

63

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ПОНОМАРЕВ Сергей Михайлович

ДИНАМИКА ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УПРУГИМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность  
машин, приборов и аппаратуры"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск - 1981

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук.

Леонов А.И.

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

Ведущее предприятие - тракторостроительное объединение "Челябинский тракторный завод имени В.И.Ленина".

Автореферат разослан "13" февраля 1981 г.

Защита диссертации состоится 18 марта 1981 года, в 15<sup>00</sup>  
часов, на заседании специализированного совета Д 053.13.01 при  
Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола  
по адресу:

454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь  
специализированного совета



Кощеев А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



### Актуальность работы

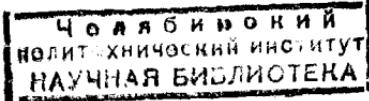
"Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года" предусматривают ускорение технического прогресса на основе использования в инженерной практике последних достижений науки и техники. Одним из наиболее перспективных путей создания новой техники является разработка и совершенствование бесступенчатых автоматических передач, применение которых вместо ступенчатого привода позволяет повысить производительность технологического оборудования за счет наиболее полного использования мощности приводного двигателя и оптимальных режимов работы технологических машин.

Механические бесступенчатые передачи, к которым относятся инерционные трансформаторы вращающего момента, имеют принципиальное преимущество перед электрическими и гидравлическими передачами, так как трансформирование механической энергии в ИТВМ происходит без промежуточного преобразования и, следовательно, осуществляется с наименьшими потерями. Всестороннее изучение проблемы инерционного трансформатора как универсального автоматического привода различных технологических машин предусматривалось координационным планом научно-исследовательских работ АН СССР на X пятилетку.

В последние годы ведутся интенсивные работы по созданию целого класса машин, инерционный привод которых работает только в области малых передаточных чисел. Однако, широкое внедрение инерционных трансформаторов в практику промышленного производства сдерживается недостаточной долговечностью механизмов свободного хода. Предварительные исследования позволили сделать предположение о том, что максимальные динамические нагрузки в МСХ имеют место при работе ИТВМ с упругими элементами на режимах трансформации момента именно в области малых передаточных чисел. Поэтому теоретическое и экспериментальное исследование этих режимов в настоящее время является весьма актуальным.

### Цель работы

Данная работа посвящена изучению динамики ИТВМ с упругими механизмами свободного хода в области малых передаточных чисел, то есть при наибольшей нагруженности его силовой цепи, с целью создания промышленных конструкций инерционного трансформатора.



### Основные задачи

1. Создание наиболее простой математической модели обобщенной схемы ИТВМ с упругими элементами, обладающей на режиме трансформации момента тремя степенями свободы.

2. Исследование стационарных режимов работы ИТВМ с упругими элементами и построение его внешней характеристики в области малых передаточных чисел.

3. Анализ нелинейных колебаний реактора на режиме заторможенного ведомого маховика с учетом статической характеристики приводного двигателя.

4. Исследование динамических нагрузок в механизмах свободного хода и разработка инженерной методики их расчета.

5. Экспериментальное исследование динамики опытного образца ИТВМ с упругими механизмами свободного хода с целью подтверждения основных результатов теоретической части работы.

### Научная новизна

Впервые поставлена и решена задача исследования динамики ИТВМ с упругими элементами в области малых передаточных чисел с учетом реальной характеристики приводного двигателя, что позволило уточнить свойства бесступенчатых инерционных передач.

Найдены рациональные обобщенные координаты импульсного механизма, в которых математическая модель инерционного трансформатора содержит наименьшее число нелинейных членов.

Разработан эффективный алгоритм построения внешней характеристики ИТВМ с упругими элементами, учитывающий особенности его динамики в области малых передаточных чисел.

Теоретически и экспериментально подтверждено, что максимальные нагрузки в упругих механизмах свободного хода имеют место на режиме трансформации момента в области малых передаточных чисел.

Разработана инженерная методика расчета динамических нагрузок в механизмах свободного хода на режиме трансформации момента.

Построена универсальная амплитудно-частотная характеристика реактора и установлены соотношения между суммарной жесткостью МСХ и угловой скоростью приводного двигателя, при которых возникают резонансные колебания реактора на режиме заторможенного ведомого маховика.

### Практическая ценность и реализация работы

1. Разработаны основы теории инерционного трансформатора ИТВМ с упругими элементами в области малых передаточных чисел.
  2. Исследованы динамические нагрузки в механизмах свободного хода и разработана инженерная методика их расчета.
  3. Предложенный алгоритм построения внешней характеристики ИТВМ с упругими элементами реализован в виде программ на языках АЛГОЛ и ФОРТРАН - ІУ, которые позволяют исследовать не только стационарные, но и переходные режимы работы инерционных передач с любым гармоническим импульсатором и различными выпрямителями во всем диапазоне передаточных чисел.
  4. Разработаны практические рекомендации по выбору суммарной жесткости механизмов свободного хода и по распределению ее между корпусным и выходным автологами, обеспечивающие отсутствие повторных включений МСХ во всей области малых передаточных чисел.
- Результаты, полученные в работе, положены в основу создания:
- промышленной партии инерционных гайковертов в Уральском объединении по производству грузовых автомобилей;
  - экспериментального стенда, на котором проведены испытания и отработка узлов инерционного привода скреперной лебедки ТОЛС -2СМ на Кыштымском машиностроительном заводе, что подтверждено соответствующими актами внедрения с ожидаемым годовым экономическим эффектом 53,3 тыс.руб.

### Апробация работы

Основные этапы выполнения и результаты диссертации докладывались автором:

1. На пятой всесоюзной научно-технической конференции по вариаторам и передачам гибкой связью, Одесса, 1976.
2. На второй всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам, Челябинск, 1977.
3. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола в 1975 – 1980 г.г.

### Публикации

Основное содержание диссертации отражено в II печатных работах автора.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 120 наименований и содержит 150 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 3 таблицы и 4 приложения.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИТВМ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Теоретической основой исследований инерционных трансформаторов являются работы по динамике и синтезу сложных систем, выполненные советскими учеными – И.И.Артоболевским, С.Н.Ложевниковым, К.В.Фроловым, А.П.Бессоновым, Д.П.Волковым, К.М.Рагульским, Л.И.Решетовым, И.И.Блехманом, В.Л.Вейцем, В.А.Светлицким, А.С.Антоновым, И.И.Быховским, И.И.Вульфсоном и другими.

В разработке общих вопросов теории ИТВМ важную роль сыграли труды М.Ф.Балжи, Н.К.Куликова, В.Ф.Мальцева, А.А.Благонравова, Г.Г.Васина, А.И.Леонова, А.Т.Полецкого, Г.А.Завьялова, Г.Д.Есина, А.П.Полякова, С.Ф.Левина, Р.Н.Бодырева, С.М.Крупицкого, С.П.Баженова, Г.В.Архангельского, А.А.Цымбалюка, В.А.Умняшкина, В.Г.Белоглазова, Ф.В.Костюкевича, Б.Л.Диковского и других авторов.

Большинство работ, выполненных с начала 60-х годов по настоящее время, посвящено исследованию жесткой схемы инерционного трансформатора, в которой пренебрегается упругостью его звеньев. В последние годы все больший интерес ученых привлекают конструкции ИТВМ с упругими элементами, имеющими определенные преимущества перед другими схемами инерционных передач.

Основными узлами инерционного трансформатора с упругими элементами, изображенного на рис.1, являются импульсный механизм и выпрямитель, состоящий из корпусного и выходного механизмов свободного хода, имеющих противоположные направления срабатывания. При построении математической модели используется обобщенная схема импульсатора (рис.2), которой описывается большинство известных конструкций импульсных механизмов. В указанной постановке инерционный трансформатор представляет собой голономную механическую систему, которая на режиме трансформации имеет три степени свободы. Две из них соответствуют импульльному механизму, а третья – ведомому маховику.

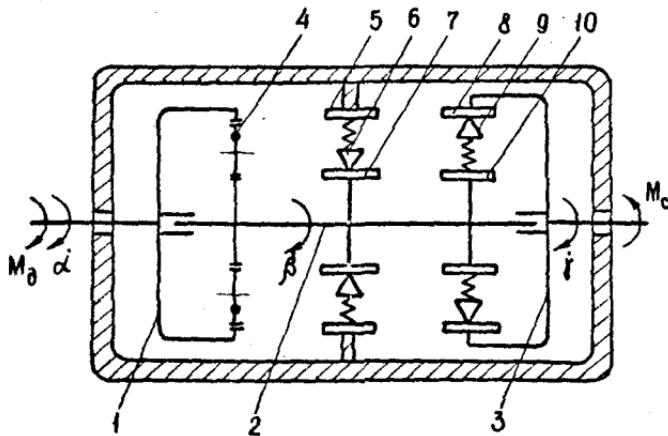


Рис. I. Обобщенная схема ИТВМ с упругими элементами:

I - ведущий маховик; 2 - реактор; 3 - ведомый маховик; 4 - грузовое звено; 5,6,7 - корпусной МСХ; 8,9,10 - выходной МСХ.

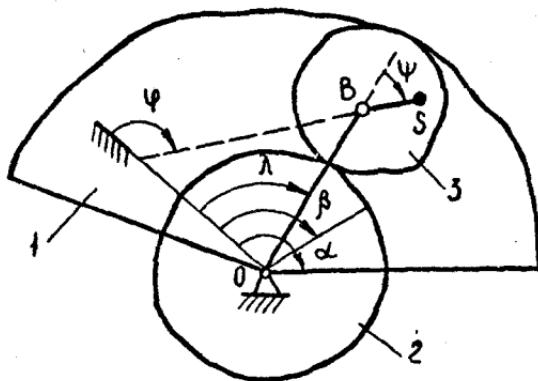


Рис. 2. Обобщенная схема импульсного механизма:

I - ведущий маховик; 2 - реактор; 3 - грузовое звено.

Математическая модель ИТВМ с упругими элементами, полученная с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода, в координатах  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\psi$  образует систему сложных нелинейных дифференциальных уравнений 6-го порядка, в которых коэффициенты при производных зависят от относительного угла  $\psi = \rho(\alpha - \beta)$  поворота грузовых звеньев:

$$\begin{aligned} A_{11}(\psi)\ddot{\alpha} + A_{12}(\psi)\ddot{\beta} - \mu \sin \psi f_1(\dot{\alpha}, \dot{\beta}) &= M_g(t, \alpha), \\ A_{21}(\psi)\ddot{\alpha} + A_{22}(\psi)\ddot{\beta} - \mu \sin \psi f_2(\dot{\alpha}, \dot{\beta}) &= m, -m_2 \\ J_3 \ddot{\psi} &= m_2 - M_c(t, \dot{\psi}), \end{aligned} \quad (I)$$

где  $f_1(\dot{\alpha}, \dot{\beta}) = \sqrt{\Delta_0} [a_0(a_0 + p)(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - \dot{\beta}^2]$ ,  
 $f_2(\dot{\alpha}, \dot{\beta}) = \sqrt{\Delta_0} [\dot{\alpha}^2 - b_0(b_0 - p)(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2]$ .

В тех случаях, когда момент двигателя  $M_g$  и момент сопротивления  $M_c$  не зависят явно от времени  $t$ , система (I) становится автономной, и при исследовании стационарных режимов работы трансформатора достаточно находить ее решение для одного цикла, в течение которого угол  $\psi$  возрастает на  $2\pi$ .

Нелинейность математической модели ИТВМ обусловлена, во-первых, изменением в течение цикла структуры трансформатора за счет включения и размыкания механизмов свободного хода. При этом возможны следующие участки работы:

- 1) оба МСХ разомкнуты;
- 2) включен только один МСХ (корпусной или выходной);
- 3) оба МСХ работают совместно.

Нелинейность этого рода для ИТВМ не устранима.

Во-вторых, нелинейность дифференциальных уравнений (I) вызвана зависимостью матрицы инерции импульсного механизма от угла  $\psi$

$$A = A_0 + \mu \cos \psi \hat{A}, \quad (2)$$

где

$$A_0 = \begin{vmatrix} J_1 + (a_0 + p)^2 \pi J_B + a_0^2 \pi m e^2 & (a_0 + p)(b_0 - p) \pi J_B + a_0 b_0 \pi m e^2 \\ (a_0 + p)(b_0 - p) \pi J_B + a_0 b_0 \pi m e^2 & J_2 + (b_0 - p)^2 \pi J_B + b_0^2 \pi m e^2 \end{vmatrix}$$

$$\hat{A} = \frac{\sqrt{\Delta_0}}{P} \begin{vmatrix} 2a_0(a_0 + p) & (a_0 + p)b_0 + (b_0 - p)a_0 \\ (a_0 + p)b_0 + (b_0 - p)a_0 & 2b_0(b_0 - p) \end{vmatrix}.$$

Построение тензора Римана-Кристоффеля позволило установить, что не существует никакого функционального преобразования коорди-

нат, при помощи которого выражение кинетической энергии гармонического импульсного механизма

$$T = \frac{1}{2} A_{11} \dot{\alpha}^2 + A_{12} \dot{\alpha} \dot{\beta} + \frac{1}{2} A_{22} \dot{\beta}^2 \quad (3)$$

могло бы быть преобразовано в квадратичную форму с постоянными коэффициентами. Отсутствие преобразования в частном случае ( $\rho = \text{const}$ ) говорит о невозможности такого преобразования в общем.

Составление дифференциальных уравнений движения ИТВМ в форме уравнений Аппеля привело к нахождению рациональных координат

$$\Psi = (A_0 + p)\alpha + (b_0 - p)\beta, \quad \lambda = A_0\alpha + b_0\beta, \quad (4)$$

в которых матрица инерции импульсного механизма имеет наиболее простой вид

$$B = B_0 + \mu \cos \Psi \hat{B}, \quad (5)$$

где

$$B_0 = \begin{vmatrix} \left(\frac{b_0}{p}\right)^2 J_1 + \left(\frac{a_0}{p}\right)^2 J_2 + \pi J_3 & \frac{b_0}{p} \left(1 - \frac{b_0}{p}\right) J_1 - \frac{a_0}{p} \left(1 + \frac{b_0}{p}\right) J_2 \\ \frac{b_0}{p} \left(1 - \frac{b_0}{p}\right) J_1 - \frac{a_0}{p} \left(1 + \frac{a_0}{p}\right) J_2 & \left(1 - \frac{b_0}{p}\right)^2 J_1 + \left(1 + \frac{a_0}{p}\right)^2 J_2 + \pi m e^2 \end{vmatrix},$$

$$\hat{B} = \sqrt{\Delta_0^*} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

В рациональных координатах дифференциальные уравнения движения гармонического импульсного механизма содержат наименьшее число нелинейных членов

$$B_{11} \ddot{\psi} + B_{12}(\psi) \ddot{\lambda} + \mu \sqrt{\Delta_0^*} \sin \psi \dot{\lambda}^2 = \frac{b_0}{p} M_g - \frac{a_0}{p} (m_1 - m_2), \quad (6)$$

$$B_{21}(\psi) \ddot{\psi} + B_{22} \ddot{\lambda} + \mu \sqrt{\Delta_0^*} \sin \psi \dot{\psi}^2 = \left(1 - \frac{b_0}{p}\right) M_g + \left(1 + \frac{a_0}{p}\right) (m_1 - m_2).$$

Безразмерный коэффициент

$$\mu = \frac{\rho m e h}{\sqrt{\Delta_0^*}} = \frac{\pi m e h}{\sqrt{\Delta_0^*}} \quad (7)$$

характеризует неуравновешенность грузовых звеньев импульсного механизма и играет роль физического малого параметра. В реальных конструкциях ИТВМ его значение не превосходит 0,1.

Рациональные координаты  $\Psi$  и  $\lambda$  оказываются полезными при проведении целого ряда промежуточных преобразований. Так, напри-

мер, они позволяют найти в общем виде приближенное выражение обратной матрицы  $A^{-1}$ , которая используется при записи дифференциальных уравнений движения ИТВМ в разрешенном относительно старших производных виде

$$A' = [1 + F_1(\psi, \mu)] A_0^{-1} - F_2(\psi, \mu) \hat{A}^{-1}. \quad (8)$$

Входящие в него функции  $F_1$  и  $F_2$  разлагаются в степенные ряды по параметру  $\mu$

$$F_1(\psi, \mu) = \mu q \cos \psi + \mu^2 (1+q^2) \cos^2 \psi + \dots,$$

$$F_2(\psi, \mu) = \mu \cos \psi + \mu^2 q \cos^2 \psi + \dots,$$

где

$$q = 2B_{12}/\sqrt{\Delta_0^*}.$$

### РАБОЧИЙ ЦИКЛ ИТВМ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

Область малых передаточных чисел на режиме трансформации ограничена передаточным числом  $i_M$ , при котором в цикле исчезает участок разгона реактора под действием инерционных сил грузовых звеньев. В этой области при возрастании момента внешнего сопротивления

$M_c$  на ведомом валу трансформатора прежде всего исчезает участок разгона реактора под действием инерционных сил грузовых звеньев, а участок совместного движения реактора и ведомого маховика разделяется на две фазы. Первой из них соответствует движение реактора под действием упругих моментов обоих механизмов свободного хода и инерционного момента грузовых звеньев. На второй фазе реактор движется при разомкнутом корпусном МСХ.

При  $i = i_t$ , исчезает участок торможения реактора под действием инерционных сил грузовых звеньев и цикл работы ИТВМ становится двухтактным. На режимах трансформации при  $i < i_t$  реактор импульсного механизма ИТВМ с упругими элементами в течение всего цикла нагружен упругим моментом хотя бы одного механизма свободного хода. Уменьшение суммарной жесткости МСХ  $U = U_1 + U_2$  вызывает расширение области малых передаточных чисел. Для реальных конструкций ИТВМ с упругими элементами  $i_M = 0,2+0,4$ , а  $i_t = 0,1+0,2$ .

На режимах трансформации момента, близких к столовому, движение ведомого маховика является прерывистым в течение цикла. Передаточное число  $i_0$ , при котором появляются остановки ведомого маховика, не превосходит по величине 0,05. Наконец, на режиме застороженного ведомого маховика реактор импульсного механизма совер-

шает нелинейные колебания, амплитуда которых определяется суммарной жесткостью МСХ. Типичные для области малых передаточных чисел графики периодических решений дифференциальных уравнений движения ИТВМ с упругими элементами показаны на рис.3.

### ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИТВМ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

Внешняя характеристика трансформатора позволяет судить о главных свойствах инерционной передачи в системе двигатель-ИТВМ-рабочий орган. Расчет внешней характеристики сводится к нахождению периодических решений системы дифференциальных уравнений (I) на временном интервале  $0 \leq t \leq T$  для различных значений момента внешнего сопротивления  $M_c$ . Известные алгоритмы построения внешней характеристики на электронно-вычислительных машинах используют четырехтактный цикл работы ИТВМ и поэтому не позволяют строить ее в области малых передаточных чисел. Возможность повторных включений МСХ на режимах трансформации момента нарушает строгую очередьность характерных участков в цикле. Учет особенностей машинного счета позволил отказаться от разбиения цикла на участки, так как на каждом шаге интегрирования легко осуществить выборку формул, по которым подсчитываются упругие моменты  $M_1$  и  $M_2$  корпусного в выходного МСХ:

$$M_k = \begin{cases} U_k \theta_k, & \forall k = 1, 2. \\ 0, & \end{cases} \quad (9)$$

Автором впервые создана универсальная АЛГОЛ-программа и ее версия на языке ФОРTRAN-IV, позволяющая строить внешнюю характеристику инерционного трансформатора с упругими МСХ и любым гармоническим импульсным механизмом, а также исследовать переходные процессы во всей области передаточных чисел. В этой программе свойства приводного двигателя задаются его статической характеристикой  $M_g = M_g(d)$ , а трение учитывается введением диссипативных членов в правые части уравнений (I). Автономность системы дифференциальных уравнений, описывающих движение ИТВМ, позволяет выбирать начальный момент времени произвольно и одновременно сокращает на единицу число параметров, подлежащих подбору, которое, как известно, равно порядку системы. Поэтому расчет каждого цикла ведется для единого диапазона изменения относительного угла поворота грузовых звеньев  $0 \leq \psi \leq 2\pi$ . В качестве подбираемых начальных параметров исполь-

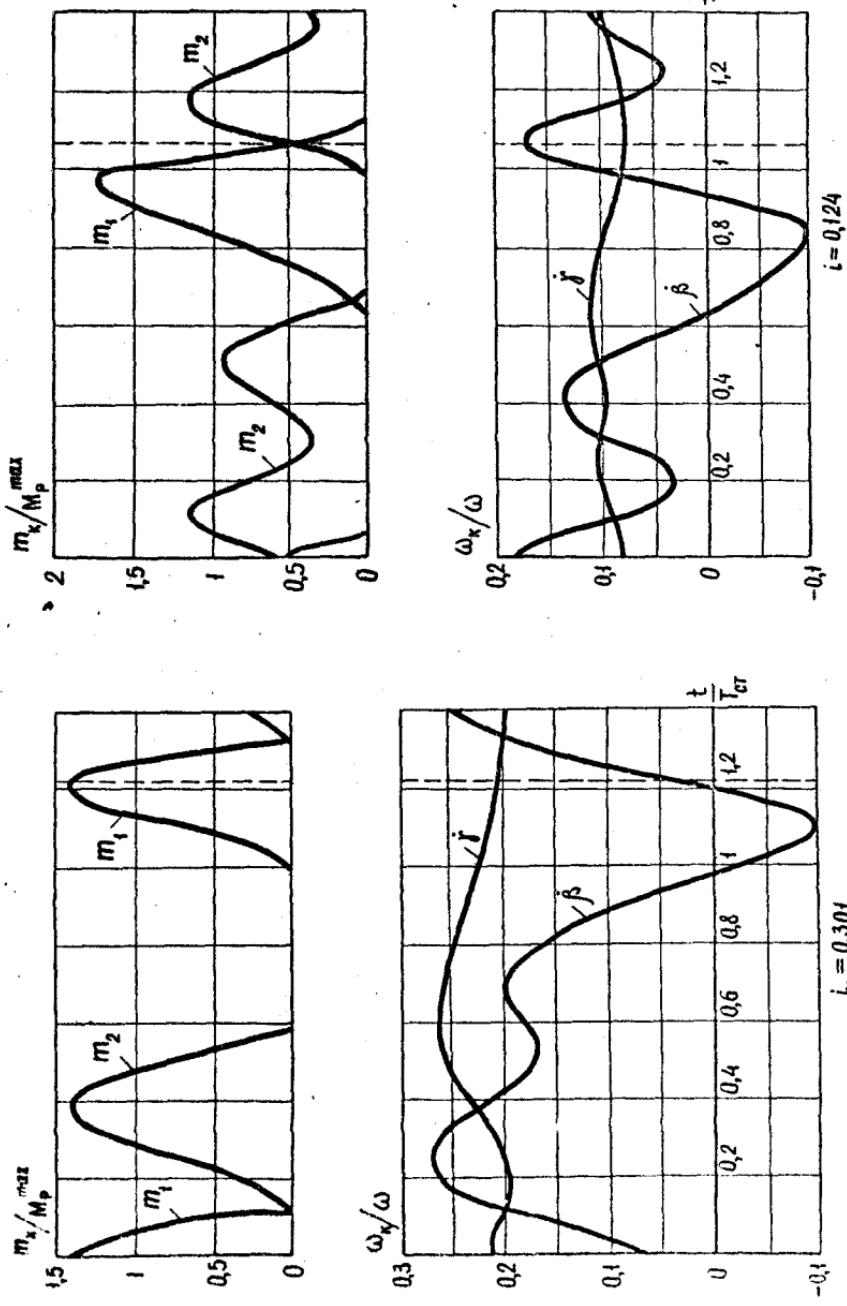


Рис. 3. Периодические решения в области малых передаточных чисел.

зуются угловые скорости  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  ведущего и ведомого маховиков и реактора, а также углы деформации  $\theta_{10}$  и  $\theta_{20}$  упругих элементов корпусного и выходного МСХ в начале цикла.

Все результаты машинного счета преобразованы к безразмерной форме с целью получения теоретических закономерностей, обладающих такой же степенью общности как и аналитические. На рис.4 представлены внешние характеристики инерционного трансформатора в безразмерных координатах  $M_c/M_p^{\max}, i$ . Из него следует, что основным параметром, определяющим внешнюю характеристику ИТВМ в области малых передаточных чисел является жесткость механизмов свободного хода. Отсутствие повторных включений МСХ в течение цикла имеет место при

$$2,2 < \chi < 3, \quad \chi = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U}{A_{22}}} \quad (10)$$

Варьирование жесткостей  $U_1$  и  $U_2$  корпусного и выходного МСХ в широких пределах при  $U = \text{const}$  практически не изменяет внешнюю характеристику трансформатора.

### НЕЛИНЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РЕАКТОРА НА РЕЖИМЕ ЗАТОРМОЖЕННОГО ВЕДОМОГО МАХОВИКА

Из общих теорем динамики следует, что средние за цикл моменты корпусного и выходного МСХ одинаковы и равны среднему моменту сопротивления  $M_c$  на выходном валу трансформатора. Поэтому углы затяжки упругих элементов механизмов свободного хода в равновесном положении реактора, которое смещено в сторону более мягкого МСХ, определяются равенствами

$$\theta_1^* = \frac{M_c}{U_1} \quad \text{и} \quad \theta_2^* = \frac{M_c}{U_2} \quad (II)$$

Если суммарная жесткость МСХ соответствует значениям  $\chi > 2,5$ , то колебания реактора близки к гармоническим с частотой  $\omega - \rho \Omega$ , пропорциональной угловой скорости холостого хода двигателя. Величины упругих моментов при  $U_1 < U_2$  изменяются в пределах

$$\Delta M \leq m_1 \leq U_1 a \tau \beta, \quad D \leq m_2 \leq U_2 a \tau \beta + \Delta M, \quad (I2)$$

$$\Delta M = M_c - U_1 a \tau \beta,$$

где  $a \tau \beta$  – амплитуда колебаний реактора.

Таким образом, на режиме заторможенного ведомого маховика

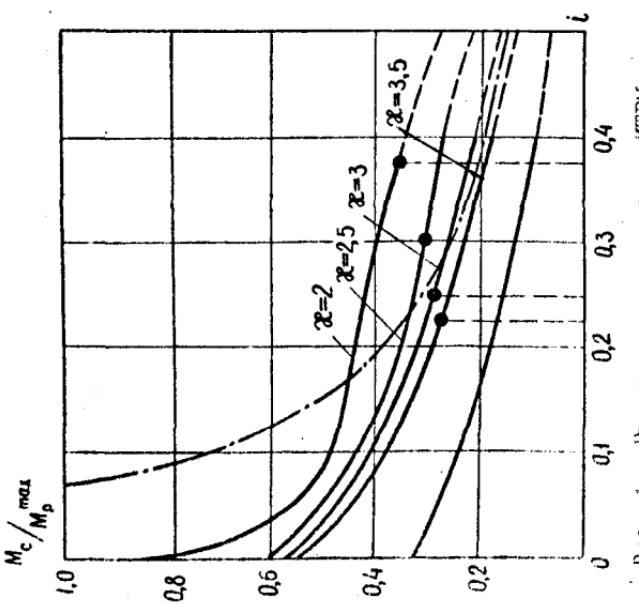


Рис. 4. Внешние характеристики ИТЗМ.  
(-●-) — граница области малых первоначальных  
чисел)

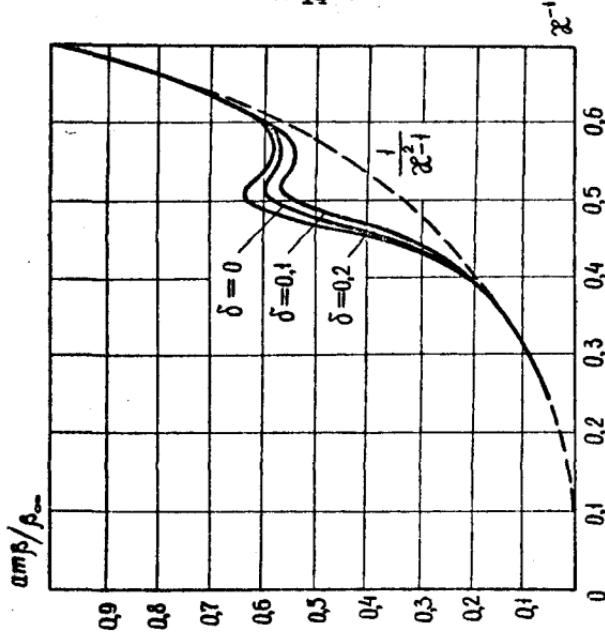


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика  
реактора.

более жесткий МСХ нагружен максимальным моментом

$$M_2^{\max} = M_1^{\max} + \Delta M, \quad (13)$$

а мягкий МСХ оказывается предварительно затянут.

При  $\alpha > 2,5$  колебания реактора существенно нелинейны, что объясняется асимметрией внешнего возмущения, которым является инерционный момент грузовых звеньев.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение ИТВМ с упругими элементами на режиме заторможенного ведомого маховика, получаются из (I) или (6), если в них положить  $f = \text{const}$ . Входящий в эти уравнения момент приводного двигателя определяется в соответствии с его статической характеристикой

$$M_g = M^0 \left(1 - \frac{\alpha}{Q}\right), \quad (14)$$

линеаризованной в точке холостого хода. Решение исходной системы при  $\mu = 0$  является порождающим решением<sup>1)</sup>

$$\alpha_0 = \frac{T}{P}, \quad \beta_0 = 0 \Rightarrow \psi_0 = \tau \quad (\tau = \omega t) \quad (15)$$

и представляет собой режим равномерного вращения, устойчивость которого доказана с помощью критерия Гурвица.

Искомое решение имеет вид

$$\alpha = \alpha_0 + \tilde{\alpha}(\mu), \quad \beta = \tilde{\beta}(\mu) \Rightarrow \psi = \psi_0 + \tilde{\psi}(\mu). \quad (16)$$

$2\pi$  - периодические добавки к режиму равномерного вращения являются решением векторно-матричного уравнения

$$\mathcal{F}(D) X = \mu F(X, \dot{X}, \ddot{X}, t), \quad (17)$$

где  $\mathcal{F}(D)$  - операторная матрица с постоянными коэффициентами;

$X = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$  - вектор-столбец неизвестных функций;

$F = \begin{pmatrix} f \sin(t + \tilde{\psi}) - \hat{A} \cdot \dot{X} \cos(t + \tilde{\psi}) \\ 0 \end{pmatrix}$  - нелинейная вектор-функция, непрерывная по всем аргументам.

Решение уравнения (17) получено методом тригонометрической аппроксимации<sup>2)</sup>

1) Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. -М.: Наука, 1971.-896 с.

2) Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. -Л.: Машиностроение, 1975. - 200 с.

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha} &= -\frac{\mu \Phi_1}{\sqrt{1+\zeta^2}} \sin(\tau + \varphi_1) - \frac{1}{2} \frac{\mu \mathcal{Z}_1}{\sqrt{4+\zeta^2}} \sin(2\tau + \varphi_2), \\ \tilde{\beta} &= \frac{\mu \Phi}{x^2-1} \sin(\tau - \varphi_3) + \frac{1}{2} \frac{\mu \mathcal{Z}_2}{x^2-4} \sin(2\tau + \varphi_4).\end{aligned}\quad (18)$$

Учет вязкого трения в уравнении (17) изменяет амплитуды гармоник угла  $\beta$ .

$$am\beta_1 = \frac{\mu \Phi_2}{\sqrt{(x^2-1)^2 + \delta^2}}, \quad am\beta_2 = \frac{1}{2} \frac{\mu \mathcal{Z}_2}{\sqrt{(x^2-4)^2 + 4\delta^2}}, \quad (19)$$

где  $\delta$  — безразмерный коэффициент сопротивления.

Анализ полученных выражений показал, что угловая скорость приводного двигателя изменяется по закону, который мало отличается от гармонического. Амплитуда этой гармоники

$$am\dot{\beta} = \frac{\mu p \Omega}{\sqrt{1+\zeta^2}} \frac{f_{10}}{A_0^\circ} \quad (20)$$

пропорциональна параметру  $\mu$  и не зависит от жесткости механизмов свободного хода. Ее величина растет с увеличением параметра  $A_0$  обобщенной схемы импульсного механизма и уменьшением безразмерного коэффициента  $\zeta$ , характеризующего наклон статической характеристики двигателя в точке холостого хода.

Приближенное аналитическое решение указывает на возникновение резонансных колебаний реактора при целочисленных значениях  $\mathcal{Z}$ . Этот факт подтвержден численным решением исходных дифференциальных уравнений и экспериментально. Разложение машинного решения в ряд Фурье показывает, что увеличение размахов угла  $\beta$  при  $\mathcal{Z} \rightarrow 2$  обусловлено ростом амплитуды второй гармоники периодического решения. Амплитудно-частотная характеристика реактора изображена на рис.5. Угол  $\beta_\infty$ , определяемый формулой

$$\beta_\infty = \frac{M_p^{max}}{\omega^2 A_{22}^\circ} = \frac{\pi p e h [1 - b_0 (\theta_0 - p)]}{p A_{22}^\circ}, \quad (21)$$

представляет собой амплитуду крутильных колебаний свободного тела с моментом инерции  $A_{22}^\circ$  под действием возмущающего момента  $M(t) = M_p \sin \omega t$ . Пунктиром изображена АЧХ линейного осциллятора в случае центробежного возбуждения. Безразмерная АЧХ носит универсальный характер и ее можно использовать при расчетах ИТВМ с любым импульсным механизмом. Этот результат объясняется тем, что величина  $\beta_\infty$  зависит от всех геометрических и массовых параметров импульсного механизма.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОК В МЕХАНИЗМАХ СВОБОДНОГО ХОДА

С помощью общих теорем динамики получены выражения средних за время работы соответствующего МСХ значений упругих моментов

$$M_{1\varphi} = (1-i) \frac{T}{t_1} M_c, \quad M_{2\varphi} = \frac{T}{t_2} M_c, \quad (22)$$

где  $t_k$  – время работы МСХ в течение цикла.

Аппроксимация упругого момента синусоидой позволила для нахождения максимальных значений моментов, возникающих в механизмах свободного хода, получить формулу

$$M_k^{max} = \frac{\pi}{2} \frac{t_k}{t_{ek}} M_{k\varphi} \quad \forall k = 1, 2, \quad (23)$$

в которой  $\frac{t_k}{t_{ek}}$  представляет собой отношение действительного и эффективного времени работы МСХ в цикле. Величина этого отношения во всем диапазоне передаточных чисел лежит в пределах 1+1,25.

Сравнение с результатами экспериментального исследования и машинного счета различных образцов ИТВМ с упругими элементами показало, что погрешность разработанной методики расчета  $M_1^{max}$  и  $M_2^{max}$  не превышает 10 + 15% в области малых передаточных чисел. С увеличением передаточного числа  $i$  точность аналитического расчета возрастает. Отсюда следует, что на этапе проектирования инерционной передачи с упругими элементами исследование нагрузок в механизмах свободного хода можно осуществлять аналитически, сохраняя при этом количественную оценку в пределах инженерной точности.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Использование уравнений Алшеля при выводе дифференциальных уравнений движения ИТВМ позволило установить, как выбор обобщенных координат импульсного механизма влияет на структуру записи этих уравнений. В ходе исследований найдены рациональные обобщенные координаты импульсного механизма, в которых математическая модель инерционного трансформатора содержит наименьшее число нелинейных членов.

2. Впервые исследована динамика инерционного трансформатора с упругими механизмами свободного хода в области малых передаточных чисел, границу которой предложено определять передаточным числом  $i_M$ , соответствующим исчезновению участка разгона реактора

под действием инерционных сил грузовых звеньев. Установлено, что в этой области происходит преобразование четырехтактного рабочего цикла в однотактный режим заторможенного ведомого маховика. Значение  $i_M$  растет о уменьшении жесткости механизмов свободного хода и для реальных конструкций ИТВМ соответствует диапазону  $0,2 + 0,4$ .

3. Предложен эффективный алгоритм построения внешней характеристики ИТВМ с упругими элементами, учитывающий особенности его динамики в области малых передаточных чисел и реальные характеристики приводного двигателя. Алгоритм реализован в виде программ на алгоритмических языках АЛГОЛ и ФОРТРАН - ІУ, которые позволяют исследовать не только стационарные, но и переходные режимы работы трансформатора. Программы могут быть использованы для изучения динамики других схем инерционных передач с любым гармоническим импульсатором во всем диапазоне передаточных чисел.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований динамики ИТВМ с упругими механизмами свободного хода установлено:

а) в области малых передаточных чисел внешняя характеристика инерционного трансформатора имеет падающий характер, то есть с уменьшением внешнего момента сопротивления на рабочем органе передаточное число  $i$  непрерывно возрастает;

б) максимальные нагрузки на механизмы свободного хода возникают при работе трансформатора именно в области малых передаточных чисел и превышают нагрузки на режиме заторможенного ведомого маховика в  $1,5 + 2$  раза. Разработана инженерная методика расчета этих нагрузок;

в) отсутствие повторных включений механизмов свободного хода в течение цикла имеет место при суммарной жесткости МСХ, соответствующей диапазону  $2,2 < \chi < 3$ .

5. При исследовании нелинейных колебаний реактора на режиме заторможенного ведомого маховика периодические решения получены методом тригонометрической аппроксимации с учетом статической характеристики приводного двигателя. Построена универсальная амплитудно-частотная характеристика реактора, которая при  $\chi > 2,5$  практически совпадает с амплитудно-частотной характеристикой линейного осциллятора с центробежным возбуждением. Показано, что при целочисленных значениях коэффициента  $\chi$  имеют место резонансные колебания реактора. Этот факт подтвержден численным решением и экспери-

ментально.

6. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что поставленные выше задачи решены.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО  
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

- I. О построении аналитического решения для инерционного трансформатора на режиме заторможенного ведомого маховика. - В кн.: Пятая Всесоюзная научно-техническая конференция по вариаторам и передачам гибкой связью. Тез.докл. Одесса, 1976, с.75.
2. Обобщенный планетарный импульсный механизм 2-го рода. - В кн.: Пятая Всесоюзная научно-техническая конференция по вариаторам и передачам гибкой связью. Тез. докл. Одесса, 1976, с.60.
3. О записи дифференциальных уравнений движения обобщенной схемы импульсного механизма. - В сб.: Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. Вып. № 173. Челябинск, 1976, с. 47 - 54.
4. С некоторых особенностях составления дифференциальных уравнений движения обобщенной схемы импульсного механизма в форме Аппеля. - В сб.: Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. Вып. № 173. Челябинск, 1976, с. 55 - 62.
5. Экспериментальные исследования инерционного трансформатора с упругими элементами (совместно с Леоновым А.И., Дубровским А.Ф., Девяткиным П.В., Мельником А.Н.). - В сб.: Динамика инерционных трансформаторов, приводов и устройств. Вып. № 173. Челябинск, 1976, с. III - II4.
6. Особенности динамики инерционного трансформатора с упругими элементами на режиме заторможенного ведомого маховика. - В кн.: Вторая Всесоюзная научная конференция по инерционно - импульсным механизмам, приводам и устройствам. Тез.докл. Челябинск, 1977, с. 53 - 54.
7. Исследование нагрузок в механизмах свободного хода с упругими элементами. - В кн.: Вторая Всесоюзная научная конференция по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Тез.докл. Челябинск, 1977, с.39.

8. Построение механической характеристики инерционного трансформатора с упругими элементами в области малых передаточных чисел. В кн.: Вторая Всесоюзная научная конференция по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Тез.докл. Челябинск, 1977, с.54.
9. Экспериментальное исследование нагрузок в механизмах свободного хода с упругими элементами (совместно с Забейворота В.И., Девяткиным П.В.). В кн.: Вторая Всесоюзная научная конференция по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Тез.докл. Челябинск, 1977, с.45.
10. Столовой режим инерционного трансформатора с упругими элементами. - В сб.: Динамика машин и агрегатов. Вып. № 219. Челябинск, 1978, с. 96 - 100.
- II. Исследование нагрузок в упругих механизмах свободного хода инерционного трансформатора. - В сб.: Динамика машин и рабочих процессов. Вып. № 243. Челябинск, 1980, с. 118 - 121.

Пономарев Сергей Михайлович

ДИНАМИКА ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УПРУГИМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность  
машин, приборов и аппаратуры"

Техн. редактор Минних А.В.

ФБ21023. Подписано к печати 3/II-81 г. Формат бумаги 60x90 I/16.  
Объем 1,25 п.л., 1 уч.-изд.л. ЧПИ. Тираж 100 экз. Заказ 30/144.