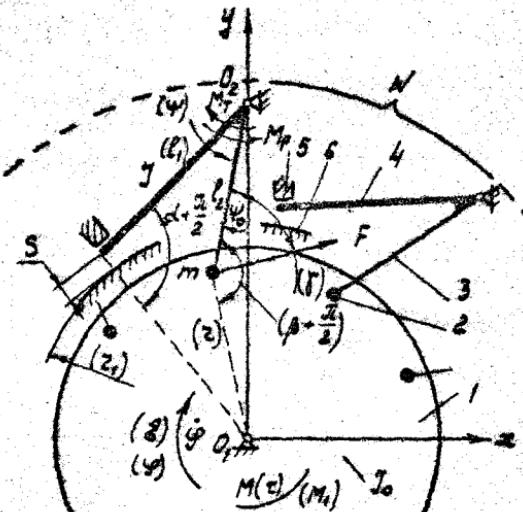


Рис. 2

**Работа модели.** В момент начала включения все пластины касаются ограничителей 5, поскольку это сохраняется после свободного хода. Включается обобщенный привод, соединенный с диском 1. Момент инерции храповика с поводковыми дисками какого-либо УММСХ и ведущих звеньев приведены к валу  $O_1$  в виде  $J_0$ . Диск начинает движение по часовой стрелке и, посредством сухариков 2 (с возможностью скольжения) сообщает угловое движение пластинам. Как только пластины касаются внешнего диаметра храповика 6, замеряется ход диска  $\varphi$  и моделирование заканчивается. В дальнейшем выбирается дискретный ход, но он мал и не исследуется.

Параметры привода:  $M(t)$  - крутящий момент по времени;  $J_0$  - указанный выше приведенный момент инерции. Параметры УММСХ:  $S$  - зазор между храповиком и пластиной;  $l_1$  и  $l_2$  - длина и наклон пластины;  $A$  - межосевое расстояние;  $\ell_2$  и  $\psi_0$  - координаты положения сухарика;  $J_1$  - момент инерции пластины;  $m$  - масса сухарика;  $F$  - сила трения управления. Обобщенными координатами модели являются  $\varphi$  и  $\psi$ , но она обладает одной степенью подвижности ввиду неголономной связи при взаимодействии диска с сухариком.

В физической модели приняты следующие допущения:

- 1) в процессе включения сила трения постоянна по модулю;

- 2) момент трения (в паре сухарик-диск) равен нулю;
- 3) сила трения  $F$  приложена к сухарику в его центре;
- 4) масса конструктивных элементов соединения сухариков с пластинами сосредоточена в центре сухариков, поэтому стержень 3 ее не имеет;
- 5) при аналитическом решении задачи угловой поворот пластины не учитывается, момент сопротивления в шарнире  $O_2$  и вес пластины считаются нулевым.

Составление математической модели, для исследования хода 4%, усложнено скольжением сухариков по диску в неизвестном направлении  $\ddot{\psi}$ , как следствие, неизвестным направлением вектора  $\vec{F}$ . Скольжение связано с изменением  $A\dot{\psi}l_2C_{D_2}$  и с инерционным отставанием пластины, особенно при значительном  $M(t)$ . Однако анализ вектора скорости центра сухарика и вектора скорости диска в контакте позволяет решить этот вопрос и составить дифференциальное уравнение движения управляемой пластины и уравнение движения диска с обобщенным приводом:

$$(J + ml_2^2)\ddot{\psi} = -F \frac{A\dot{\phi}l_2 \cos\psi + l_2^2(\dot{\psi} - \dot{\phi})}{\sqrt{A^2\dot{\phi}^2 + 2A\dot{\phi}l_2 \cos\psi \cdot (\dot{\psi} - \dot{\phi}) + l_2^2(\dot{\psi} - \dot{\phi})^2}} + M_r + M_p \quad (1)$$

$$J_0\ddot{\phi} = M(t) - FN \frac{A^2\dot{\phi} + Al_2 \cos\psi \cdot (\dot{\psi} - 2\dot{\phi}) - l_2^2(\dot{\psi} - \dot{\phi})}{\sqrt{A^2\dot{\phi}^2 + 2A\dot{\phi}l_2 \cos\psi \cdot (\dot{\psi} - \dot{\phi}) + l_2^2(\dot{\psi} - \dot{\phi})^2}}$$

С помощью полученной системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений четвертого порядка, с помощью условия  $\Delta\psi = -3/l_2 \cos\alpha$ , языка "Фортран" и метода Рунге-Кутта исследовался ход включения на ЕС-1060 в зависимости от параметров механизма и привода. Выполнено более 1000 включений, результаты анализируются в 3 главе диссертации.

Для инженерной практики представляет интерес вывод аналитической зависимости хода включения в явной форме. Однако система (1) этого не позволяет. Установлено также, что и точное аналитическое решение отсутствует. Поэтому найдено приближенное решение (для включений  $M(t) = \text{const. } M_r$ ) на основе следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_r - Fr \cos(\beta - \gamma) - J_{0\phi}\ddot{\phi} &= 0 \\ Fl_2 \sin\gamma - (J + ml_2^2)\ddot{\psi} &= 0 \\ \dot{\psi}r \cdot \dot{\phi} \cos\beta - \dot{\phi}r \sin\beta + \dot{\psi}l_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Она создана с учетом обозначений в круглых скобках (рис. 2), на основе кинетостатического равновесия звеньев и уравнения связи между обобщенными координатами  $\varphi$  и  $\psi$ .

Из анализа системы (2), с учетом  $d\psi = S/l_1 \cos \angle$ , следуют достаточно простые зависимости в явной форме

$$\Delta\varphi_g = \frac{Sl_2}{\cos \angle \cdot \cos \beta \cdot l_1 z (\tan \beta - \tan \gamma)}, \quad (3)$$

где

$$\gamma = \arctan \frac{a-1,28}{b+1,28} + \arcsin \frac{1,31}{\sqrt{(b+1,28)^2 + (a-1,28)^2}}; \quad (4)$$

$$a = \frac{Ez(J+ml_2^2)}{Fl_2^2} \sin \beta; \quad b = \frac{Ez(J+ml_2^2)}{Fl_2^2} \cos \beta,$$

$$\Delta\varphi_g = \frac{Sl_2}{l_1 z \sin \beta \cdot \cos \angle} + \frac{S(J+ml_2^2) E \operatorname{ctg} \beta}{Fl_1 l_2 \cos \angle}; \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_g = \frac{Se(J+ml_2^2)}{l_1 l_2 F \cos \angle \cdot \sin \beta}. \quad (6)$$

Зависимости (3) + (6) справедливы при  $\dot{\varphi} = \text{const} = E$ . Зависимость (3) охватывает различные варианты расчета, ее максимальная погрешность 5%, но она сложнее зависимостей (5) и (6). Последние частично дублируют первую и описывают лишь крайние варианты включений: зависимость (5) – для расчета слабодинамичных включений ( $0^\circ < \gamma < 50 + 70^\circ$ ), наоборот, зависимость (6) – для расчета крайне динамических включений ( $0.9\beta < \gamma < \beta$ ). Погрешность полученных зависимостей оценена на ЭВМ и колеблется от 0% до 6,5%.

### 3. Исследование хода включения УМСХ

Эффективность применения УМСХ в трансмиссиях прямо зависит от обоснованного выбора параметров. Динамические исследования выполнены на ЕС ЭВМ и на основе аналитических зависимостей. На ход включения оказывают влияние следующие параметры:  $J$ ;  $A$ ;  $M(E)$ ;  $S$ ;  $m$ ;  $M_T$ ;  $M_P$ ;  $\varphi_0$ ;  $\angle$ ;  $l_2$ ;  $N$ ;  $F$ ;  $J_0$ ;  $l_1$ . Показано, что часть параметров зависит из силового расчета механизма, а  $M(E)$  и  $J_0$  определяются в конкретной трансмиссии. Последние два параметра влияют на ускорение включения УМСХ, которое в отдельных случаях может достигать значения  $20000 \text{ l/c}^2$ . Рассмотрена динамика одного вклю-

чения с таким ускорением, в результате этого подтверждается отрицательное влияние повышенного хода на динамику заклинивания.

Исследования численным методом построены на общем принципе: в программе автоматически изменяются значения координат сухарика с заданным шагом так, что сухарик занимает в конструкции УМСХ все реальные положения. Другие параметры задаются перед стартом и в процессе счета не меняются. Ход включения определяется каждый раз при новом положении сухарика (рис. 3). Параллельно он подсчитывается по аналитическим зависимостям, встроенным в программу с оценкой их погрешности. В 1000 сравнениях лишь несколько раз погрешность достигала  $5 \pm 6,5\%$ .

Зависимость хода включения от сочетания координат сухарика и от включающего момента

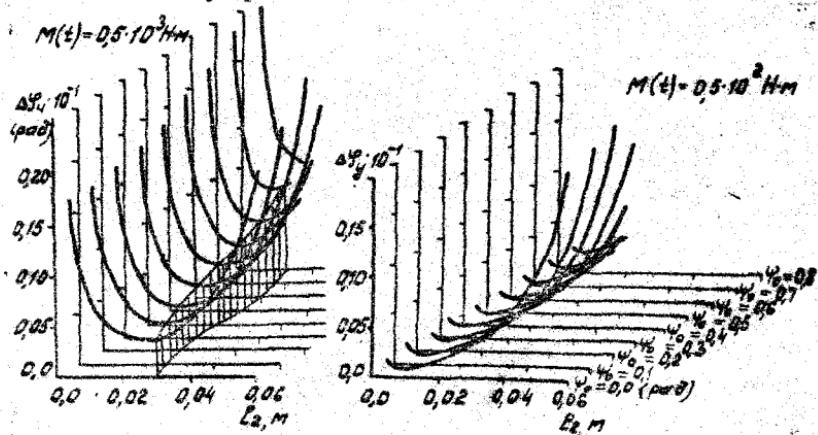


Рис. 3

Вместе с подсчетом хода включения, в программе определяется угол  $\Gamma$ , показанный на рис. 2. Построены графики  $\Gamma$  в зависимости от координат положения сухариков. Приведены кинематические характеристики храповика в процессе включения. Рассмотрено влияние на исследуемый ход других параметров УМСХ (рис. 4).

Применяется и метод исследования на основе аналитических зависимостей. При этом оказалось, что для практических целей удобно разнообразные режимы включений УМСХ в трансмиссиях классифицировать на кинематические (когда ускорением включения можно пренебречь) и динамические. Кинематические включения описываются зависимостью

$$\alpha_{xy} = \frac{S l_2}{l_1 \cos \beta \cdot \sin \beta}, \quad (7)$$

которая наглядно иллюстрирует связь  $\alpha_{xy}$  с параметрами. Динамические включения исследованы на основе зависимости удельного хода включения, полученного преобразованием зависимости (3):

$$\alpha_{xy} \cdot \frac{l_1 \cos \beta}{S l_2} = \frac{1}{\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \gamma}.$$

Влияние основных параметров механизма на ход включения

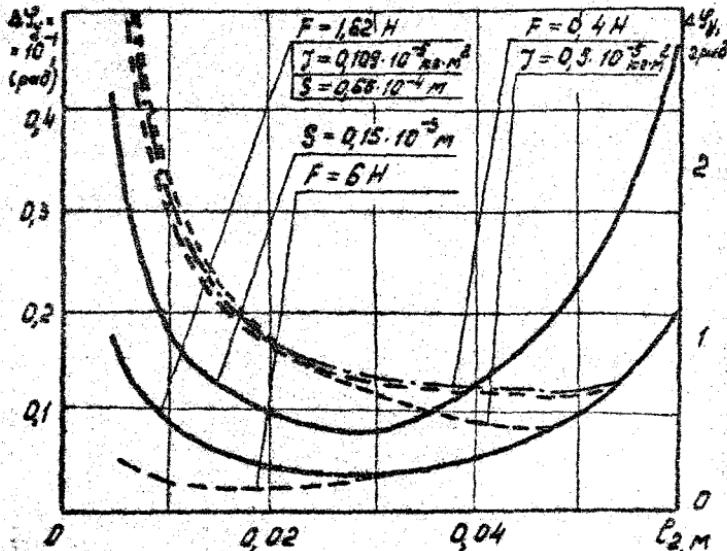


Рис. 4.

В результате установлено следующее влияние параметров и рекомендации по проектированию УМСХ для различных трансмиссий.

В любых режимах включения,  $\alpha_{xy}$  практически прямопропорционален зазору  $S$ . Это показывают непосредственно зависимости (3), (5), (6) и графики на рис. 4. Поскольку при стремлении  $S$  к нулю, ход  $\alpha_{xy}$  также стремится к нулю, то параметр  $S$  один из важных резервов в минимизации хода. В двух УМСХ ход включения будет отличаться в 10 раз, если отношение зазоров также равно 10. Установлено, что для кинематических режимов включения приемлемо проектирование зазоров  $0,5 + 2$  мм, при этом удается достаточно просто получить ход, измеряемый несколькими минутами. Важный вывод — за-

ключается в том, что чем выше динамика включения  $[J_2(J+m\ell_2^2)/F\ell_2]$ , тем жестче требования к зазору, т.к. уже неизбежны его значения в десятых долях миллиметра. В последних случаях рекомендуются конструкции УММСХ с базированием ограничителей отвода пластин на поводковых дисках в виде выполненных заодно с ними языков.

По критерию  $\Delta \varphi_y = \text{min}$ , оптимальные параметры имеют только координаты сухариков  $\varphi_0$  и  $\ell_2$  (рис. 3). Однако их конкретные значения различны в зависимости от прочих параметров. Для всех режимов оптимальным значением является угол  $\varphi_0 = 0$ . Параметр  $\ell_2$  определяется фактически в конце проектирования для конкретной трансмиссии, в которой  $M(t)$  и  $\gamma$  заданы, и он вычисляется либо с помощью прикладной программы на языке "Бейсик", либо аналитическим методом. Оптимизация координат сухариков позволяет снизить ход в 2 + 3 раза и более, в сравнении со случаем выбором. Для кинематических режимов включения характерно при проектировании простое правило: конструировать сухарики как можно ближе к шарнирам пластин. С ростом динамичности, растет  $\ell_2$   $\text{мм}$ . Однако, если для некоторых трансмиссий не обязателен жесткий минимальный ход включения, достаточно, для упрощения, проектировать сухарики на кромках пластин.

Момент инерции управляемых пластин ( $J + m\ell_2^2$ ) оказывает существенное влияние на приращение  $\Delta \varphi_y$  при динамических включениях. Поэтому здесь рекомендуется брать за основу проектирования УММСХ такие микрохраповые МСХ, в которых пластины укорочены и обладают наименее возможным моментом их инерции. Для кинематических режимов (7) последнее не существенно. Наоборот, здесь предпочтение имеют длинные пластины.

Чем сильнее поджаты сухарики к поводковым дискам, тем меньший ход включения можно получить при динамических процессах, но рассчитывать при проектировании на повышенное значение  $F$  не приходится, т.к. в фазе свободного хода сумма сил создает момент трения, снижающий КПД трансмиссии. Поэтому сила  $F$  определяется прежде исходя из допустимого момента трения. В кинематических процессах величина  $F$  не влияет на ход, поэтому здесь рекомендуется закладывать в проект такие ее значения, которые лишь преодолевают момент трения  $M_T$  в шарнирах пластин.

Зависимости (3), (5), (6) показывают на обратнопропорциональную связь хода включения с длиной пластины. Однако очевидно, что длина пластины и ее момент инерции находятся в своей взаимосвязи, поэтому рекомендации по параметру  $\ell_2$  уже отмечены выше.

#### 4. Особенности проектирования УМСХ для трансмиссий с особо ускоренным включением механизмов

В главе теоретически рассмотрено включение УМСХ в инерционном трансформаторе вращающего момента (рис. 5), как узла трансмиссии с особо тяжелой работой таких механизмов. Поскольку зависимости (3), (5), (6) показывают прямую связь хода включения с его ускорением  $\ddot{\epsilon}$ , то, при условии приемлемого показателя  $A\dot{\varphi}_y$  в трансформаторе, можно сделать вывод о реальности применения УМСХ во множестве других трансмиссий, в которых механизмы включаются медленнее, не моделируя каждый объект.

В этой связи определялось ускорение включения (рис. 6) путем анализа кинетической энергии подвижных масс трансформатора

$$T = (J_0 + 2m_p L^2) \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + m_p L \ell_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t - \varphi_0) \cdot \dot{\varphi} + m_p \ell_0^2 \omega_0^2 \dot{\varphi}^2.$$

Схема инерционного трансформатора

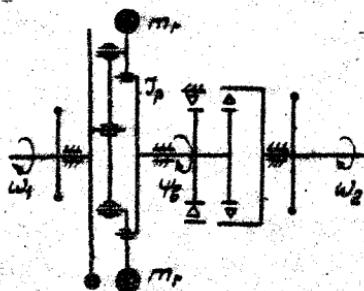


Рис. 5

Зависимость ускорения от  $i$

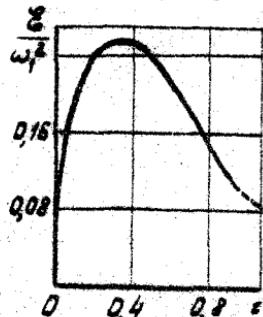


Рис. 6

Установлено, что максимальное ускорение включения достигает значения 22 тыс.  $\text{с}^{-2}$  при 2800 об/мин на ведущем валу и при  $i \approx 0.3$ .

Методика определения управляющих сил трения УМСХ основана на предварительном задании проектировщиком допустимого снижения КПД трансформатора (например, на 1 ± 2%). Исходя из этого получены расчетные формулы для определения моментов трения в корпусном и соответственно в выходном УМСХ с дальнейшим определением  $F$

$$M_{T_1} = \frac{2N_i(i_{\text{нек}})(1 - [0])}{\omega_1 i_{\text{нек}}} \cdot \frac{J_1 + m_p L_1^2}{J_1 + J_2 + 2m_p L_2^2}; \quad M_{T_2} = \frac{M_{T_1} (J_2 + m_p L_2^2)}{(J_1 + m_p L_1^2)}.$$

Получены следующие конкретные величины:  $M_{T_1} = 2.4 \text{ Нм}$ ;  $M_{T_2} = 3.7 \text{ Нм}$ ;

$F_1 = 1,62 \text{ H}$ ;  $F_2 = 2,5 \text{ H}$ . Выполнен расчет хода включения, который привел к выводу, что для подобных трансмиссий необходим неконтактный зазор, измеряемый десятыми долями миллиметра, тогда возможен ход  $0,3 \pm 0,5^\circ$ . В связи с этим разработаны УМСХ с минимальным зазором [А.с. 1027448]. Для рассматриваемого режима требуются механизмы с укороченными и малоинерционными пластинами. Для этого подходят механизмы с дифференциально-упругим устройством опор пластин на основе резинового кольцевого демпфера. Теоретически показано, что ход нагружения сокращается, как минимум, в два раза.

### 5. Экспериментальное исследование УМСХ

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке управляемой пластины, выполненной подобно рис. 2, и непосредственно на опытно-промышленном образце УМСХ в системе инерционного трансформатора. На лабораторной установке, позволяющей варьировать параметрами, подтверждены зависимости (3), (5), (6) и апробированы различные режимы включения. Построенные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с теоретическими (сплошные кривые на рис. 7 и 8). Сделан вывод об адекватности математической модели реальному процессу.

Кинематическое включение

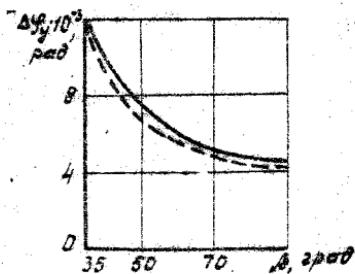


Рис. 7

Динамическое включение

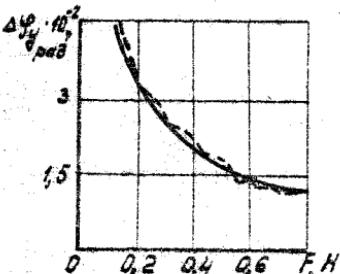


Рис. 8

На основе теоретических положений и принципов выбора параметров исследуемых механизмов спроектирована конструкция компактного трансформатора с УМСХ для бесступенчатого привода лебедки каротажного подъемника ПК-2В с двигателем автомобиля ГАЗ 5201 и для привода лебедки подъемника ПКС-Э с электродвигателем переменных оборотов. Каротажный подъемник, транспортируемый либо вертолетом, либо автомобилем, представляет мощную грузоподъемную машину, предназначенную для спуско-подъемных операций исследователь-

ских приборов в многокилометровой скважине с целью ее геофизических исследований на нефть и газ. Существующий ступенчатый привод, включающий коробку передач от автомобиля, является трудоемким в эксплуатации и не обеспечивает плавное изменение скорости подъема при исследованиях.

Для доводки конструкций инерционных передач образцов привода каротажных подъемников разработан промышленный стенд по замкнутому контуру, заменивший натурные испытания трансформатора при меньшей мощности двигателя. В процессе испытаний на стенде проводились замеры хода включения в работающем УМСХ с помощью специального сумматора таких углов включения. Несмотря на повышенное ускорение включения УМСХ в трансформаторе, удалось достигнуть приемлемый показатель хода включения на основе полученных рекомендаций по проектированию -  $0,88 \pm 0,1^{\circ}$ . Наработка УМСХ без отказа составляет 102 часа (или 9,2 млн. циклов).

Применение разработанного трансформатора с УМСХ в каротажном подъемнике обеспечивает бесступенчатое регулирование только одной рукояткой, автоматическое удерживание груза при остановках, простой пуск подъема с места, и дает автоматизацию трудоемких геологоразведочных работ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ функционирования микрохраповых механизмов свободного хода, обладающих высокой нагрузочной способностью, привел к выводу о необходимости устранения в них постоянного контакта пластин с храповиком в фазе свободного хода, которые из-за этого не находят достойного применения в скоростных трансмиссиях машин. В связи с этим разработаны новые микрохраповые управляемые МСХ на уровне изобретения, отличающиеся отсутствием отмеченного контакта. Это позволяет повысить скорость свободного хода в 2 + 3 раза и применить их в любых трансмиссиях.

2. Проектирование таких механизмов неразрывно связано с обеспечением в них минимального хода включения. В связи с этим создана математическая модель движения системы "обобщенный привод - УМСХ" для фазы включения, которая моделирует новый объект исследования. Найдено аналитическое решение задачи.

3. Теоретические исследования хода включения нового механизма численным методом и на основе аналитических зависимостей позволили установить следующее:

- Разнообразные режимы включения механизмов в трансмиссиях классифицируются на кинематические и динамические. Ход кинематического включения, когда угловым ускорением храповика можно пренебречь, зависит только от геометрических параметров механизма: зазора, длин пластин, их наклона, координат сухариков, и не зависит от величины управляющей силы трения, момента инерции пластин. Поэтому за основу проектирования можно брать микрохраповые МСХ с длинными и массивными пластинами, а силу трения рассчитывать такой, которая достаточна для преодоления сопротивления в тарнирах пластин. Для этого режима приемлемы зазоры  $0,5 \pm 2$  мм. Рекомендуется сухарики располагать в непосредственной близости к шарнирам пластин. Ход включения здесь может составлять тысячные доли радиана.

- Ход динамического включения, вызываемый повышенным включающим моментом в трансмиссии, есть сумма незначительной доли кинематического включения с весомой долей приращения, связанной с инерционным запаздыванием пластин. Здесь неизбежны зазоры в десятых долях миллиметра, требуется оптимизация координат сухариков, которая снижает ход в  $2 \div 3$  раза, рекомендованы короткие малоинерционные пластины. Есть пример хода включения порядка  $0,3^\circ$  при ускорении включения выше  $2000^\circ \text{ c}^{-2}$ , что удовл творяет практике.

4. Разработанная теория микрохрапового управляемого МСХ позволяет определить оптимальные конструктивные координаты сухариков, рассчитать управляющую силу, неконтактный зазор, учесть рекомендации при проектировании тел заклинивания и создать конструкции с учетом различных условий эксплуатации на основе инженерной методики, или лицензионной программы на языке "Бэйсик".

5. Созданы конструкции для трансмиссии с особо повышенным ускорением включения таких механизмов и испытаны в течении 102 часов. Эксперименты показали достаточную достоверность теоретической части.

6. Разработанные образцы механизмов на основе проведенных исследований использованы в двух опытно-промышленных образцах инерционного трансформатора вращающего момента в качестве бесступенчатого привода лебедки каротажного подъемника, предназначенного для исследования геологоразведочных скважин на нефть и газ, с ожидаемым экономическим эффектом 9,2 тыс. руб. на подъемник ПК-2В и 3,8 тыс. руб. на подъемник ПКС-3. Работа выполнена для Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института геофизических исследований геологоразведочных скважин (ВНИИГИС).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Данилов Н.П. Бесшумные пластинки в микрохраповых механизмах свободного хода//Инерционно-импульсные системы: Сб. науч.тр./ Челяб.полит.ин-т - Челябинск: ЧИИ, 1983. - С.73-75.
2. Данилов Н.П. Жесткий микрохраповой механизм свободного хода для инерционного трансформатора//Динамика и синтез инерционных и импульсных силовых систем: Темат.об.науч.тр. / Челяб.полит.ин-т - Челябинск: ЧИИ, 1981. - Вып. 259. -С.67-73.
3. Данилов Н.П. Исследование механизма свободного хода с дифференциально-упругим устройством//Машиноведение: Сб.науч.тр./ Челяб.полит.ин-т - Челябинск: ЧИИ, 1979. -Вып. 235. -С.76-78.
4. Данилов Н.П. Экспериментальное исследование инерционного трансформатора привода лебедки каротажного подъемника// Инерционно-импульсные механизмы, приводы и устройства: Труды II Всесоюз. науч. конф. - Челябинск: ЧИИ, 1983. - 220 с. - В надзаг.: МВ и ССО СССР. АН СССР по ТМ и СМ. Челяб.полит.ин-т. - С.40-46.
5. Данилов Н.П. Возможные пути совершенствования микрохраповых механизмов свободного хода в приводах с высокочастотным нагружением//УП - Всесоюзная научно-техническая конференция по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связи: Тезисы докл. - Одесса: ОТИШ, 1986, часть 2. - 330 с. - В надзаг.: МВ и ССО СССР. Одеск.правл. НТО машпром. Одесск. технолог. ин-т. - С.227-228.
6. Пожбелко В.И., Данилов Н.П. Анализ обобщенной модели шестеренчатых механизмов свободного хода//Машиноведение: Сб.науч.тр./Челяб.полит.ин-т - Челябинск: ЧИИ, 1979. -Вып. 235. - С.72-75.
7. А.с.571640. СССР, МКИ F 16 D 41/06. Обгонная муфта / Н.П. Данилов, Ю.В. Городской, А.Л. Сафонов (СССР).- № 2185091/27; Заявлено 28.10.75; Опубл. 05.09.77, Бол. № 33.- 3 с.:ил.
8. А.с.836415. СССР, МКИ F 16 D 41/12. Храповой механизм свободного хода/В.И. Пожбелко, Н.П. Данилов (СССР).- № 2779330/25-27; Заявлено 12.06.79; Опубл. 07.06.81, Бол. № 21.- 3 с.:ил.
9. А.с.838189. СССР, МКИ F 16 H 3/34 и F 16 D 41/12. Зубчатый механизм/В.И. Пожбелко, Н.П. Данилов (СССР).- № 2818475/25-27; Заявлено 11.09.79; Опубл. 15.06.81, Бол. № 22.- 3 с.:ил.
10. А.с.901682. СССР, МКИ F 16 D 41/00. Механизм свободного хода/В.И.Безруков, В.И. Пожбелко, Н.П. Данилов, Б.А. Лопатин, В.С. Карманов, В.С. Надеин (СССР).- № 2914288/25-27; Заявлено 15.04.80; Опубл. 30.01.82, Бол. № 4.- 3 с.:ил.

11. А.с.937356. СССР, МКИ F 16 B 33/14. Инерционный импульсный механизм/В.И. Пожбелько, Н.П. Данилов (СССР).- № 2823419/25-28; Заявлено 01.10.79; Опубл. 23.06.82. Бюл. № 23.- 3 с.:ил.

12. А.с.1013382. СССР, МКИ B 66 B 1/26. Привод подъемника/ В.И. Пожбелько, Н.П. Данилов, Ю.Г. Тарасов, И.М. Литвинов (СССР). - № 3309495/27-11; Заявлено 30.06.81; Опубл. 23.04.83, Бюл. № 15. 2 с.:ил.

13. А.с.1027448. СССР, МКИ F 16 D 41/12. Храповой механизм свободного хода/Н.П. Данилов (СССР).- № 3920313/25-27; Заявлен 15.07.81; Опубл. 07.07.83, Бюл. № 25.- 4 с.:ил.

14. А.с.1052911. СССР, МКИ G 01 M 13/02. Стенд для испытания передач/В.И. Пожбелько, Н.П. Данилов, И.М. Литвинов, В.А. Пермяков (СССР).- № 3470749/25-28; Заявлено 16.07.82; Опубл. 07.11.83, Бюл. № 41.- 3 с.:ил.

---

Подписано и печати 07.09.88. ФБ 14564. Формат 60X90 I/I6.  
Печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 44I/II24.

УОП ЧПИ. 454044. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.