

05.02.02  
A954

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

АХМЕТГИН Нашыт Исламович

УДК 621.833

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНЫХ МЕХАНИЗМОВ  
ДЛЯ ВIBРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Специальность 05.02.02 - "Машиноведение  
и детали машин"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1983

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
ВАСИН Г.Г.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
КУЛИКОВ Н.К.;

кандидат технических наук, доцент  
ЖУЛАНOV B.H.

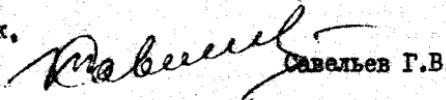
Ведущее предприятие - производственное объединение  
"Завод имени Орджоникидзе"  
(г. Челябинск).

Защита состоится "22" июня 1983 г., в 15 часов на заседании  
специализированного совета К.053.13.02 в Челябинском политехни-  
ческом институте имени Ленинского комсомола по адресу: 454044,  
г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "21" мая 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
К.053.13.02,  
кандидат технических наук,  
доцент

  
Савельев Г.В.

ГОК

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. XXVI съезд КПСС отметил в качестве одной из важнейших задач необходимость создания машин и оборудования, позволяющих улучшить условия труда и повышать его производительность. Одним из эффективных путей решения этой задачи является разработка и внедрение в производство вибрационной техники, которая обеспечивает повышение уровня механизации и автоматизации, увеличение производительности труда.

В настоящее время для создания направленных колебаний все большее распространение приобретают инерционно-импульсные механизмы (ИИМ), которые обладают рядом специфических особенностей, позволяющих успешно использовать их в различных отраслях техники. Эти особенности хорошо согласуются с требованиями, предъявляемыми к возбудителям колебаний для вибрационного резания металлов; последнее является одним из наиболее эффективных методов дробления стружки в процессе резания, поскольку обеспечивает это необходимое для металлообработки явление при резании любого материала.

Перспективность использования ИИМ в виброприводах для дробления стружки экспериментально подтверждена рядом исследований. Однако в известных научных работах вопросы применения этих механизмов раскрыты далеко не полностью: при исследовании динамики ИИМ не учитывается специфика вибрационного резания, отсутствуют рекомендации по выбору схемы ИИМ и параметров создаваемых колебаний, рассматриваются только операции обработки отверстий. Это объясняет необходимость дальнейшего изучения данных вопросов и позволяет сформулировать задачи исследований.

Актуальность вопросов исследования динамики ИИМ в технологических машинах различного назначения (в том числе в металлорежущих станках) подтверждается включением их в Координационные планы на XI пятилетку Научного совета по теории машин и систем машин АН СССР (проф. I.II.I) и Научно-координационного совета по проблеме "Инерционно-импульсные системы" при НТС Минвуза СССР (индекс 3.2).

Цель работы состоит в анализе и разработке на его основе методики рационального проектирования инерционно-импульсных механизмов для создания направленных вибраций применительно к вибрационному резанию с целью надежного дробления стружки.

При достижении поставленной цели решались следующие основные задачи.

1. Разработка динамической модели инерционно-импульсного привода в виде обобщенной схемы и ее математическое описание.
2. Исследование динамики инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания с учетом специфики данного технологического процесса.
3. Анализ влияния параметров инерционно-импульсных механизмов и процесса резания на характеристики создаваемых колебаний.
4. Разработка методики синтеза рассматриваемых механизмов, обеспечивающих надежное дробление стружки в процессе резания.
5. Экспериментальные исследования инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания с целью проверки эффективности их использования для дробления стружки, а также для оценки корректности проведенных аналитических решений.

Методика выполнения работы. При исследовании динамики инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания используются дифференциальные уравнения движения, полученные из уравнений движения обобщенной схемы инерционно-импульсного привода путем задания частных условий, характерных для конкретной схемы привода и используемого в нем ИИМ. Уравнения движения обобщенной схемы получены на основании уравнений Лагранжа второго рода. Решение уравнений движения проводится путем их линеаризации на основании допущений, приемлемых для приводов вибрационного резания; корректность допущений обосновывается числовыми примерами. Проверка корректности аналитических решений осуществлена сравнением этих решений с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна. При выполнении работы автором получены следующие новые научные результаты.

1. Предложены кинематические схемы инерционно-импульсных приводов для вибрационного резания, новизна которых защищена авторскими свидетельствами.
2. Разработана обобщенная схема инерционно-импульсного привода, по отношению к которой все исследуемые объекты являются частными случаями.
3. Получены аналитические решения уравнений движения инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания с учетом специфики данного технологического процесса.
4. Установлено влияние параметров инерционно-импульсных механизмов и режимов резания на характеристики создаваемых колебаний.
5. Разработана методика синтеза инерционно-импульсных ме-

низмов, обеспечивающих надежное дробление стружки в процессе резания.

Практическая ценность. Разработана конструкция инерционно-импульсного привода резца для создания осевых вибраций с регулируемой амплитудой, данный привод может использоваться на различных типах универсальных токарных станков; экспериментально доказана эффективность применения данного привода для дробления стружки при обработке различных материалов. Разработана методика конкретного определения параметров инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания для различных материалов и режимов резания, обеспечивающих надежное дробление стружки на операциях с продольной и поперечной подачами.

Реализация результатов. Работоспособность опытных образцов инерционно-импульсных приводов инструмента и обрабатываемой детали подтверждена испытаниями в лабораторных и промышленных условиях (п/о "Ижмаш", г. Ижевск; Челябинский механический завод). На ведущем предприятии внедрен опытно-промышленный образец инерционно-импульсного привода резца для дробления стружки на операции с поперечной подачей. Привод обеспечивает надежное дробление стружки, что способствует существенному повышению производительности труда, в частности за счет возможности применения промышленных роботов. Годовой экономический эффект от внедрения составил 183 тыс. рублей (акт внедрения приведен в приложении к диссертации).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы до-кладывались и обсуждались:

- на У Всесоюзной научной конференции по вариаторам и передачам гибкой связью (Одесса, 1976 г.);
- на филиале семинара по ТММ при АН СССР (Фрунзе, 1974 г.);
- на II Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (Челябинск, 1977 г.);
- на I научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Челябинского политехнического института (Челябинск, 1977 г.);
- на VI Всесоюзной научно-технической конференции по управляемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью (Одесса, 1980 г.);
- на III Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам (Челябинск, 1982 г.);

- на Челябинском филиале семинара по ТММ при АН СССР (1977, 1982 г.г.);
- на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1975-1981 г.г.).

Публикация результатов. По теме диссертации автором опубликовано 16 работ, в том числе 2 авторских свидетельства и положительное решение ВНИИППЭ по заявке на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы и приложений. Она содержит 132 страницы основного машинописного текста, 29 страниц рисунков, 1 таблицу; в списке литературы представлено 133 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации.

В первом разделе дана оценка состояния вопроса и приведены объекты исследования. Отмечено, что наличие сливной стружки при обработке металлов резанием является отрицательным фактором данного технологического процесса; на основании краткого обзора мероприятий по дроблению стружки выделено вибрационное резание, как одно из наиболее универсальных. Предложена классификация способов вибрационного резания по двум признакам: виду вибраций (т.е. по частоте и направлению колебаний) и виброприводам. Среди механических вибраторов предпочтение отдано вибраторам с динамическими связями, обеспечивающим благоприятные условия работы режущего инструмента. Отмечено, что к данному типу вибраторов относятся ИИМ.

Дан краткий обзор областей применения ИИМ. Показано, что их свойства в большой степени отвечают требованиям, предъявляемым к возбудителям колебаний для вибрационного резания. Приведены примеры применения ИИМ для данного технологического процесса и показано, что в известных работах не освещен ряд вопросов: исследование динамики ИИМ проводится без учета специфики вибрационного резания, рассматривается только одна схема ИИМ, нет обоснований по выбору параметров колебательного движения, не рассматриваются вопросы применения ИИМ для вибрационной обработки наружных поверхностей. Это обосновывает необходимость дальнейшего изучения данного во-

проса и позволяет сформулировать задачи исследований. На основании анализа кинематики процесса вибрационного резания (приведенного в приложении) с линейными и угловыми вибрациями предложены радио-нальные структурные схемы виброприводов (рис. I), в состав которых входят ИИМ. Отмечено, что в двухпоточном приводе патрона (рис. Ia) и приводах инструмента (рис. Ib, г, д) могут использоваться различные схемы ИИМ с двумя степенями свободы, а в однопоточном приводе патрона (рис. Ib) - ИИМ с одной степенью свободы, полученные на основе однорядной планетарной передачи.

В конце раздела сформулированы цель и основные задачи исследования.

Во втором разделе предложена обобщенная схема инерционно-импульсного привода (рис. 2), по отношению к которой все рассматриваемые виброприводы (рис. I) с различными схемами ИИМ являются частными случаями. Вследствие этого уравнения движения обобщенной схемы справедливы и для частных схем.

На основании уравнений Лагранжа второго рода получены уравнения движения обобщенной схемы в обобщенных координатах  $\alpha$ ,  $\beta$ ,

$\psi$  и  $\varphi$ , которые имеют следующий вид:

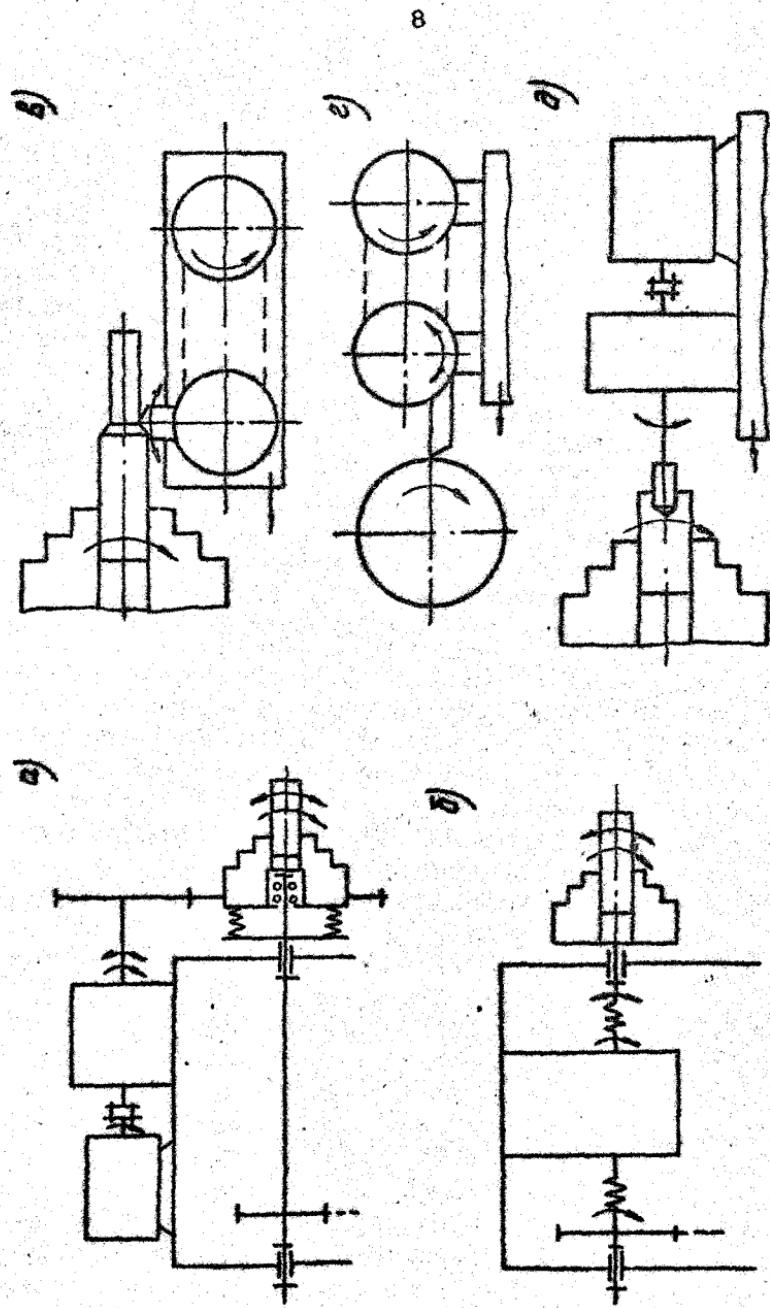
$$\left. \begin{aligned} J_{\alpha} \ddot{\alpha} &= M_{\alpha} - \tilde{C}_{\alpha\theta}(\alpha - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) - \tilde{C}_{\alpha\psi}(\alpha - \psi) - \tilde{C}_{\alpha\varphi}(\alpha - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi); \\ J_{\beta} \ddot{\beta} &= M_{\beta} - \tilde{C}_{\beta\theta}(\beta - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) - \tilde{C}_{\beta\psi}(\beta - \psi) - \tilde{C}_{\beta\varphi}(\beta - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi); \\ (A_{11} + 2B \cos \varphi) \ddot{\psi} + (A_{12} + B \cos \varphi) \ddot{\varphi} - 2B \sin \varphi \dot{\psi} \dot{\varphi} - B \sin \varphi \dot{\varphi}^2 &= \\ = M_{\theta} + M_{\gamma} + M_{\varphi} + \tilde{C}_{\theta\theta}(\alpha - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) + \tilde{C}_{\theta\psi}(\alpha - \psi) + \tilde{C}_{\theta\varphi}(\alpha - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) + & \\ + \tilde{C}_{\rho\theta}(\beta - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) + \tilde{C}_{\rho\psi}(\beta - \psi) + \tilde{C}_{\rho\varphi}(\beta - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi); & \\ (A_{12} + B \cos \varphi) \ddot{\psi} + A_{22} \ddot{\varphi} - B \sin \varphi \dot{\psi} \dot{\varphi} - B \sin \varphi \dot{\varphi}^2 &= \frac{\lambda}{t-\lambda} M_{\theta} - \frac{\lambda}{t-\lambda} M_{\alpha} - \\ - \frac{\lambda}{t-\lambda} \tilde{C}_{\theta\theta}(\alpha - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) + \frac{\lambda}{t-\lambda} \tilde{C}_{\theta\psi}(\alpha - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) - & \\ - \frac{\lambda}{t-\lambda} \tilde{C}_{\rho\theta}(\beta - \psi + \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi) + \frac{\lambda}{t-\lambda} \tilde{C}_{\rho\psi}(\beta - \psi - \frac{\lambda}{t-\lambda}\varphi). & \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где  $\lambda = \frac{\gamma}{L}$  - передаточное отношение ИИМ;

$A_{11}, A_{12}, A_{22}, B$  - постоянные, зависящие от параметров привода.

Уравнения движения конкретного вибропривода из изображенных на рис. I с конкретной схемой ИИМ получаются из системы уравнений

Рис. I. Структурные схемы виброприводов патрона (а, б) и инструмента (в, г, д)



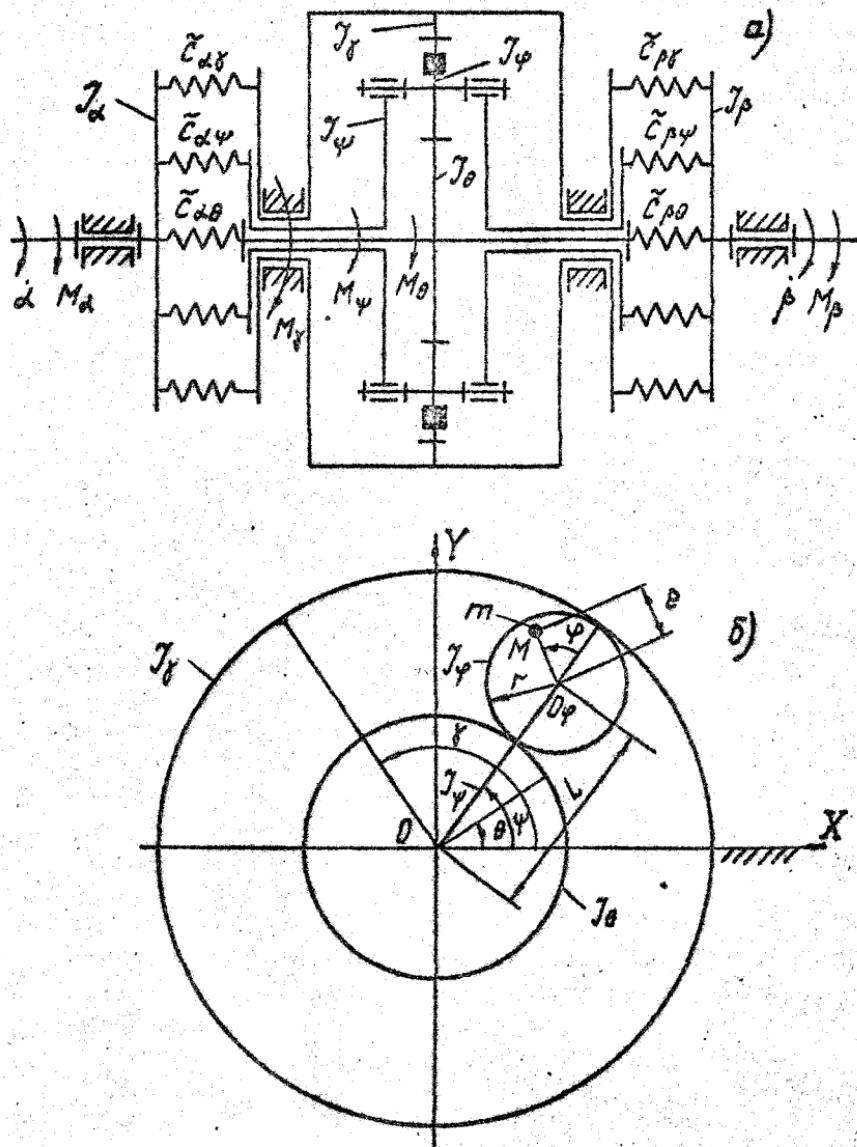


Рис. 2. Обобщенная схема инерционно-импульсного привода

(1) путем задания частных условий. Например, для получения уравнений движения двухпоточного привода патрона (рис. Ia) при использовании в нем ИИМ с ведущим солнечным колесом и ведомым водилом обобщенной схеме задаются следующие условия:

$$\left. \begin{array}{l} \tilde{C}_{d\psi} = \tilde{C}_{dy} = \tilde{C}_{\rho\theta} = \tilde{C}_{\rho y} = 0; \\ \tilde{C}_{d\theta} \rightarrow \infty, 0 < \tilde{C}_{\rho\psi} < \infty, \\ \gamma_f = 0; \\ M_\theta = M_y = 0. \end{array} \right\} \quad (2)$$

При этом система уравнений (1) приводится к виду

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{\psi} = \mu_\beta - C_{\rho\psi}(U - x); \\ [a_n + \frac{2}{f-\lambda} \cos(x-y)] \ddot{x} + [a_{12} + \cos(x-y)] \ddot{y} - \frac{\lambda}{f-\lambda} \sin(x-y) \dot{x}^2 + \\ + \frac{2}{f-\lambda} \sin(x-y) \dot{x} \dot{y} - \sin(x-y) \dot{y}^2 = \mu_\psi - C_{\rho\psi}(U - x); \\ -[a_{12} + \cos(x-y)] \ddot{x} + a_{23} \ddot{y} - \frac{\lambda}{f-\lambda} \sin(x-y) \dot{x}^2 = \mu_d, \end{array} \right\} \quad (3)$$

где  $M_\theta, \mu_\psi, \mu_d$  — безразмерные моменты соответственно привода станка, сил резания и двигателя ИИМ;  
 $C_{\rho\psi}$  — безразмерная жесткость упругого элемента, соединяющего шпиндель и патрон станка;  
 $x, y, U$  — обобщенные координаты, пропорциональные соответственно углу поворота водила  $\psi$ , солнечного колеса  $\theta$  и шпинделя станка  $\beta$ ;  
 $a_n, a_{12}, a_{23}, \delta$  — постоянные, зависящие от параметров привода.

Уравнения движения приводов инструмента (рис. Iв, г, д) получаются из уравнений движения соответствующей схемы двухпоточного привода путем задания последним условия

$$\beta = \dot{\beta} = \ddot{\beta} = 0. \quad (4)$$

В этом случае первое уравнение системы (3) становится уравнением равновесия стойки, а движение звеньев привода описывается вторым и третьим уравнениями.

Аналогичным образом получены уравнения движения однопоточного привода с различными схемами ИИМ, а также уравнения движения двухпоточного привода патрона и приводов инструмента при использовании в них других схем ИИМ, отличных от рассмотренной.

В третьем разделе рассматривается динамика ИИМ в приводах вибрационного резания. Поскольку движение звеньев привода определяется характером внешних сил, то возникает задача представления момента сопротивления в виде, учитывающем специфику вибрационного резания. Для этого используется общепринятая в технологии машиностроения эмпирическая формула силы резания, в которой один из параметров режимов резания принимается переменным. Резание с осевыми вибрациями можно рассматривать как резание с переменной осевой подачей, поэтому момент сопротивления на ведомом звене ИИМ  $M_j$  в приводе осевых вибраций (рис. Iв) представлен следующим образом:

$$M_j = -L_0 C_{px} t_p^{X_{px}} v_p^{n_{px}} [S_p + L_0 j(t) - L_0 j(t-t_0)] \Upsilon_{px} K_{px}, \quad (5)$$

где

$L_0$  — расстояние от оси ИИМ до вершины резца;

$j(t)$  — угол поворота ведомого звена ИИМ в данный момент времени;

$j(t-t_0)$  — угол поворота ведомого звена ИИМ на предыдущем обороте детали;

$t_0$  — время одного оборота детали;

$t_p, S_p, v_p$  — соответственно глубина резания, подача и скорость резания;

$C_{px}, K_{px}, X_{px}, \Upsilon_{px}, \Pi_{px}$  — эмпирические коэффициенты формулы силы резания.

Резание с радиальными вибрациями (рис. Iг) рассматривается как резание с переменной поперечной подачей; момент  $M_j$  определяется аналогично (5)

$$M_j = -L_0 C_{py} t_p^{X_{py}} v_p^{n_{py}} K_{py} [S_p + L_0 j(t) - L_0 j(t-t_0)] \Upsilon_{py} - \\ - L_0 C_{py} t_p^{X_{py}} v_p^{n_{py}} K_{py} [S_p + L_0 j(t) - L_0 j(t-t_0)] \Upsilon_{py} \quad (6)$$

В приводах крутильных вибраций переменной принимается скорость резания, на основании этого также получена формула для определения момента сопротивления.

Решение уравнений движения ИИМ в приводе осевых вибраций (3) с целью нахождения закона движения инструмента, закрепленного на ведомом звене, проводится на основании следующих допущений:

- ведущее звено ИИМ вращается с постоянной скоростью;
- коэффициент  $\alpha_{11}$  достаточно велик;

$$\alpha_{11} \gg \frac{2}{\mu \lambda}; \quad (7)$$

в) амплитуда колебательного движения ведомого звена мала

$$x \ll 1; \quad \dot{x} \ll 1; \quad (8)$$

г) момент сопротивления разлагается в степенной ряд с сохранением первых двух членов разложения

$$\mu_4 \approx K_1 \left\{ 1 + \mu_{ph} K_2 [x(t) - x(t - \tau_0)] + \dots \right\}. \quad (9)$$

В диссертации численными расчетами для наиболее характерных случаев вибрационного резания показано, что для данного технологического процесса эти допущения вполне корректны.

Принятые допущения приводят уравнения движения к линейному дифференциальному уравнению второго порядка с запаздывающим аргументом

$$\ddot{x} + \omega_1^2 x(t) = \delta^2 x(t - \tau_0) - \varepsilon \sin \tau, \quad (10)$$

где  $\omega_1^2, \delta^2, \varepsilon$  — постоянные зависящие от параметров привода и режимов резания;

$\tau$  — аргумент в уравнениях движения;

$\tau_0$  — угол сдвига фаз колебаний на двух соседних оборотах детали.

Периодическое решение уравнения (10) находится в виде ряда Фурье

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt). \quad (II)$$

Подстановка (II) в (10) и приравнивание коэффициентов при одинаковых функциях приводит к системам линейных уравнений, решения которых позволяют найти коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$ . В диссертации получено решение при  $n=1$  и показано, что при  $n>1$

$$a_n = b_n = 0, \quad (12)$$

т.е. колебания ведомого звена мало отличаются от гармонических.

Решение уравнений движения при использовании в приводе других схем ИММ проводится аналогично.

Таким образом, перемещение вершины резца в осевом направлении  $S_f$  независимо от схемы ИММ подчиняется гармоническому закону:

$$S_f = S_{f0} + A \sin (\omega t - \delta) \quad (13)$$

- где  $S_{lo}$  - перемещение под действием постоянной составляющей силы резания;  
 $f_{ij}$  - безразмерный коэффициент частоты, зависящий от схемы ИИМ и его передаточного отношения;  
 $\omega_{cp}$  - угловая скорость двигателя ИИМ;  
 $A_0$  - амплитуда колебаний:

$$A_0 = \frac{n m L l o e}{\sqrt{\left(\frac{i_{ij} \bar{c}_{ij} - a_{ij}}{\omega_{cp}}\right)^2 + \frac{2 i_{ij} K}{\omega_{cp}} \left(\frac{i_{ij} \bar{c}_{ij} - a_{ij}}{\omega_{cp}} + \frac{i_{ij} K}{\omega_{cp}}\right) / (1 - \cos \varphi_0)}}; \quad (14)$$

$a_{ij}, i_{ij}$  - коэффициенты, зависящие от параметров, передаточного отношения и схемы ИИМ;

$$K = \bar{c}_{pr} L_o^2 c_{pr} t_p^{X_{pr}} v_p^{Y_{pr}} s_p^{Z_{pr}} k_{pr} \quad (15)$$

В диссертации приведены выражения для определения  $i_{ij}, i_{ij}, a_{ij}$  для различных схем ИИМ.

Аналогично проведено решение уравнений движения при использовании ИИМ в приводе радиальных вибраций (рис. Iг). Установлено, что закон движения вершины резца  $S_0$  подчиняется выражению (13), амплитуда колебаний вершины резца - выражению (14), в котором

$$K = \bar{c}_{pr} L_o^2 c_{pr} t_p^{X_{pr}} v_p^{Y_{pr}} s_p^{Z_{pr}} k_{pr} + \bar{c}_{py} L_o^2 c_{py} t_p^{X_{py}} v_p^{Y_{py}} s_p^{Z_{py}} k_{py} \quad (16)$$

Определение законов движения звеньев в приводах крутильных вибраций проводится аналогично и приведено в приложении к диссертации.

Реакции в кинематических цепях ИИМ в приводах осевых и радиальных вибраций находятся на основании принципа Даламбера. Для его использования получены выражения для определения инерционных факторов, подстановка которых в уравнения равновесия сателлита позволяет найти искомые реакции в зависимости от параметров ИИМ и законов движения его звеньев. Если в приводах инструмента пренебречь колебаниями звеньев, т.е. принять ведомое звено неподвижным, а ведущее - вращающимся с постоянной угловой скоростью, то выражения реакций значительно упрощаются. Для оценки погрешности, получаемой при определении реакций без учета колебаний звеньев, был произведен расчет их по точным и приближенным формулам с подстановкой в первые из них закона движения (13). Результаты расчетов, приведенных в приложении к диссертации, показывают, что расхожде-

ние величин реакций не превышает 4 % от их наибольших значений. На основании этого сделан вывод о том, что режимы резания практически не влияют на величины реакций в кинематических парах ИИМ. Определение реакций в ИИМ, используемых в однопоточном приводе патрона, проводится аналогично и приведено в приложении к диссертации.

Четвертый раздел посвящен разработке методики синтеза ИИМ в приводах осевых и радиальных вибраций, обеспечивающих надежное дробление стружки в процессе резания. Для разработки этой методики предварительно установлено влияние режимов резания и параметров ИИМ на его динамику.

Связь амплитуды колебаний с параметрами ИИМ выявляется путем анализа выражения (14), из которого видно, что амплитуда пропорциональна числу сателлитов  $n$ , массе каждого из них  $m$  и эксцентриситету  $b$ . Зависимость амплитуды колебаний от других параметров устанавливается путем анализа выражения, находящегося под радикалом в (14), которое после ряда преобразований приобретает следующий вид:

$$R = \frac{i_{ij}^2}{\omega_{sp}^2} \left\{ \tilde{C}_{pj} - \left[ \tilde{f}_{ij} \right]_j \dot{\lambda}_{sp}^2 - K(1 - \cos \tau_0) \right\}^2 + \frac{i_{ij}^2 k^2}{\omega_{sp}^2} \sin^2 \tau_0, \quad (17)$$

где  $\tilde{f}_{ij}$  - коэффициент, зависящий от схемы ИИМ и его передаточного отношения;

$\tau_0$  - момент инерции ведомого звена ИИМ.

В диссертации показано, что использование известного метода исследования с помощью производных не позволяет найти экстремумы  $R$  как функции многих переменных. В связи с этим функция  $R$  рассматривается как уравнение квадратичной параболы в системе координат

$\tilde{C}_{pj} - R$ , что позволяет установить влияние угловой скорости  $\omega_{sp}$ , передаточного отношения  $\lambda$ , угла сдвига фаз колебаний  $\tau_0$  и крутильной жесткости  $\tilde{C}_{pj}$  на очертания параболы и, следовательно, на амплитуду колебаний.

Вследствие сложной зависимости амплитуды колебаний от режимов резания для выяснения этой зависимости был произведен расчет амплитуд для различных схем ИИМ по выражению (14) в широком диапазоне изменения подачи и глубины резания. Результаты этих расчетов, приведенные в приложении к диссертации в виде nomogramm, позволили установить влияние глубины резания, подачи и схемы ИИМ на амплитуду колебаний инструмента.

Зависимость частоты колебаний от параметров ИИМ установлена путем анализа выражений безразмерных коэффициентов частоты  $\frac{\omega_{ij}}{\omega_p}$ . Установлено, что частота колебаний определяется схемой ИИМ, ее передаточным отношением  $\lambda$  и угловой скоростью двигателя ИИМ

$\omega_p$ . Влияние схемы ИИМ и ее передаточного отношения на реакции в кинематических парах выявляется путем представления последних в виде:

$$R_i = K_{ij} \omega_p^2 \quad (18)$$

где безразмерный коэффициент  $K_{ij}$  определяется только схемой ИИМ и его передаточным отношением.

Проведенный анализ позволил сформулировать общие принципы синтеза ИИМ в приводах осевых и радиальных вибраций инструмента. Показано, что колебания инструмента, создаваемые ИИМ, должны обеспечивать надежное дробление стружки за счет мгновенного прерывания процесса резания и одновременно оказывать минимальное воздействие на станок. Исходя из этого, среди исследуемых схем ИИМ предпочтение отдано схеме с ведущим солнечным колесом и ведомым водилом. Передаточное отношение  $\lambda$  должно обеспечивать угол сдвига фаз колебаний, равный или близкий к  $\lambda$ , а также частоту колебаний, достаточно удаленную от собственных частот станка. Это выполняется при

$$0.3 \leq \lambda \leq 0.5 \quad (19)$$

Также приведены обоснования выбора угловой скорости двигателя ИИМ  $\omega_p$ . Выбор параметров ИИМ согласно сформулированным принципам позволяет определить конкретное значение произведения числа сателлитов  $n$ , массы каждого из них  $m$  и эксцентриситета  $e$ , обеспечивающего мгновенное прерывание процесса резания

$$n m e = \frac{S_p}{2 \pi \omega_0 \sin(\varepsilon_0/2)} \sqrt{\left( \frac{i_{ij} \tilde{\omega}_j - \omega_{ij}}{\omega_p^2} \right)^2 + \frac{2 i_{ij} K}{\omega_p^2} \left( \frac{i_{ij} \tilde{\omega}_j - \omega_{ij}}{\omega_p^2} - \frac{i_{ij} K}{\omega_p^2} \right) / (1 - \cos \varepsilon_0)}, \quad (20)$$

после чего из конструктивных соображений можно определить каждый из сомножителей.

Сформулированные принципы синтеза позволили разработать методику определения параметров ИИМ, предназначенного для вибрационного резания на определенном режиме резания (при использовании в массовом и крупносерийном производстве) и для универсального токарного станка. В первом случае возможно обеспечение угла сдвига

0194300

фаз колебаний  $\tau_0 = \pi$ , что в свою очередь приводит к минимальной амплитуде, необходимой для прерывания процесса резания. Это обеспечивается при передаточном отношении ИИМ, выполненного по схеме с ведущим солнечным колесом и ведомым водилом

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{n_2}{n_1} (k+0,5)} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (21)$$

где  $n_2, n_1$  - числа оборотов обрабатываемой детали и двигателя ИИМ. После этого на основании общих принципов синтеза определяются параметры ИИМ и произведение  $n_1 n_2$  (20). При использовании ИИМ в приводе, предназначенном для универсального токарного станка, необходимо предусмотреть устройство регулирования амплитуды колебаний, а проектирование вести для наиболее тяжелого режима (т.е. режима с наибольшей глубиной резания и подачей). Подбор передаточного отношения в данном случае осложняется тем, что для всех чисел оборотов станка невозможно обеспечить угол сдвига фаз

$\tau_0 = \pi$ . Поэтому в диссертации приведена методика выбора  $\lambda$ , при котором угол сдвига фаз на различных оборотах максимально близок к  $\pi$ . В приложении к диссертации приведены примеры синтеза ИИМ для определенного режима резания и универсального токарного станка.

В пятом разделе приведены задачи, методика и результаты экспериментальных исследований инерционно-импульсных механизмов в приводах вибрационного резания. Исходя из специфики применения ИИМ для вибрационной обработки при экспериментальных исследованиях были поставлены следующие задачи.

1. Разработка конструкций инерционно-импульсных приводов, обеспечивающих их использование на универсальном токарном станке при минимальных переналадках последнего.

2. Выявление возможностей дробления стружки в процессе резания на различных режимах при использовании виброприводов с ИИМ.

3. Определение основных выходных характеристик процесса вибрационного резания и сравнение их с характеристиками равномерного резания.

4. Экспериментальная проверка корректности проведенных аналитических исследований динамики ИИМ в приводах вибрационного резания.

Экспериментальные исследования проводились на двух типах виброприводов: приводе резца для создания осевых вибраций с регулиру-

емой амплитудой и многосхемном приводе крутильных вибраций инструмента. Первый из них обеспечивает угловые колебания резца, близкие к осевым, с возможностью плавной регулировки амплитуды на ходу, что позволяет в процессе резания подбирать минимальную амплитуду, обеспечивающую дробление стружки на данном режиме резания. При экспериментальных исследованиях устанавливалось наличие или отсутствие дробления стружки в процессе резания с вибрациями и без них, а также измерение следующих параметров:

- а) перемещение ведомого звена ИИМ;
- б) число оборотов двигателя привода;
- в) износ резца по задней поверхности;
- г) высота микронеровностей обработанной поверхности.

В результате экспериментальных исследований привода резца установлено, что дробление стружки обеспечивается при амплитуде колебаний, меньшей чем амплитуда, необходимая для прерывания процесса резания. При чистовом точении без вибраций поверхности, полученной при резании с вибрациями, также обеспечивается дробление стружки в определенном диапазоне глубин резания. Высота микронеровностей обработанной поверхности больше чем при резании без вибраций, внешний вид совпадает с поверхностью, полученной в результате геометрических построений, приведенных в приложении. Кроме того, установлено, что износ резца при резании с вибрациями и без вибраций практически одинаков, а амплитуда колебаний мало отличается от ее расчетной величины.

Многосхемный инерционно-импульсный привод обеспечивает реализацию большинства исследуемых схем ИИМ, создавших крутильные вибрации сверла или вращение его с наложением крутильных колебаний путем несложных переналадок: введения и выведения из зацепления с сателлитами солнечного колеса и эпицикла, перестановки привода. Амплитуда колебаний в приводе регулируется путем изменения крутильной жесткости без смены пружин за счет перемещения их относительно оси привода. При экспериментальных исследованиях многосхемного привода проводилась оценка эффективности виборезания при использовании различных схем ИИМ, а также измерения крутящего момента на ведомом звене, крутящего момента двигателя, угловой скорости двигателя и перемещений звеньев привода. В результате экспериментальных исследований установлено, что расхождение между замеренными и расчетными значениями величин не превышает 20 %. Кроме того установлено, что все исследуемые схемы обеспечивают

дробление стружки при сверлении отверстий; неравномерность вращения двигателя привода весьма мала; класс шероховатости обработанной поверхности и износ сверла при резании с вибрациями и без них практически одинаковы.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие общие выводы.

1. Анализ известных способов дробления стружки показал, что одним из наиболее эффективных является вибрационное резание, поскольку последнее обеспечивает измельчение стружки при обработке любого материала за счет мгновенного прерывания процесса резания без снижения производительности обработки. Среди механических возбудителей колебаний для виброрезания более предпочтительны вибраторы с динамическими связями, в частности ИИМ, создавшие более благоприятные условия для работы режущего инструмента.

2. Предложенная обобщенная схема инерционно-импульсного привода охватывает все исследуемые схемы вибраприводов и кинематические схемы ИИМ, которые могут в них использоваться. Уравнения движения обобщенной схемы преобразуются в уравнения движения вибраприводов для конкретных ИИМ при задании некоторых частных условий.

3. Общепринятая в технологии машиностроения эмпирическая формула силы резания применима для исследования динамики ИИМ в приводах виброрезания, если в ней принять переменный параметр (скорость резания, подачу или глубину), меняющийся наиболее сильно при данном виде вибраций.

4. В диапазоне частот и амплитуд, необходимых для дробления стружки, законы движения ведомого звена ИИМ в приводах осевых и радиальных вибраций мало отличаются от гармонического. Неравномерность вращения звеньев ИИМ в таких приводах практически не влияет на реакции в кинематических парах.

5. Параметры ИИМ и режимы резания в большой степени оказывают влияние на закон колебательного движения ведомого звена ИИМ. Реакции в кинематических парах практически не зависят от режимов резания.

6. Наиболее предпочтительным в приводах осевых и радиальных вибраций является ИИМ с ведущим солнечным колесом и ведомым водилом, как обеспечивающий достаточно большую амплитуду колебаний и одновременно малые реакции в кинематических парах.

7. Для заданного режима резания и обрабатываемого материала

возможно конкретное определение параметров ИИМ в приводе вибрационного резания, обеспечивающих надежное дробление стружки с минимально необходимой амплитудой. Для нескольких режимов резания и обрабатываемых материалов такое определение также возможно, если проектирование вести для наиболее тяжелого режима, а в ИИМ предусмотреть устройство для регулирования амплитуды колебаний.

8. Экспериментальные исследования ИИМ в приводах вибрационного резания показали возможность эффективного дробления стружки на всех исследуемых режимах и материалах при сохранении стойкости инструмента практически на уровне резания без вибраций. Малое расхождение результатов экспериментального и аналитического определения параметров колебательного движения звеньев ИИМ свидетельствует о корректности проведенных аналитических решений.

9. Результаты выполненной работы внедрены в производственном объединении "Завод им. Орджоникидзе" (г. Челябинск). Экономический эффект от внедрения регулируемого инерционно-импульсного привода режущего инструмента составил 183 тыс. рублей в год.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах автора.

1. Ахметшин Н.И., Геренштейн А.В., Родиков Н.Ф. Динамика инерционно-импульсного привода резца для универсального токарного станка. - В кн.: Бесступенчато-регулируемые передачи. Межвузовский сборник научных трудов. Ярославль, ЯМИ, 1982, с. 67-70.

2. Ахметшин Н.И., Гоц Э.М., Шабалкин В.Ф. Многосхемный инерционно-импульсный привод инструмента для обработки отверстий на токарном станке. - Научн.тр./Челяб.политех.ин-т, Челябинск, ЧПИ, 1979, № 235. Машиноведение, с. 82-84.

3. Ахметшин Н.И., Родиков Н.Ф., Гоц Э.М. Инерционно-импульсный привод резца для универсального токарного станка и его уравнения движения. - В кн.: Тез.докл. УІ Всесоюзной научн.-техн.конференции по регулируемым и автоматическим механическим приводам и передачам гибкой связью. Одесса, 1980, с.78.

4. Ахметшин Н.И., Родиков Н.Ф., Гоц Э.М. Условия дробления стружки и качество поверхности при инерционно-импульсной обработке металлов. - Науч.тр./Челяб.политех.ин-т, Челябинск, ЧПИ, 1981, № 259. Динамика и синтез инерционных и импульсных силовых систем, с. 38-43.

5. Васин Г.Г., Ахметшин Н.И., Гоц Э.М. Сравнительный анализ некоторых схем однопоточного инерционно-импульсного привода. - В

кн.: Тез.докл. II Всесоюзной науч.конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, 1977, с. 67.

6. Васин Г.Г., Ахметшин Н.И., Гоц Э.М. Обобщенная схема инерционно-импульсного привода. - Науч.тр./Челяб.политех.ин-т, Челябинск, ЧПИ, 1979, № 235, Машиноведение, с. 3-6.

7. Васин Г.Г., Ахметшин Н.И., Родиков Н.Ф. Периодические решения уравнений движения инерционно-импульсных механизмов, используемых для вибрационного резания металлов. - В кн.: Тез.докл. III Всесоюзной науч.конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, 1982, с. 218-219.

8. Васин Г.Г., Гоц Э.М., Ахметшин Н.И. Инерционно-импульсный привод инструмента для обработки на токарном станке. - В кн.: Тез.докл. У Всесоюзной науч.-техн. конференции по вариаторам и передачам гибкой связью. Одесса, 1976, с. 55.

9. Геренштейн А.В., Гоц Э.М., Ахметшин Н.И. Исследования малых колебаний инструмента с инерционно-импульсным приводом. - В кн.: Бесступенчато-регулируемые передачи. Вып. I. Межвузовский сборник научных трудов. Ярославль: ЯПИ, 1976, с. 106-108.

10. Геренштейн А.В., Гоц Э.М., Ахметшин Н.И. Некоторые вопросы теории инерционно-импульсного привода для металлорежущих станков. - В кн.: Бесступенчато-регулируемые передачи. Вып. I. Межвузовский сборник научных трудов. Ярославль: ЯПИ, 1976, с. 102-105.

11. Геренштейн А.В., Гоц Э.М., Ахметшин Н.И. Уравнения движения инерционно-импульсного привода инструмента планетарного типа. - Науч.тр./Челяб.политех.ин-т, Челябинск: ЧПИ, 1976, № 175. Вопросы улучшения динамических характеристик машин, с. 23-25.

12. Гоц Э.М., Ахметшин Н.И., Мигулин А.Л. Экспериментальные исследования инерционно-импульсных механизмов для вибрационного резания металлов. - В кн.: Тез.докл. III Всесоюзной науч.конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, 1982, с. 107.

13. Гоц Э.М., Геренштейн А.В., Ахметшин Н.И. Динамика инерционно-импульсного привода инструмента в режиме прерывистого резания. - В кн.: Резание и инструмент. Вып. 21. Респ.межвед.науч.-техн.сборник. Харьков: Выща школа, 1979, с. 47-50.

14. А.с. № 954879 (СССР). Регулируемое инерционно-импульсное устройство./Васин Г.Г., Родиков Н.Ф., Ахметшин Н.И. - Опубл. в Б.И., 1982, № 32.

15. А.с. № 956159 (СССР). Токарный станок. /Васин Г.Г.,  
Ахметшин Н.И., Гоп Э.М. - Опубл. в Б.И., 1982, № 33.

16. Положительное решение ВНИИГПЭ по заявке № 3286169 от  
24.06.1982 г.. Инерционно-импульсное устройство для дробления  
стружки. /Васин Г.Г., Родников Н.Ф., Ахметшин Н.И.

