



Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ЗАБЕИВОРОТА Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОГО  
ВРАЩАТЕЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1975

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
ЕСИН Г.Д.,

кандидат технических наук, доцент  
ГУРИН М.А.

Ведущее предприятие - Кыштымский машиностроительный завод.

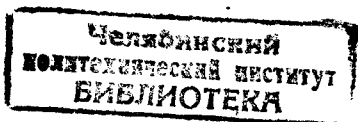
Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1975 г.

Защита диссертации состоится "22" октября 1975 г.  
в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола (г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, Ученому секретарю Совета по адресу: 454044, г. Челябинск-44, проспект им. В.И. Ленина, 76.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
кандидат технических наук, доцент  (В. ДАММЕР)



**А к т у а л ь н о с т ь р а б о т ы.** Основные тенденции развития современной промышленности предполагают переход к новому уровню технологии и широкое внедрение в практику промышленного производства последних достижений науки и техники.

Одним из наиболее прогрессивных направлений в области создания новых машин является разработка и совершенствование вибрационных машин различного назначения, возможности и области применения которых ещё далеко не исчерпаны.

К новым видам вибромашины относятся инерционно-импульсные вращатели планетарного типа, предназначенные для технологических и транспортных машин с вращающимися рабочими органами. В результате проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ разработаны рабочие проекты опытных образцов инерционных вращателей и проведены экспериментальные исследования для различного рода машин: буровой установки, камнерезной машины, винтового конвейера, бетономешалки, испытательного стенда, токарного станка и др. В настоящее время эти работы подошли к этапу внедрения промышленных конструкций импульсных вращателей для буровой установки и камнерезной машины. Поэтому актуальной задачей на данном этапе внедрения такого рода вибромашины является исследование вопросов динамики этих машин. Возникла необходимость всестороннего изучения динамических процессов в целях обеспечения высокой эксплуатационной надежности машин. Вопросы исследования динамики инерционно-импульсных машин включены в координационный план НИР АН СССР на 1971-75 г. по проблеме "Теория машин и рабочих процессов".

**Ц е л ь р а б о т ы.** Диссертация посвящена исследованию динамики инерционно-импульсных вращателей планетарного типа, как системы машина-нагрузка-двигатель, и разработке научных основ их теории и расчета.

**О с н о в н ы е з а д а ч и.** Для достижения поставленной цели основные задачи настоящего исследования включают в себя:

1. Анализ состояния вопроса по инерционно-импульсным вращателям.

2. Обоснование и выбор физической и математической моделей инерционно-импульсных вращателей планетарного типа с одной и несколькими степенями свободы.

3. Создание аналитических основ теории инерционно-импульсных вращателей планетарного типа с помощью одного из приближенных методов нелинейной механики.

4. Разработку инженерной методики расчета оптимальных параметров инерционно-импульсных вращателей планетарного типа.

5. Экспериментальную проверку результатов теоретической части работы на опытном образце инерционно-импульсного вращателя.

**Общая методика выполнения работы.** Для исследования динамики инерционно-импульсного вращателя планетарного типа с помощью уравнений Лагранжа второго рода были составлены дифференциальные уравнения движения механизма при переменном моменте сопротивления на рабочем органе с учетом как статических, так и динамических характеристик приводных электродвигателей. Аналитическое решение этой системы уравнений, полученное с помощью метода малого параметра, позволило исследовать вопросы динамики механизма. На основании полученного решения предложен метод исследования влияния параметров импульсного вращателя на динамические нагрузки в кинематических парах импульсного механизма, который позволяет выявить закономерность их изменения при изменении этих параметров.

Оценка аналитических решений проводилась на электронной вычислительной машине "М 222", корректность физической модели проверена экспериментальным путем на опытном образце.

**Научная новизна.** Разработаны аналитические основы динамики инерционно-импульсного вращателя планетарного типа с помощью одного из наиболее распространенных методов нелинейной механики - метода малого параметра. Разработана методика синтеза инерционных вращателей при помощи специальных номограмм, исходя из основных данных, предъявляемых к ним. Предложенная методика позволяет сравнительно просто выбрать необходимые параметры импульсных вращателей, которые являются оптимальными с точки зрения технологической эффективности и динамической нагруженности данных механизмов.

**Практическая ценность.** Успешное внедрение и эксплуатация инерционно-импульсных вращателей в приводах различного рода технологических и транспортных машин во многом

определяется нашими знаниями о динамических процессах, происходящих при их работе. Разработанные в настоящей работе вопросы динамики этих механизмов позволяют проектировать оптимальные конструкции импульсных вращателей, исходя из основных требований, предъявляемых к ним.

Реализация результатов проведенных исследований проводилась на опытном образце вращателя, установленного в приводе вертикально-сверлильного станка производственного назначения, типа 2А 125, а также на вновь проектируемых промышленных образцах инерционных вращателей различного назначения, разрабатываемых в настоящее время в Челябинском политехническом институте.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались:

1. На Четвертой Всесоюзной научно-технической конференции по вариаторам и передачам гибкой связью, Одесса, 1972 г.

2. На Первой Всесоюзной научно-технической конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам, Челябинск, 1972 г.

3. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института и научно-методических семинарах Челябинского филиала по ТММ при Совете по теории машин и рабочих процессов АН СССР в 1972-1975 г.г.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, приложения, библиографического списка, включающего 91 наименование, и содержит 115 страниц основного текста, 44 страницы рисунков, графиков и фотографий, 16 страниц приложения.

## Г л а в а I.

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПО ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНЫМ ВРАЩАТЕЛЯМ

Обзор и анализа специальной литературы показывает, что в настоящее время, несмотря на большое число исследований, выполненных в области разработки конструкций и методов расчета различных по назначению вибрационных машин, до последнего времени малоизученным

оставались различные технологические и транспортные машины с вращающимися рабочими органами и наложенными на них крутильными колебаниями. Объяснялось это отсутствием соответствующих приводов, которые обеспечили бы вынужденные крутильные колебания рабочему органу, и тем самым передачу этих колебаний обрабатываемому или перемещаемому материалу. Создание таких машин в настоящее время является актуальной задачей для многих отраслей промышленности.

За последние годы в нашей стране рядом исследователей был разработан и создан ряд конструкций так называемых инерционно-импульсных вращателей, предназначенных для различных технологических и транспортных машин с вращающимися рабочими органами. Различными авторами предложено большое число конструкций инерционных вращателей. Значительные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию опытных импульсных вращателей выполнены за последнее время и в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола. В результате этого разработаны рабочие проекты инерционно-импульсных вращателей для самых разнообразных машин: буровой установки, машины для планировки мерзлых грунтов, камнерезной машины, винтового конвейера, испытательных стенов и т.д. В настоящее время эти работы подошли к этапу внедрения промышленных конструкций импульсных вращателей.

В качестве возбудителей крутильных колебаний могут быть использованы различные структурные схемы импульсных механизмов, но наибольшее распространение получили планетарные импульсные механизмы, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими схемами. Инерционно-импульсные вращатели планетарного типа предназначены для редуцирования статического крутящего момента ведущего вала в пульсирующий момент на ведомом валу. Импульсные вращатели работают циклически. В этом и состоит их основное отличие от других видов передач.

Исследования по эффективности применения инерционно-импульсных вращателей планетарного типа показали следующее. Применение импульсных вращателей в различных строительных машинах с вращающимися рабочими органами, особенно при разработке мерзлых грунтов и твердых пород, позволяет не только сочетать преимущества резания и дробящего эффекта разрушения при рациональном направлении импульса, но и снизить энергоёмкость процесса резания за счет снижения реакции со стороны грунта (породы) на рабочий орган

машины, а, следовательно, и конструировать машины более легкими и экономичными.

Применение импульсных вращателей в качестве привода транспортирующих машин (винтовых конвейерах, лопастных смесителях) позволяет увеличить подвижность сыпучих материалов и уменьшить коэффициент трения, а, следовательно, и повысить их производительность.

Импульсные вращатели открывают широкую возможность практического осуществления виброперемешивания растворо-бетонных смесей. В настоящее время уже известны некоторые конструкции вибросмесителей, обладающих значительно лучшими технологическими свойствами. Конструктивно такие вибросмесители выглядят с двумя приводами: один - для вращения смесительного вала, другой - для сообщения корпусу, либо смесительному валу колебаний. Применение импульсных вращателей позволит соединить два механизма привода в один. Смесительный вал при этом будет совершать крутильные колебания, что приведет к более качественному перемешиванию.

В настоящее время все виды испытаний зубчатых колес и комплексные испытания зубчатых механизмов и машин (редукторов, коробок передач, тракторных и автомобильных трансмиссий) проводятся, как правило, при неизменных крутящих моментах на валах испытываемых механизмов. Режим таких испытаний не отражает реальных условий работы упомянутых механизмов и машин, так как при установившемся движении любой машины этого типа внешний момент на её валу изменяется по некоторому периодическому закону. Между тем, практика заводских испытаний и большой круг научно-исследовательских работ требует решения задачи моделирования на испытательном стенде реальных условий эксплуатации зубчатых механизмов. И в качестве устройств, моделирующих заданные эксплуатационные режимы, широкое применение могут найти импульсные вращатели планетарного типа.

В результате анализа выполненных исследований по инерционно-импульсным вращателям можно сделать следующие выводы:

I. За последние годы опубликовано значительное количество статей и защищено несколько диссертаций по инерционно-импульсным вращателям. Эти работы посвящены разработке, созданию и исследованию отдельных конкретных схем импульсных вращателей в приводах различных машин и эффективности их использования.

2. Вопросы динамики инерционно-импульсных вращателей во многих случаях рассматривались исключительно с помощью электронных вычислительных машин или в предположении, что сателлиты с неуравновешенными грузами вращаются равномерно (с постоянной угловой скоростью). Это приводило к описанию движения импульсных вращателей неавтономными дифференциальными уравнениями. В действительности же, импульсные вращатели, как правило, представляют собой автономные системы, так как вращение сателлитов не поддерживается извне жесткими связями, обеспечивающими заданный закон изменения угловой скорости, в частности, постоянство скорости. В реальных условиях угловая скорость вращения сателлитов не всегда остается постоянной.

3. При учете характеристик приводных двигателей выдвигались лишь два предположения. В первом случае вращающий момент электродвигателя считался постоянным. Но в работе М.А.Скуридина показано, что такое предположение в ряде случаев может привести к ошибочным выводам. Во втором случае ограничивались использованием статических характеристик электродвигателей. При этом не учитываются электромагнитные явления в двигателе, что в свою очередь может повлечь за собой неправильную оценку свойств машинного агрегата.

Цель настоящей работы и основные задачи исследования, сформулированные на основе полученных выводов, приведены выше.

## Г л а в а II.

### НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВРАЩАТЕЛЯ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Наиболее простой физической моделью инерционно-импульсного вращателя планетарного типа является модель импульсного вращателя, представленная на рис. I. Предполагается, что импульсный механизм привода имеет симметрично расположенные неуравновешенные сателлиты.

Вращающий момент, передаваемый от двигателя I на водило 5 суммируется со знакопеременным вращающимся моментом со стороны импульсатора. В результате этого на ведомый вал вращателя действует результирующий крутящий момент, изменяющийся по периодическому закону.



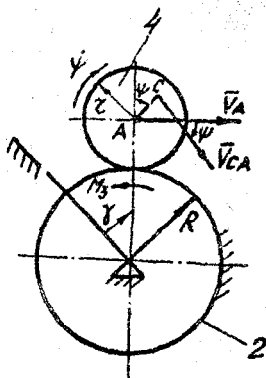
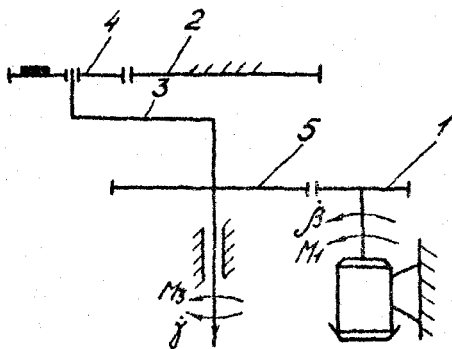


Рис. 1. Схема инерционно-импульсного вращателя с одной степенью свободы

Дифференциальное уравнение движения импульсного вращателя с одной степенью свободы имеет наиболее простой вид, если за обобщенную координату выбрать относительный угол поворота сателлита. С учетом динамической характеристики электродвигателя приходим к автономной нелинейной системе дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} A + 2E \cos \psi - E \dot{\psi}^2 \sin \psi &= M_1 K_1 - M_2 K_2, \\ \dot{M} &= M_{10} - P_{10} K_1 \dot{\psi} - L_{10} M_1, \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где

$$A = \theta_1 K_1^2 + K_2^2 (\theta_1 + \theta_2) + n(mr^2 + \theta_4)(1 + K_2)^2,$$

$$E = nmr^2 e (1 + K_2)^2.$$

Здесь  $\theta_1, \theta_2$  - моменты инерции относительно своих осей звеньев I и 3;

$m, r, \theta_4$  - масса, радиус и момент инерции сателлита 4 относительно своей оси;

$n$  - число сателлитов;

$e$  - расстояние от центра тяжести до оси сателлита;

$$K_1 = \frac{r_1 n}{r_1 R}, K_2 = \frac{r}{R}$$

$R$  - радиус неподвижного солнечного колеса;

$M_1, M_2$  - моменты двигателя и сопротивления на рабочем органе.

Предполагается, что момент сопротивления зависит от скорости вращения рабочего органа незначительно, и в первом приближении изменяется по линейному закону

$$M_2 = B + N \dot{\psi}.$$

Система уравнений (I), как нетрудно показать, представляет собой обобщенную математическую модель известных схем импульсных вращателей с одной степенью подвижности на основе планетарных вибраторов крутильных колебаний моногармонического типа. Причем, в зависимости от конкретной схемы импульсных вращателей, будут меняться постоянные коэффициенты  $A$  и  $E$ , включающие в себя геометрические и динамические параметры, а также постоянные коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , зависящие от передаточных отношений звеньев привода.

Данная система уравнений отличается той особенностью, что вращающиеся координаты изменяются по закону, близкому к равномерному

вращению. Решение уравнений (I) может быть получено с помощью одного из эффективных методов теории нелинейных колебаний — метода малого параметра.

Будем искать решение полученной системы уравнений в виде рядов по степеням малого параметра  $\mu = E/A$  (для реальных констант  $E/A \ll 1$ )

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \psi_0 + \mu \psi_1 + \mu^2 \psi_2 + \dots, \\ M_1 &= M_1^0 + \mu M_1^{(1)} + \mu^2 M_1^{(2)} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Так как система уравнений (I) автономна, то заменим в рассматриваемом решении переменную  $t$  переменной  $\tau$  с помощью подстановки

$$t = \frac{\tau}{\omega_0} (1 + h), \quad (3)$$

где

$$h = \mu h_1 + \mu^2 h_2 + \dots, \quad \omega = \frac{\omega_0}{(1+h)}$$

Здесь  $h_j$  и  $\omega_0$  — некоторые неизвестные, но вполне определенные постоянные;

$\omega$  — неизвестная угловая частота спутника.

После подстановки равенств (2) и (3) в систему дифференциальных уравнений (I) и приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях  $\mu$  в левых и правых частях уравнений, получим уравнения для нахождения функций

$$\psi_j \text{ и } M_1^{(j)} \quad (j = 0, 1, 2, \dots)$$

Окончательное решение системы (I), если ограничиться только нулевыми и первыми приближениями (как часто и поступают при решении прикладных задач), имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \omega t + \mu X_1 \sin(\omega t - \varphi_1), \\ M_1 &= M_1^0 + \mu X_2 \sin(\omega t - \varphi_2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $X_1, X_2, \varphi_1, \varphi_2$  — постоянные коэффициенты, учитывающие параметры привода и изменение момента сопротивления;

$\omega = \omega_0 = \frac{K_1 M_0 - B L_{10} K_2}{P_0 K_1^2 + L_{10} N K_2^2}$  — угловая скорость спутников относительно водила, соответствующая равномерному вращению всей системы;

$$M_1^* = \frac{M_{10} N K_1^2 + P_0 B K_1 K_2}{P_{10} K_1^2 + L_{10} N K_1^2} - \text{средний момент электродвигателя.}$$

Аналогично изложенному выше можно показать, что решение первого дифференциального уравнения системы (I) с учетом статической характеристики электродвигателя-

$$M_1 = M_0 - P_0 \beta$$

имеет вид

$$\varphi = \omega t + \mu \chi_3 \sin(\omega t - \varphi_3). \quad (5)$$

Оценка найденных аналитических решений (4) и (5) проводилась на цифровой вычислительной машине.

На основании полученных решений была произведена оценка неравномерности движения импульсного вращателя с помощью исследования коэффициента неравномерности

$$\delta = \frac{\dot{\Psi}_{\max} - \dot{\Psi}_{\min}}{\dot{\Psi}_{\text{ср}}} = 2 \frac{E}{A} \chi_3. \quad (6)$$

Условия работы приводного двигателя оценивались коэффициентом неравномерности изменения момента двигателя

$$\delta_1 = \frac{M_{1\max} - M_{1\min}}{M_{1\text{ср}}}$$

Анализ полученных в I главе решений позволил сделать следующие выводы:

1. Метод малого параметра оказался эффективным при решении подобных систем дифференциальных уравнений. Полученные расчетные формулы просты и компактны.
2. В реальном диапазоне задания коэффициента неравномерности движения вращателя ( $\delta \leq 0,2$ , из условий обеспечения устойчивой работы электродвигателя) погрешность вычисления по этим формулам мала (менее 1%) и точность вполне достаточна для инженерных расчетов.
3. Полученные зависимости, описывающие движение импульсного вращателя, позволяют исследовать его динамические характеристики в зависимости от исходных параметров системы -  $m, e, \omega$ ).
4. Использование при расчете статической характеристики электродвигателя при определенных режимах работы может повлечь за собой неправильную оценку динамических свойств импульсного вращателя.

### Г л а в а Ш.

#### НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВРАЩАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ СТЕПЕНЬЮ ПОДВИЖНОСТИ

При проектировании инерционного вращателя часто приходится сталкиваться с требованием, обеспечить минимально возможную неравномерность вращения ведущего вала вращателя (что связано с обеспечением наиболее благоприятных условий работы приводного двигателя) при максимально допустимой неравномерности вращения ведомого вала (рабочего органа). Удовлетворить это требование с помощью импульсного вращателя с одной степенью свободы не представляется возможным, в связи с жесткой зависимостью между угловыми скоростями вращения ведущего и ведомого валов. Поэтому практический интерес представляет исследование динамических свойств импульсного вращателя с нарушением подобной жесткой связи.

Наиболее перспективной в этом отношении является конструкция импульсного вращателя с тремя степенями свободы (рис. 2). Основными элементами передачи являются: двигатель 2, приводящий в движение центральную шестерню 2, которая входит в зацепление с сателлитом 4 (грузовое звено), имеющим центр тяжести в точке С и свободно посаженным на ось А водила, связанного с ведомым валом 3, на который действует полезная нагрузка; двигатель I, связанный с водилом посредством зубчатой пары I-5 и упругого элемента (пружин).

При вращении сателлитов на водило действует знакопеременный вращающий момент; от двигателя I на водило через зубчатое зацепление и пружины передается статический момент. В результате суммирования этих моментов на ведомый вал действует результирующий момент, изменяющийся по периодическому закону. Представленная конструкция дает возможность вести настройку вращателя в широком амплитудно-частотном диапазоне при заданной средней угловой скорости водила (рабочего органа). Кроме того, упругая связь между звеньями 5 и 3 дает возможность их относительному провороту.

Если за обобщенные координаты механизма выбрать углы поворота двигателя, водила и грузового звена относительно водила:  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\varphi$ , то дифференциальные уравнения движения системы имеют наиболее простой вид.

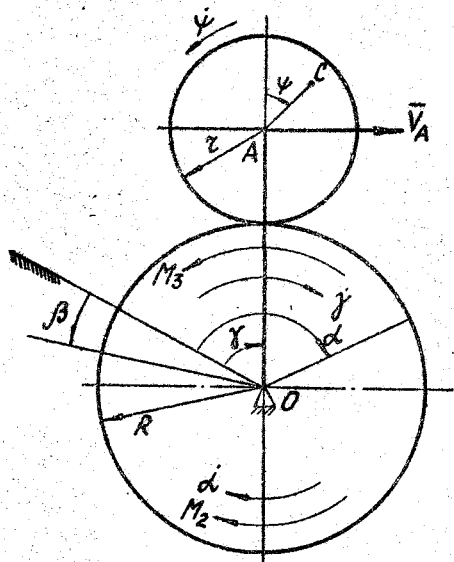
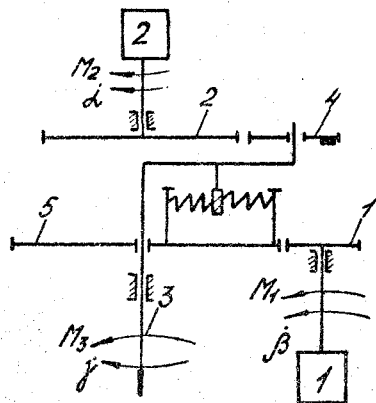


Рис. 2. Схема инерционно-импульсного вращателя с тремя степенями свободы.

Результаты машинного счета, а также данные экспериментальных исследований позволили установить следующее. Скорость вращения солнечного колеса с достаточной степенью точности можно считать равномерной, т.е.

$$\dot{\alpha} = \omega_2 = \text{const} .$$

С учетом данного допущения и динамической характеристики двигателя искомая система уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} C_{11} \ddot{\beta} + HK(K\beta - \lambda\psi - \omega_2 t) &= M_1 , \\ (A_1 + 2E \cos\psi) \ddot{\psi} - E_1 \psi^2 \sin\psi + E_2 \omega_2^2 \sin\psi - N\lambda(K\beta - \lambda\psi - \omega_2 t) &= \\ = -(B + N\omega_2)\lambda - N\lambda^2 \dot{\psi} , \\ \dot{M}_1 &= M_{10} - P_{10} \dot{\beta} - L_{10} M_1 , \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $C_{11} = \theta_1 + \theta_2 K^2$ ,  $A_1 = \lambda^2 \theta_3 + n(\lambda + 1)^2 \theta_4 + nmh^2 \lambda^2$ ,

$$H = jCh^2, \quad E_1 = nme h(\lambda^2 + \lambda), \quad E_2 = nme h .$$

Здесь  $h = r + R$ ,  $e = AC$ ,  $\lambda = r/R$ ,  $K = r_1/r_2$ ,

$j$  - число упругих элементов;

$C$  - линейная жёсткость упругого элемента;

$m$  - масса неуравновешенного сателлита;

$h_1$  - расстояние от оси водила до оси упругого элемента.

Заменяя в рассматриваемом решении переменную  $t$  переменной  $\tau$  с помощью подстановки (3), решение нелинейной системы дифференциальных уравнений (7) будем искать в виде рядов по степеням параметра  $\mu = E_1/A_1$  (для реальных конструкций  $E_1/A_1 \ll 1$ ).

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \beta_0 + \mu \beta_1 + \mu^2 \beta_2 + \dots , \\ \psi &= \psi_0 + \mu \psi_1 + \mu^2 \psi_2 + \dots , \\ M_1 &= M_1^0 + \mu M_1^{(1)} + \mu^2 M_1^{(2)} + \dots . \end{aligned} \right\} (8)$$

Если ограничиться нулевым и первым приближениями, то после соответствующих выкладок и преобразований искомое решение системы уравнений (7) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \omega t + \mu Y_1 \sin(\omega t - \varepsilon_1) , \\ \beta &= \omega t + \beta^0 + \mu Y_2 \sin(\omega t - \varepsilon_2) , \\ M_1 &= M_1^0 + \mu Y_3 \sin(\omega t - \varepsilon_3) , \end{aligned} \right\} (9)$$

где

$$\omega = \omega_0, \quad \omega_1 = \frac{M_1 - I_{\omega_0} BK}{D_{\omega_0} + I_{\omega_0} NK^2}, \quad \omega_0 = \frac{1}{J} (K\omega_1 - \omega_2), \quad \beta^0 = \frac{M_1^0}{HK^2}.$$

Здесь

- $\omega$  - относительная угловая скорость спутника;  
 $\omega_1$  - средняя угловая скорость двигателя I;  
 $\beta^0$  - угол статической затяжки упругого элемента;  
 $Y_1, Y_2, Y_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - постоянные коэффициенты, учитывающие параметры привода и изменение момента сопротивления.

Аналогичным образом было получено решение системы дифференциальных уравнений движения вращателя с учетом статической характеристики двигателя I:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \omega t + \mu Y_1 \sin(\omega t - \varepsilon_1), \\ \beta &= \omega_1 t + \beta^0 + \mu Y_2 \sin(\omega t - \varepsilon_2). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Правильность найденных аналитических приближенных решений (9) и (10) проверялась, как и прежде, на цифровой вычислительной машине.

С точки зрения технологической эффективности применения импульсных вращателей основными требованиями, которые предъявляются к ним, являются следующие:

1) установившийся режим работы вращателя должен обеспечить минимально допустимую неравномерность вращения ведущего звена (основного двигателя I);

2) возможность получения определенной степени неравномерности вращения ведомого звена (рабочего органа).

Оценка неравномерности движения звеньев импульсного вращателя с тремя степенями свободы может быть произведена с помощью коэффициентов неравномерности вращения ведущего и ведомого звеньев ( $\delta_{\beta}$  и  $\delta_{\varphi}$ ). Условия же работы приводного двигателя I можно оценить с помощью коэффициента неравномерности изменения момента двигателя  $\delta_1$ .

В случае учета динамической характеристики электродвигателя I, нетрудно показать, что

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\varphi} &= 22 Y_1 \frac{\omega}{\omega_1}, \\ \delta_{\beta} &= 2 \mu Y_2 \frac{\omega}{\omega_1}, \\ \delta_1 &= 2 \mu Y_3 / M_1^0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



Установившийся режим работы импульсного вращателя должен определяться таким образом, чтобы соответствующие коэффициенты неравномерности, определяемые по формулам (II), не превышали некоторых заранее заданных значений. С помощью зависимостей (II) для экспериментального образца импульсного вращателя были построены графики изменения коэффициентов неравномерностей  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  и  $\delta_z$  в зависимости от параметров  $\epsilon$ ,  $\omega$ ,  $\zeta$  и  $m$ , оказывающих существенное влияние на характер колебательного движения привода.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При задании коэффициента неравномерности вращения ведомого звена в диапазоне до 0,3 погрешность аналитического расчета вполне достаточна для инженерных расчетов (до 5%).

2. Для значений коэффициента  $\delta_y > 0,3$  с целью повышения точности аналитического расчета может оказаться целесообразным нахождение ещё одного приближения (второго) искомых функций.

3. Полученные аналитические зависимости позволяют провести исследования динамических процессов, происходящих при движении импульсного вращателя, в зависимости от его исходных параметров.

4. Использование при расчете статической характеристики двигателя вместо динамической при определенных режимах установившегося движения приводит к ошибочному выводу относительно границ областей изменения параметров  $\omega$ ,  $\zeta$  и  $\epsilon$  с точки зрения условий устойчивой работы двигателя.

## Г л а в а I V .

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОК НА УЗЛЫ И ЗВЕНЬЯ ИМПУЛЬСНОГО ВРАЩАТЕЛЯ

Схемы реакций и инерционных сил, действующих на грузовое звено инерционного вращателя с одной и тремя степенями свободы представлены на рис. 3-4.

Силы  $P_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и момент  $M_n$  пары сил инерции определяются выражениями

$$P_1 = m(r+R)\ddot{\gamma}^2, P_2 = m(r+R)\ddot{\gamma}, P_3 = m\epsilon\dot{\varphi}^2, P_4 = m\epsilon\dot{\varphi}, M_n = \Theta_c\dot{\varphi},$$

где  $\Theta_c = \Theta_4 - m\epsilon^2$ .

Из условий равновесия данных систем сил при соответствующих кинематических зависимостях можно легко получить формулы для определения динамических реакций в зацеплении (точка В) и подшипнике А водила.

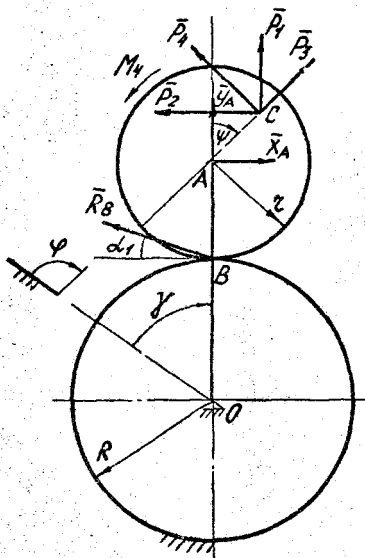


Рис. 3. Схема реакций связей и инерционных сил грузового звена импульсного вращателя с одной степенью свободы

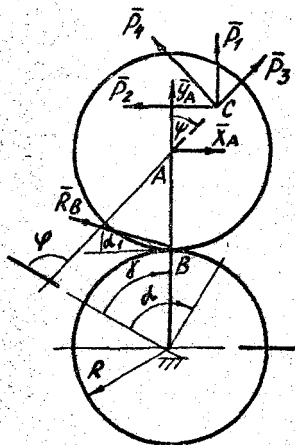


Рис. 4. Схема реакции связей и инерционных сил грузового звена импульсного вращателя с тремя степенями свободы

Из формул (6) и (II) можно получить зависимости между геометрическими, массовыми, кинематическими и жесткостными параметрами системы

$$\nu = \delta \frac{A}{2\chi, n m r^2 (1 + K_s)^2} \quad (12)$$

для вращателя с одной степенью свободы и

$$\nu = \delta_s \frac{A_s \omega_s}{2\chi_s n m r^2 (1 + \lambda)^2 \lambda \omega_s} \quad (13)$$

для вращателя с тремя степенями подвижности.

Здесь

$$\nu = -\frac{e}{f} .$$

Используя зависимость (12) в диапазоне реальных значений параметров  $\nu$ ,  $m$  и  $\Gamma = 2r^2 + R$ , можно построить номограммы

$\nu = f(m)$  при различных значениях параметра  $\Gamma = \text{const}$ . С помощью зависимости (13) в диапазоне реальных значений параметров  $m$ ,  $C$  и  $\nu$  можно построить номограммы  $\nu = f(m)$  при различных значениях жесткости упругих элементов  $C$ .

Полученные номограммы позволяют исследовать влияние параметров импульсного вращателя  $m$ ,  $\Gamma$  (или  $C$ ) и  $\nu$  на его динамические характеристики  $R_A$  и  $R_B$  и выявить закономерности их изменения при изменении этих параметров. Применение номограмм

$\nu = f(m)$  позволяет значительно сократить расчеты по определению оптимальных параметров инерционно-импульсных вращателей планетарного типа, как с одной, так и повышенной (введение упругой связи) степенью подвижности.

На основании проведенных исследований предлагается следующая методика расчета вращателей по таким исходным данным:

- 1) средняя угловая скорость выходного звена и коэффициент неравномерности его вращения -  $(\omega_s, \delta_s)$ ;
- 2) средний момент сопротивления на рабочем органе -  $(M_w)$ ;
- 3) верхний предел допустимой области изменения коэффициента неравномерности изменения момента основного двигателя -  $(\delta_1)$ ;
- 4) частота колебаний рабочего органа -  $(f)$ ;

I. Исходя из среднего номинального режима работы, решается обычная задача синтеза привода механизма, производится выбор параметров основного двигателя I и составляется расчетная схема.

II. Исходя из требований обеспечения данным вращателям определенной частоты колебаний рабочего органа и конструктивных особенностей механизма, производится выбор параметров электродвигателя и

геометрических параметров  $\gamma$  и  $R$  импульсного механизма. Угловая скорость вращения сателлита относительно водила при этом должна быть равной

$$\omega = 2\pi f .$$

Ш. Для диапазона заданных значений  $m$ ,  $\nu$  и  $C$  по формуле (13) строится номограмма  $\nu = f(m)$  в плоскости  $\nu$  и  $m$  для различных значений  $C = \text{const}$ .

IV. Определяются параметры  $m$ ,  $\nu$  и  $C$ . При этом может представиться три варианта:

а) задаются параметрами  $\nu$  и  $m$  и определяют из номограммы значение соответствующего параметра  $C$ ;

б) задаются параметрами  $C$  и  $m$  и находят из номограммы соответствующее значение  $\nu$ ;

в) исходя из заданных значений  $C$  и  $\nu$ , находят, аналогично, значение  $m$ .

У. Исходя из выбранного варианта определения параметров  $m$ ,  $\nu$  и  $C$ , исследуется влияние этих параметров на динамическую нагруженность в кинематической паре А импульсного механизма, согласно предложенной в работе методике. Производится выбор оптимальных параметров  $m$ ,  $\nu$  и  $C$ .

VI. Определив оптимальные параметры импульсного вращателя ( $m$ ,  $\nu$  и  $C$ ), после соответствующего силового расчета можно выбрать конструктивные размеры его звеньев.

VI. В процессе выбора оптимальных параметров ( $m$ ,  $\nu$  и  $C$ ) по формуле (II) контролируется значение коэффициента  $\delta_1$ , которое должно быть меньше заданной величины.

VIII. С целью выявления опасных резонансных режимов и отыскания способов их устранения при помощи формул (II) строятся амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики импульсного вращателя.

## Г л а в а У.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВРАЩАТЕЛЯ

В соответствии с основным содержанием теоретической части выполненной работы программа экспериментальных исследований предусматривает:

1. Создание опытного образца инерционно-импульсного вращателя планетарного типа на базе вертикально-сверлильного станка производственного назначения.

2. Экспериментальную проверку результатов теоретической части работы.

3. Исследование возможности применения инерционного вращателя в приводе сверлильного станка, в качестве попутной задачи.

На базе промышленного вертикально-сверлильного станка, типа 2А 125, был разработан и изготовлен опытный образец инерционно-импульсного вращателя, позволяющий выполнить комплекс динамических исследований в реальных условиях работы механизма.

В процессе экспериментальных исследований производилось измерение следующих параметров системы:

- 1) крутящего момента и осевой силы резания;
- 2) неравномерности вращения шпинделя станка;
- 3) неравномерности вращения двигателя 2;
- 4) средней активной потребляемой мощности двигателя 1;
- 5) подачи инструмента.

Для замера и записи исследуемых параметров использовались современные универсальные приборы и оборудование: фотоэлектрический датчик ФД1, тахогенератор ТТП-1, стробоскопический тахометр СТ-5, преобразователь мощности трехфазных электрических цепей ПОО4, генераторы сигналов ГЗ-34 и ГЗ-16, электронный частотомер ЧЗ-7, шлейфовый осциллограф Н700, тензометрический усилитель ТА-5, универсальный динамометр конструкции ВНИИ и т.д. Методика проведения эксперимента и использования оборудования в каждом конкретном случае описаны в работе.

Процесс экспериментальных исследований складывается из следующих этапов:

- 1) разработки методики экспериментальных исследований;
- 2) подготовки эксперимента;
- 3) выполнения эксперимента;
- 4) анализа и обработки полученных результатов.

Разработанная методика экспериментальных исследований учитывает порядок и объем намеченных исследований, позволяющих ответить на поставленные задачи.

Подготовка к экспериментальным исследованиям, в свою очередь, учитывает следующее:

- составление расчетной схемы образца импульсного вращателя;
- расчет режимов работы импульсного вращателя;
- аналитический расчет динамических характеристик привода на заданных режимах;
- определение и выбор параметров исследуемой системы, запись которых будет проводиться в процессе работы экспериментальной установки;
- выбор методов измерения соответствующих величин, установка и тарировка необходимых датчиков и аппаратуры.

Выполнение третьего этапа целиком определяется содержанием первого и второго.

Заключительный этап экспериментальных исследований заключается в обработке результатов, построении необходимых графиков, оценки точности измерений и выводах.

Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований указывает на их удовлетворительное совпадение. Расчетные значения исследуемых величин отличаются от экспериментальных на 5-15%. Допущение о постоянстве угловой скорости двигателя 2 вполне согласуется с экспериментальными данными при работе вращателя вне резонансной области.

Проведенные в настоящей работе экспериментальные исследования возможности использования импульсного вращателя в приводе сверлильного станка подтвердили эффективность применения крутильных вибраций при сверлении некоторых металлов при определенных параметрах импульсного режима обработки, прежде всего за счет облегчения стружкоудаления и снижения сил резания.

## В Ы В О Д Ы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований динамики инерционно-импульсных вращателей планетарного типа, как системы машина-нагрузка-двигатель, установлено:

1. Наиболее эффективной и целесообразной является схема инерционного вращателя с упругой связью между ведомым и ведущим звеньями с точки зрения требований, предъявляемых к импульсным вращателям, и динамических свойств привода.

2. Математическая модель инерционно-импульсных вращателей планетарного типа представляет собой систему нелинейных автономных дифференциальных уравнений. Данная система уравнений

принадлежит к широкому классу систем с вращающимися координатами, отличающихся той особенностью, что вращающиеся координаты изменяются по закону близкому к равномерному вращению. Поэтому для получения решения этой системы уравнений может с успехом использоваться один из наиболее распространенных методов нелинейной механики — метод малого параметра.

3. Использование при динамических расчетах статических характеристик электродвигателей, не учитывающих влияния электромагнитных явлений, может повлечь за собой неправильную оценку динамических свойств машинного агрегата. Поэтому при расчетах подобных систем следует использовать динамические характеристики двигателей.

4. С достаточной для инженерных расчетов точностью можно пренебречь колебаниями угловой скорости двигателя, служащего для изменения угловой скорости грузовых сателлитов, т.е. при расчетах её можно считать постоянной.

5. С использованием данной гипотезы при получении решения системы нелинейных дифференциальных уравнений методом малого параметра можно ограничиться первым приближением при задании коэффициента неравномерности ведомого звена в диапазоне до 0,3. Точность аналитического расчета при этом вполне достаточна для инженерных расчетов. Полученные аналитические формулы сравнительно просты и позволяют провести полное исследование динамических процессов, происходящих при движении импульсных вращателей, в зависимости от значений их исходных параметров.

6. В режиме, когда направление угловой скорости солнечного колеса совпадает с направлением вращения водила, получены условия, выполнение которых обеспечивает равномерное вращение всех звеньев механизма.

7. При одних и тех же исходных параметрах системы степень неравномерности вращения ведомого звена будет больше, если направление угловой скорости солнечной шестерни противоположно направлению вращения водила.

8. При определении максимальной величины динамической реакции на оси сателлита можно пренебречь действием реакции в зацеплении сателлита и солнечного колеса и кроме того при расчетах не учитывать влияние углового ускорения грузового звена. Однако,

пренебрежение угловым ускорением ведомого звена в некоторых случаях может привести к неточности результатов расчета, доходящих до 30%.

9. Полученные формулы для определения динамических нагрузок в узлах и звеньях импульсного механизма позволяют выявить закономерности их изменения в зависимости от исходных параметров системы.

Следует отметить, что для импульсных вращателей планетарного типа до определенного предела жесткости упругих элементов наименее напряженным является режим работы привода, при котором направление относительной угловой скорости сателлита совпадает с направлением вращения рабочего органа. Кроме того, с целью уменьшения динамических нагрузок на узлы и звенья механизма оптимальные параметры инерционного вращателя следует выбирать из области наименьших значений массы грузового звена и наибольших значений эксцентриситета сателлита.

На основании проведенных исследований разработана методика оптимального синтеза инерционно-импульсных вращателей планетарного типа при помощи специальных номограмм, исходя из основных данных, предъявляемых к ним.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах автора:

1. К возможности импульсного сверления отверстий. Сб. научн. трудов № 74. "Вопросы динамики, долговечности и надежности машин". ЧПИ, Челябинск, 1969 г.

2. Нелинейные колебания импульсного вращателя с одной степенью свободы (соавторы: Васин Г.Г., Леонов А.И.). Сб. научн. трудов № 123, "Проблемы машиностроения", ЧПИ, Челябинск, 1973.

3. Вибропривод сверлильного станка (соавторы: Васин Г.Г. и др.) Авт. свид. № 474403. "Бюллетень изобретений", № 23, 1975 г.

4. Нелинейные колебания инерционно-импульсного вращателя с двумя степенями свободы. Тезисы докладов. Первая Всесоюзная научно-техническая конференция по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, 1972.

5. Экспериментальные исследования импульсного вращателя на сверлильном станке. Тезисы докладов. Четвертая Всесоюзная научно-техническая конференция по вариаторам и передачам гибкой связью. Одесса, 1972.