

4 797  
Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Челябинский политехнический институт имени  
Ленинского комсомола

На правах рукописи

ДУБРОВСКИЙ Анатолий Федорович

ДИНАМИКА УПРУГОГО МИКРОХРАПОВОГО МЕХАНИЗМА  
СВОБОДНОГО ХОДА В ИНЕРЦИОННОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ  
ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

(Специальность 01.02.06 - "Динамика,  
прочность и надежность машин, приборов  
и аппаратуры")

Автореферат диссертации  
на соискание ученой сте-  
пени кандидата техничес-  
ких наук

Челябинск  
1976

ЧПИ

Читальный зал  
«Профессорский»

Работа выполнена на кафедре "Высшая математика № 1" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент  
Леонов А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Завьялов Г.А. (г.Челябинск),  
кандидат технических наук, доцент  
Баженов С.П. (г.Челябинск).

Ведущее предприятие - Ульяновский ордена Трудового Красного Знамени автомобильный завод имени В.И.Ленина.

Автореферат разослан " " 1976г.

Защита диссертации состоится " " 1976г., в  
15-00 часов, в ауд.244 на заседании Специализированного совета  
№ 2 по присуждению ученой степени кандидата технических наук Челябинского политехнического института им.Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Специализированного совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 454044,  
г.Челябинск-44, пр.им.В.И.Ленина, 76, политехнический институт,  
ученому секретарю.

Ученый секретарь Специализированного

совета № 2,

кандидат технических наук, доцент

26/09/80

/А.И.Варанкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В постановлениях ХХV съезда КПСС указывается, что решение главной задачи десятой пятилетки - дальнейшего подъема материального и культурного уровня жизни народа - возможно лишь на основе всемерного повышения производительности труда во всех звеньях народного хозяйства и, в частности, в машиностроении. Одним из путей, способствующих решению затронутой проблемы, является создание и внедрение в приводы и силовые передачи машин автоматических бесступенчатых трансмиссий. В этом плане интерес представляют инерционные автоматические бесступенчатые трансформаторы вращающего момента.

Долговечность инерционного трансформатора в основном определяется работоспособностью его наиболее нагруженных звеньев - механизмов свободного хода (МСХ). Поэтому вопросы создания высоконадежных механизмов свободного хода приобретают в настоящее время все большую актуальность.

Цель работы:

- теоретическое и экспериментальное исследование динамики упругого микрохрапового механизма свободного хода инерционного трансформатора с учетом зазоров в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело";
- создание методики расчета рабочих нагрузок, действующих на микрохраповой МСХ в инерционном трансформаторе;
- разработка конструктивных схем упругих микрохраповых МСХ.

Общая методика исследований. Теоретические исследования основываются на использовании уравнений Лагранжа второго рода в независимых координатах.

Для процесса включения микрохрапового МСХ инерционного трансформатора свойственно непостоянство структуры дифференциальных уравнений. При переходе с участка свободного движения упругой системы на участок совместного движения храпового колеса (реактора) и упругой системы дифференциальные уравнения меняются. Причем, характерным является то, что в обоих случаях уравнения движения динамической системы оказываются нелинейными и не интегрируются в конечном виде. Поэтому исследование начинается с отыскания, на основе метода малого параметра, решений дифференциальных уравнений на каждом из участков (глава III).

Найденные приближенные решения оцениваются с помощью вычислительных машин "Минск-22, "М-222", анализируются и, как правило, обрабатываются с привлечением аппарата теории приближения функций. В результате, интересующие нас зависимости получают относительно простой, удобный для исследований вид.

Дальнейшие исследования проводятся либо при помощи метода точечных преобразований на фазовой плоскости (глава IV), либо на основе метода припасовывания (глава V).

Достоверность основных теоретических положений работы проверяется экспериментальным путем на инерционном стенде.

Научная новизна. Разработаны и исследованы принципиально новые конструктивные схемы упругих микрохраповых механизмов свободного хода.

Создана теория упругого микрохрапового МСХ инерционного трансформатора, учитывающая зазоры в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело", которая включает:

- а) построение обобщенной схемы корпусного упругого микрохрапового МСХ инерционного трансформатора;
- б) построение обобщенной схемы трансформатора;
- в) построение обобщенной математической модели исследуемой динамической системы;
- г) решение задачи Коши для дифференциальных уравнений движения исследуемой динамической системы;
- д) разработку аналитических основ динамики корпусного МСХ с "жесткими" пластинами;
- е) разработку аналитических основ динамики корпусного МСХ с "мягкими" пластинами;
- ж) создание аналитических основ динамики корпусного МСХ с "одной степенью свободы";
- з) разработку рекомендаций по выбору параметров трансформатора, а также создание методики расчета максимальных нагрузок, действующих на механизм.

Показано, что наиболее предпочтительным, с точки зрения нагруженности, является микрохраповой МСХ "с одной степенью свободы".

Показано, что с появлением зазора в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело" нагруженность упругого микрохрапового МСХ инерционного трансформатора в общем случае не может увеличиваться более чем в 3,75 раза.

Экспериментально исследовано влияние зазора и ударной скорости на нагруженность корпусного МСХ инерционного трансформатора.

Практическая ценность. Предложены и разработаны конструктивные схемы упругих микрохраповых МСХ (например, а.с.н. 503065). Создана методика расчета рабочих нагрузок, действующих на корпусной механизм свободного хода инерционного трансформатора. Это позволяет правильно проектировать микрохраповые МСХ в инерционных трансформаторах. Общая методика построения теории и проведения экспериментальных исследований может быть распространена и на выходной МСХ.

Введение обобщенной схемы трансформатора позволило построить достаточно общую теорию: результаты исследований распространяются на большинство известных схем инерционных трансформаторов.

Реализация работы. Разработанные в диссертации конструктивные схемы упругих микрохраповых МСХ, методика их расчета с учетом зазора в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело" и рекомендации внедрены в практику расчета и проектирования

1) механизмов свободного хода инерционного трансформатора автоматической передачи автомобиля "УАЗ-469";

2) инерционного стенда, применительно к скреперной лебедке ИОЛС-2СМ.

Акты внедрения прилагаются к диссертации.

Предложенная методика расчета максимальных рабочих нагрузок, действующих на МСХ и рекомендации по его проектированию являются составной частью общей методики расчета механизмов свободного хода инерционных трансформаторов, по которой рассчитываются все создаваемые опытные образцы.

Апробация работы. Диссертационная работа одобрена на совместном заседании кафедр "Высшая математика № I", "Теория механизмов и машин", "Теоретическая механика", "Гусеничные машины", "Механическое оборудование автоматических установок", "Строительное производство" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола. Основные результаты работы докладывались на Пятой всесоюзной научно-технической конференции по вариаторам и передачам гибкой связи в 1976 году (г. Одесса), научно-техническом семинаре по ТММ при Совете по теории машин и рабочих процессов АН СССР (Челябинский филиал) в 1974 году (г. Челябинск), а также на ежегод-

иных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1974-1976 г.г.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, библиографии, приложения и включает 69 рисунков. Библиографический список содержит 122 наименования. Учитываемый текстовый материал составляет 148 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы. Даны краткая аннотация всех глав.

### ГЛАВА I. АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ СВОБОДНОГО ХОДА, ИСПОЛЬЗОВАВШИХСЯ В ИНЕРЦИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ.

Вопросам исследования динамики механизмов свободного хода в инерционных трансформаторах посвящено значительное число работ. Достаточно отметить работы, выполненные М.Ф.Балхи, В.Ф.Мальцевым, Н.К.Куликовым, А.А.Благонравовым, А.И.Леоновым, С.П.Баженовым, И.Э.Сорока, В.А.Умняшкиным, А.А.Цымбалюком, С.Ф.Хариним, В.Г.Белоглазовым, Г.В.Архангельским и другими авторами.

По принципу действия все исследуемые МСХ можно разбить на три основные класса: фрикционные, в которых передача рабочей нагрузки происходит за счет сил трения, микрохраповые, работающие по принципу зацепления и комбинированные.

Детальный анализ показывает, что большие перспективы открывает применение в инерционных трансформаторах микрохраповых МСХ. При передаче одинаковых нагрузок (при равенстве габаритов) контактные напряжения в микрохраповых МСХ как минимум на порядок меньше чем у фрикционных. Микрохраповые механизмы позволяют наиболее удачно вписать в схему трансформатора упругие элементы. На рис. I приведены две схемы микрохраповых МСХ с упругими элементами, разработанные при непосредственном участии автора. При включении механизма усилие с зубьев храпового колеса 1, через упругую пластину 2, поршень (шарнир) 3 и упругие элементы 4 передается на корпус 5. Постоянная готовность механизма к включению обеспечивается пружиной 6.

Введение упругих элементов посредством индивидуального подпружинивания каждого рабочего тела (пластин) позволяет более

равномерно распределять нагрузку между ними, делает механизм не-прихотливым к неточностям изготовления и монтажа, поскольку все погрешности компенсируются упругими элементами. Обеспечивается включение всех пластин. Допускается больший износ рабочих тел без нарушения расчетных характеристик и работоспособности механизма. Как показали исследования А.И.Леонова, введение упругих элементов в микрохраповой МСХ открывает новые резервы снижения динамической напряженности всей схемы трансформатора.

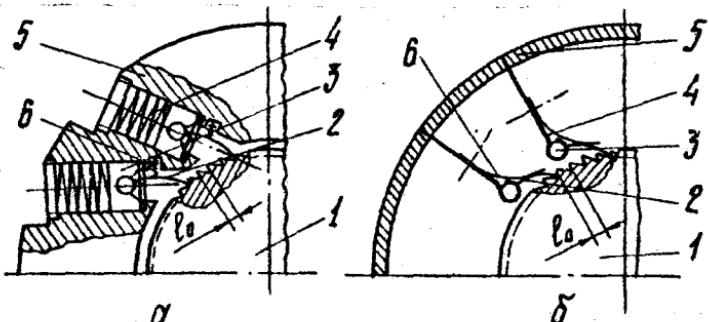


Рис. I. Схемы микрохраповых МСХ с упругими элементами

Существенным недостатком микрохраповых МСХ являются удары рабочих тел о храповое колесо в момент включения механизма. Появление ударов связано с наличием зазоров в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело", максимальная величина которых равна длине зуза  $l_0$  храпового колеса.

В результате анализа выполненных исследований по инерционным трансформаторам можно сделать вывод, что вопросы динамики упругого микрохрапового МСХ в инерционном трансформаторе с учетом зазоров до настоящего времени не рассматривались. Поэтому в диссертации ставится и решается задача создания теории упругого микрохрапового МСХ инерционного трансформатора, учитывающей зазоры в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело".

Одновременно решался весь комплекс вопросов, связанных с созданием работоспособных конструкций микрохраповых МСХ - на основе разработанной теории выделены наиболее предпочтительные схемы, получены рекомендации по проектированию механизмов свободного хода, расчетные формулы, создан инерционный стенд, на котором эксперимен-

тально исследовались опытные образцы и проверялась достоверность основных теоретических положений. На протяжении всего времени велась непрерывная работа по доводке опытных образцов микрохраповых МСХ инерционных трансформаторов.

Отмечено, что работа базируется на теоретических трудах и методах исследований П.Л.Чебышева, А.А.Андронова, И.И.Артоболевского, С.Н.Кожевникова, И.Г.Малкина, А.П.Бессонова, Д.Н.Волкова, И.И.Блехмана, В.Л.Вейца, А.И.Леонова, Г.Г.Васина, Г.Д.Есина, А.Т.Полецкого и др.

## ГЛАВА II. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В соответствии с основной задачей, решаемой в диссертации, под термином "исследуемая динамическая система" в дальнейшем будет пониматься система "импульсный механизм-корпусной МСХ инерционного трансформатора" при действии обратного импульса.

На основе анализа особенностей конструкций разработана обобщенная схема упругого микрохрапового МСХ (рис.2), которая описывает наиболее тяжелый случай, соответствующий одновременному ударному включению всех пластин. При наличии в МСХ зазора  $\ell$  (рис.2, а) храповое колесо (реактор) 1 разгоняется до некоторой скорости  $\dot{\varphi}$  и в момент непосредственного включения (рис.2, б) ударяет по невесомой пружине 2, жесткость которой равна суммарной жесткости пластин. Усилие через пружину 2, обойму 3 и упругие элементы 4 передается на корпус. Очевидно, что максимальная величина зазора  $\ell$  равна длине зуба  $l_0$  храпового колеса (рис.1).

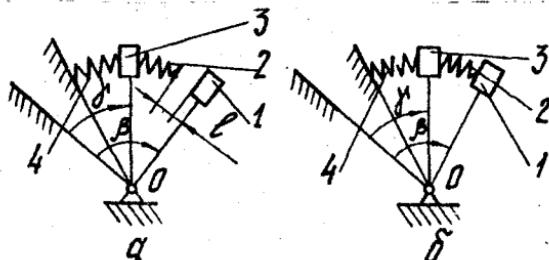


Рис.2. Обобщенная схема упругого микрохрапового МСХ

Обоснована и введена обобщенная схема трансформатора (рис.3), описывающая большинство известных конструкций. При вращении ведущего маховика I инерционные силы грузовых звеньев 2 создают на реакторе 3 знакопеременный врачающий момент. Положительный импульс момента, стремящийся повернуть реактор в сторону вращения ведущего маховика, передается через выходной МСХ (упругие элементы 7, обойму 8 и упругие элементы 9) на ведомый маховик. Отрицательный (обратный) импульс момента передается через корпусной МСХ (упругие элементы 4, обойму 5 и упругие элементы 6) на корпус II трансформатора.

Ввиду того, что в рассматриваемой модели используется обобщенная схема импульсного механизма, предложенная А.И.Леоновым, грузовые звенья показаны условно.

Процесс включения и нагружения корпусного МСХ в общем случае представляет собой чередование двух характерных участков, на которых дифференциальные уравнения движения системы не меняются. На участке свободного движения упругой системы (рис.2, а) в системе имеется зазор  $\ell$ . Непосредственное включение МСХ происходит на участке совместного движения реактора (храпового колеса) и упругой системы (рис.2, б).

Дифференциальные уравнения движения исследуемой динамической системы, которая в общем случае имеет три степени свободы, составлены с помощью уравнений Лагранжа II рода. В качестве обобщенных координат приняты углы  $\psi$ ,  $\beta$  и  $\delta$  поворота грузового звена, реактора и обоймы относительно оси трансформатора.

На обоих участках исследуемая динамическая система описывается системой автономных нелинейных дифференциальных уравнений. Например, на участке совместного движения реактора и упругой системы уравнения движения имеют вид

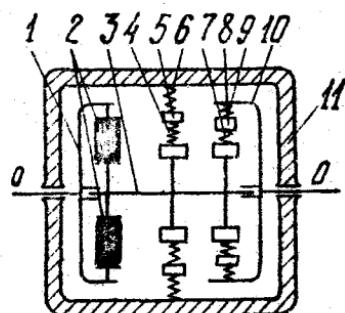


Рис.3. Обобщенная схема трансформатора

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\psi}(\beta + \beta_0 \cos \psi) + \dot{\beta}(\beta + \beta_0 \cos \psi) + \beta_0 \dot{\psi}^2 \sin \psi + \beta_0 \beta^2 \sin \psi = \beta_0 M_g; \\ \ddot{\psi}(\beta_0 + \beta_1 \cos \psi) + \dot{\beta}(\beta_0 + \beta_1 \cos \psi) + \beta_1 \dot{\psi}^2 \sin \psi + \beta_1 \beta^2 \sin \psi = M_g + U(\gamma - \beta - \theta_1); \\ J_3 \ddot{\gamma} = -U_2(\gamma - \beta - \theta_1) - U(\gamma - \theta_2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где коэффициенты  $\theta_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 11$ ),  $J_3$ ,  $M_g$ ,  $U$ ,  $U_2$  – зависят от выбора параметров трансформатора, а  $\theta_1$  и  $\theta_2$  определяются начальными условиями.

Таким образом, математической моделью исследуемой динамической системы является совокупность двух систем автономных нелинейных дифференциальных уравнений.

### ГЛАВА III. ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Приводится приближенное решение задачи Коши на каждом из участков. При этом аналитическое решение находится с помощью одного из эффективных методов теории нелинейных колебаний – метода малого параметра.

Рассмотрим участок совместного движения реактора и упругой системы. Решение дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях

$$t=0; \psi=\psi_{10}; \beta=\beta_{10}; \delta=\delta_{10}; \dot{\psi}=\dot{\psi}_{10}; \dot{\beta}=\dot{\beta}_{10}; \dot{\delta}=\dot{\delta}_{10} \quad (2)$$

будем искать в форме рядов

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \psi_0(t) + \mu \psi_1(t) + \mu^2 \psi_2(t) + \dots \\ \beta &= \beta_0(t) + \mu \beta_1(t) + \mu^2 \beta_2(t) + \dots \\ \delta &= \delta_0(t) + \mu \delta_1(t) + \mu^2 \delta_2(t) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

После непосредственного введения параметра  $\mu$ , система (1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\psi} \beta + \dot{\beta} \psi &= \mu \left[ \beta_0 M_g - (\beta_0 \dot{\psi}^2 + \beta_0 \beta^2) \sin \psi - (\beta_0 \dot{\psi} + \beta_0 \beta) \cos \psi \right]; \\ \ddot{\psi} \beta_0 + \dot{\beta} \psi_0 &= \mu \left[ M_g - (\beta_{10} \dot{\psi}_{10}^2 + \beta_{10} \beta_{10}^2) \sin \psi - (\beta_{10} \dot{\psi}_{10} + \beta_{10} \beta_{10}) \cos \psi \right] + \Phi(\gamma - \beta); \\ J_3 \ddot{\gamma} &= -\Phi(\gamma - \beta) - \Phi(\gamma), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\psi_n(\gamma - \beta - \theta_n) = \mu \psi_n(\beta_{10} - \beta_0 - \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^n \psi_n'(\beta_{10} - \beta_n) = \Phi(\gamma - \beta)$ ,  
 $U(\gamma - \theta_n) = \mu U(\beta_{10} - \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^n U_n(\beta_{10} - \theta_n) = \Phi(\gamma)$ .

Отметим, что уравнения (1) получатся из соответствующих уравнений системы (4), с учетом (3), при  $\mu=1$ .

Приравнивая в (4) коэффициенты, не содержащие параметр  $\mu$ , получим порождающую систему

$$\left. \begin{array}{l} \beta_1 \ddot{\psi} + \beta_2 \ddot{\beta} = 0; \\ \beta_3 \ddot{\psi} + \beta_4 \ddot{\beta} = 0; \\ \dot{\beta}_3 \ddot{\beta} = 0. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Поскольку определитель  $A = \beta_1 \beta_4 - \beta_2 \beta_3$  системы (5) отличен от нуля, то она разрешается относительно старших производных единственным образом и имеет при начальных условиях (3) решение

$$\psi_0 = \psi_{00} t + \psi_{10}; \quad \beta_0 = \beta_{00} t + \beta_{10}; \quad \beta_3 = \beta_{30} t + \beta_{40}.$$

Приравнивая в (4) коэффициенты при  $t^m$ , получим систему линейных дифференциальных уравнений для определения  $\psi_i, \beta_j, \beta_k$ , которые интегрируются в квадратурах. Ограничиваюсь в рядах (3) первыми двумя слагаемыми и полагая  $m=1$ , находим приближенное решение системы (1) в виде

$$\left. \begin{array}{l} \psi = \psi_0 + \psi_1; \\ \beta = \beta_0 + \beta_1; \\ \beta_3 = \beta_{30} + \beta_{40}. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Нас будет интересовать функция

$$F(t) = \beta - \beta - \theta = c_1(E_1 - D_1) \sin \lambda_1 t + c_2(E_2 - D_2) \sin \lambda_2 t + c_3(E_3 - D_3) \sin \lambda_3 t +$$

$$+ (E_4 - D_4) \sin \lambda_4 t + E_5 - D_5,$$

определенная деформацию пластин. По известной деформации, на основании формулы

$$\rho = \frac{\psi_1}{t} = \frac{\psi_1}{t} (\beta - \theta - \theta)$$

можно найти ударные нагрузки в МСХ. Здесь  $c_i / i = 1, \dots, 4$ ,  $E_1, E_2, E_3, E_4, D_1, D_2, D_3, D_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, R$  - коэффициенты, зависящие от выбора параметров трансформатора.

На участке свободного движения упругой системы решения дифференциальных уравнений движения исследуемой динамической системы находятся аналогично.

Для оценки найденных решений (6) используются цифровые вычислительные машины. Сравнение аналитических и машинных решений указывает на то, что аналитические решения описывают законы изменения углов и скоростей с достаточной для инженерных расчетов точностью.

## ГЛАВА IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОХРАПОВОГО МСХ С "ЖЕСТКИМИ" ПЛАСТИНАМИ

Анализируется один из классов механизмов свободного хода, используемых в инерционных трансформаторах - микрохраповые МСХ с "жесткими" пластинами. Для механизмов этого класса характерно то,

что жесткости  $\rho_1$  и  $\rho_2$  упругих элементов и пластин находятся в следующих соотношениях

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} > 20.$$

Исследования проводятся на основе полученных в III главе аналитических решений дифференциальных уравнений.

Процесс включения и нагружения микрохрапового МСХ с "жесткими" пластинами представляет собой чередование участков совместного движения реактора и упругой системы и свободного движения упругой системы. Функция  $r - \beta - \theta = f(t)$  на первом участке определяет деформацию пластины, а, следовательно, и ударные нагрузки на корпусной МСХ, а на втором - величину "отскока" упругой системы от реактора.

Используя аппарат теории приближения функций, удается получить достаточно простые аналитические выражения функции  $r - \beta - \theta = f(t)$  на каждом из участков. Поэтому исследование проводится на "фазовой" плоскости в координатах  $r - \beta$  и  $\dot{r} - \dot{\beta} = \frac{d}{dt}(r - \beta - \theta)$ , при помощи метода точечных преобразований. Величина  $\frac{d}{dt}(r - \beta - \theta)_{t=0} = \dot{\beta}_0 = \dot{\beta}$  представляет собой ударную скорость включения корпусного МСХ.

Согласно основной идеи метода точечных преобразований, изучение движения обобщенной модели исследуемой динамической системы сводится к исследованию преобразования некоторого отрезка полупрямой  $S_1 \equiv \beta_1 - \beta_0$  самого в себя, т.е. к построению функции соответствия  $S_1 = S_2(\beta)$  точечного преобразования

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_n \dots$$

Здесь  $T_i$  - преобразование некоторой точки  $\beta_i$  полупрямой  $S_1$  в последующую точку  $S_{i+1}$  на той же полупрямой. Таким образом, функция соответствия имеет вполне определенный физический смысл - она характеризует изменение ударной скорости от соударения к соударению.

В результате анализа "фазового портрета" динамической системы найдена неподвижная точка  $S_1$ , точечного преобразования  $T$ . Следовательно, в некоторый момент в системе устанавливаются периодические (орбитно-неустойчивые) колебания, которым на фазовой плоскости соответствует замкнутая фазовая траектория (пределный цикл). Из последнего сразу же следует вывод, что корпусной МСХ на участке действия обратного импульса подвергается воздействию максимальных ударных нагрузок неоднократно. Поэтому использование в инерционных трансформаторах микрохраповых МСХ рассмотренного класса признано неперспективным.

Дальнейшие исследования были посвящены прежде всего поиску механизмов свободного хода, у которых в период действия обратного импульса исключаются отскоки упругой системы от реактора. В результате найдено бифуркационное значение параметра  $\frac{g_2}{\rho} = \frac{4}{3}$ , на основании чего была выделена и рекомендована область оптимального выбора жесткости  $\rho$  пластины МСХ

$$3.5g < g_2 < 4.28g. \quad (7)$$

В этой области исключаются отскоки упругой системы от реактора при ударном включении и последующем нагружении корпусного МСХ. Обеспечивается наименьшая цикличность включения механизма, снижается его нагруженность. Рекомендуемая область параметров конструктивно осуществима.

Микрохраповые МСХ, параметры которых удовлетворяют неравенствам (7), называются механизмами свободного хода с "мягкими" пластинами.

## ГЛАВА У. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОХРАПОВОГО МСХ С "МЯГКИМИ" ПЛАСТИНАМИ

Исследование проводится на основе аналитических решений, полученных в Ш-й главе.

Получена формула для определения максимальных нагрузок, действующих на корпусной МСХ. Приводится аналитическая оценка точности найденной зависимости.

Исследовано влияние зазора  $\ell$  в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело" на величину ударной скорости. Построена амплитудно-частотная характеристика системы.

Получены формулы, позволяющие в зависимости от величины зазора  $\ell$  определять максимальные ударные нагрузки  $\frac{P_{xy}}{\rho}$  на МСХ. Из найденных зависимостей, как частный случай, получаются формулы для определения максимальных нагрузок  $\frac{P}{\rho}$  на МСХ при идеальном безударном включении, когда зазор  $\ell$  в системе равен нулю.

Исследовано и оценено влияние зазора  $\ell$  на нагруженность корпусного МСХ. Показано, что

$$\frac{P_{xy}}{\rho} < 3.75,$$

т.е. появление зазора  $\ell$  в системе (а, следовательно, ударов при включении механизма) может привести к увеличению нагруженности МСХ не более чем в 3,75 раза.

Создана методика расчета максимальных нагрузок, действующих на корпусной МСХ инерционного трансформатора.

Исследовано влияние различных параметров трансформатора на нагруженность корпусного МСХ. На основе этого разработаны рекомендации по проектированию механизма свободного хода. Наибольший интерес в этом отношении представляет следующий предельный переход

$$\left. \begin{array}{l} \beta_2 - \beta_1 \\ \beta_2 - \infty \end{array} \right\} \quad (8)$$

Иными словами, наиболее желательным является снижение жесткости пластин  $\beta_2$  до жесткости  $\beta$  упругих элементов, с одновременным неограниченным увеличением жесткости  $\beta$  упругих элементов.

Из соотношений (8) следует, что при соответствующем выборе параметров, МСХ практически "теряет одну ступень свободы". Следовательно, обобщенная физическая модель корпусного МСХ в данном случае уже имеет вид, показанный на рис.4.

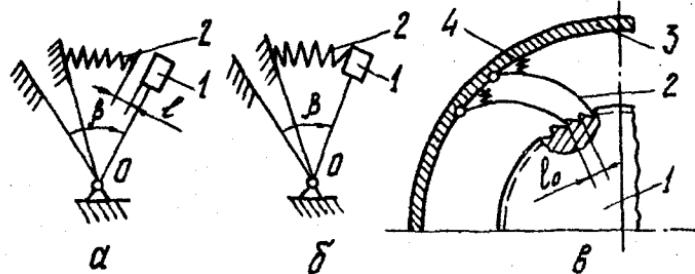


Рис.4. Упругий микрохраповой МСХ с одной степенью свободы

При наличии в системе зазора  $l$  (рис.4,а) храповое колесо I на участке действия обратного импульса разгоняется до некоторой скорости  $\beta_2$  и в момент непосредственного включения механизма (рис.4,б) ударяет по неподвижной (невесомой) пружине 2, жесткость которой равна суммарной жесткости пластин.

На рис.4,в показана схема микрохрапового МСХ "с одной степенью свободы", созданная при непосредственном участии автора. При включении механизма усилие с зубьев храпового колеса (реактора) I через упругие пластины 2 передается на корпус 3. Постоянная готовность механизма к включению обеспечивается пружиной 4.

В работе приводится также одна из схем микрохраповых МСХ "с одной степенью свободы", защищенная авторским свидетельством СССР, выданным на имя автора.

Исследованы микрохраповые МСХ "с одной степенью свободы" как частный случай механизмов свободного хода с "мягкими" пластинами. Получены формулы для определения максимальных ударных  $\beta_2$  и наибольших  $\beta_1$  (при  $\ell=0$ ) нагрузок на микрохраповой МСХ "с одной степенью свободы". Приведены аналитические оценки точности найденных зависимостей.

## ГЛАВА У1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО МИКРОХРАПОВОГО МСХ ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Программой экспериментальных исследований предусматривалось:

- 1) проверка основных теоретических положений;
- 2) проверка достоверности предложенных зависимостей для определения максимальных рабочих нагрузок на корпусной МСХ;
- 3) экспериментальное исследование влияния зазоров и ударной скорости на нагруженность корпусного МСХ инерционного трансформатора;
- 4) проверка эффективности конструктивных решений и рекомендаций по снижению нагруженности корпусного МСХ.

Для решения поставленных задач, согласно разработанной методике экспериментальных исследований, на базе скреперной лебедки ИОЛС-2СМ был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд.

Экспериментальный стенд включает последовательно соединенные асинхронный электродвигатель ( $N=15 \text{ кВт}$ ,  $n=2920 \text{ об/мин}$ ), инерционный трансформатор вращающего момента и нагружающее устройство.

В процессе исследований одновременно замерялись следующие параметры:

- 1) нагрузки на корпусной МСХ;
- 2) зазор  $\ell$  в механизме;
- 3) ударная скорость  $\beta_2$ ;
- 4) угловая скорость ведомого маховика трансформатора;
- 5) угловая скорость ведущего маховика трансформатора.

Все замеры проводились на расчетной рабочей скорости двигателя.

Полученные осциллограммы позволяют непосредственно проследить динамику процессов включения и нагружения корпусного МСХ. По результатам экспериментальных исследований построены графики зависи-

мостей максимальных ударных нагрузок  $F_d$  на МСХ от величины зазора и ударной скорости.

Сравнительный анализ данных теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1) достигнуто удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических результатов;

2) расчетные значения максимальных ударных нагрузок  $F_d$  отличаются от полученных в результате эксперимента не более чем на 15%, что вполне допустимо для инженерных расчетов;

3) подтверждена эффективность основных рекомендаций по снижению нагруженности механизмов свободного хода. При прочих равных условиях наименее нагруженной схемой является микрохраповой МСХ с "одной степенью свободы".

Следует отметить, что достоверность основных теоретических положений работы подтверждается также практикой создания опытных образцов инерционных трансформаторов, в частности: инерционного трансформатора погружочной машины ИПНБ2, трансформатора автоматической трансмиссии автомобиля "УАЗ-469" и т.д.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате анализа механизмов свободного хода выявлена перспективность применения в инерционных трансформаторах микрохраповых МСХ с упругими элементами.

2. Создана нелинейная теория упругого микрохрапового МСХ инерционного трансформатора, учитывающая зазоры в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело":

а) на основе анализа особенностей различных схем построена обобщенная физическая модель упругого микрохрапового МСХ;

б) разработана обобщенная схема инерционного трансформатора с механизмами свободного хода согласно предложенной обобщенной модели, описывающая большинство известных схем;

в) при помощи одного из наиболее распространенных методов нелинейной механики - метода малого параметра - построены аналитические решения нелинейных дифференциальных уравнений движения трансформатора; оценки аналитических решений, полученные с использованием цифровой вычислительной машины "М-222", указывают на достаточно высокую точность найденных формул;

г) исследована динамика процессов включения и нагружения микрохрапового МСХ с "жесткими" пластинами; построен фазовый портрет исследуемой динамической системы; выявлено, что при одних и тех же исходных параметрах трансформатора нагруженность механизмов свободного хода рассматриваемого класса значительно выше, чем в остальных схемах;

д) разработаны аналитические основы динамики микрохраповых МСХ с "мягкими" пластинами; показано, что при ударном включении рассматриваемых механизмов исключаются отскоки упругой системы от реактора; получены формулы для определения динамических нагрузок, действующих на МСХ и ударной скорости в зависимости от величины зазора в системе; в результате анализа амплитудно-частотной характеристики системы исследовано влияние различных параметров трансформатора, а также зазоров на нагруженность микрохраповых МСХ; на основе этого разработаны рекомендации по проектированию микрохраповых МСХ инерционных трансформаторов; отдельно исследован класс микрохраповых МСХ "с одной степенью свободы", являющихся частным случаем механизмов свободного хода с "мягкими" пластинами;

е) создана методика расчета рабочих нагрузок на МСХ с учетом зазоров в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело".

3. Наиболее эффективное направление снижения нагруженности микрохраповых МСХ инерционных трансформаторов - уменьшение жесткости пластин до величины  $\beta_2 = \frac{\beta}{\rho^2}$  с одновременным неограниченным увеличением жесткости упругих элементов, т.е. наиболее предпочтительной схемой является микрохраповой МСХ "с одной степенью свободы".

4. Разработанные рекомендации по снижению уровня динамической нагруженности механизмов свободного хода инерционного трансформатора конструктивно осуществимы: при непосредственном участии автора разработаны и экспериментально исследованы несколько опытных образцов микрохраповых МСХ "с одной степенью свободы".

5. Комплекс экспериментальных исследований, а также практика создания опытных образцов упругих микрохраповых МСХ инерционных трансформаторов подтвердили достоверность основных теоретических положений диссертации.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах автора:

I. К динамике инерционного трансформатора врачающего момента

(ИТВМ) с упругими элементами в выходном механизме свободного хода (МСХ). Сб. научн. трудов № 148 "Автомобили, тракторы и двигатели", ЧПИ, Челябинск, 1974.

2. Муфта свободного хода. Авт. свид. № 503065, "Бюллетень изобретений", И., 1976, № 6.

3. Экспериментальное исследование корпусного микрохрапового механизма свободного хода инерционного трансформатора. Тезисы докладов. Пятая Всесоюзная научно-техническая конференция по вариаторам и передачам гибкой связи. Одесса, 1976.

4. Исследование влияния зазора в кинематической паре "храповое колесо-рабочее тело" на нагруженность корпусного микрохрапового механизма свободного хода инерционного трансформатора (совместно с Леоновым А.И.). Тезисы докладов. Пятая Всесоюзная научно-техническая конференция по вариаторам и передачам гибкой связи. Одесса, 1976.

5. Экспериментальное исследование инерционного трансформатора с упругими элементами (совместно с Леоновым А.И., Пономаревым С.И., Девяткиным П.В., Мельником А.Н.). Сб. научн. трудов № 173 "Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств", ЧПИ, Челябинск, 1976.

6. К теории инерционных трансформаторов. Сб. научн. трудов № 173 "Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств", ЧПИ, Челябинск, 1976.

7. Исследование динамики корпусного механизма свободного хода инерционного трансформатора. Сб. научн. трудов № 173 "Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств", ЧПИ, Челябинск, 1976.

8. Исследование нагруженности корпусного механизма свободного хода инерционного трансформатора. Сб. научн. трудов № 173 "Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств", ЧПИ, Челябинск, 1976.