

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ПОЖЕЛКО
Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО
ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА МОМЕНТА
С ОДНОЗНАЧНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИВОДЕ КАМНЕФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

(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
1975

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
имени Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.Ф.МАЛЫЕВ
кандидат технических наук, доцент С.П.БАЖЕНОВ

Ведущее предприятие - Армянский научно-исследовательский
институт камня и силикатов (г. Ереван)

Автореферат разослан " " 1975 года

Зашита диссертации состоится " " ноября 1975 года в
16 часов в аудитории 244 (конференц-зал) на заседании Совета по
присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов Челябин-
ского политехнического института имени Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой
диссертации, принять участие в заседаниях Ученого Совета или
прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу:
454044, г. Челябинск 44, проспект им. В.И.Ленина, 76, Ученый Совет.

УЧЕНЫЙ С�КРЕТАРЬ СОВЕТА
кандидат технических наук, доцент

(А.З.ХАММЕР)

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важных проблем современного машиностроения является автоматизация различных производственных процессов за счет установки в приводах машин автоматических бесступенчатых передач, обеспечивающих выполнение рабочих процессов на оптимальных режимах и упрощающих управление машинами.

Одним из перспективных видов таких передач являются инерционные трансформаторы вращающего момента (ИТВМ), состоящие из инерционного импульсного механизма (ИИМ) и выпрямителей импульсов инерционного момента в виде механизмов свободного хода, которые при их установке в ИТВМ получили название автологов. Применение в приводах машин инерционных трансформаторов обеспечивает автоматизацию процесса в широком диапазоне изменения момента сопротивления. Исследуемые в настоящее время схемы инерционных трансформаторов не обеспечивают регулирование амплитудно-частотных характеристик протекания цикла, что снижает надежность их работы, эффективность применения и ограничивает широкое использование ИТВМ.

Работоспособность ИТВМ в основном определяется надежностью работы автологов. Повышение надежности работы автологов может быть достигнуто путем совершенствования схемы трансформатора, а также улучшением эксплуатационных характеристик самих автологов.

Одним из путей совершенствования инерционных трансформаторов является использование регулирования их амплитудно-частотных характеристик протекания цикла в схеме полигармонического ИТВМ с однозначным выпрямителем, разработанной автором.

В качестве одного из новых перспективных объектов для применения ИТВМ, где могут быть использованы его автоматические свойства и импульсный характер силового воздействия, следует указать машины для резания природного камня.

Применяемые в настоящее время серийные машины содержат статические приводы рабочих органов и являются низкоэффективными и мало-производительными, особенно при резании камня средней и повышенной прочности в условиях постоянного изменения параметров процесса, в результате чего уровень производимых в СССР изделий из природного камня является явно неудовлетворительным, хотя по его запасам наша страна занимает ведущее место в мире.

Применение в машинах для резания камня полигармонических инерциальных трансформаторов, создающих направленное регулируемое динамическое воздействие на обрабатываемый камень, представляет значительный интерес, т.к. обеспечивает широкие возможности настройки на оптимальные режимы работы.

Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование полигармонического инерционного трансформатора момента с однонаправленным выпрямителем, разработка основ его расчета и проектирования, а также исследование эффективности его применения в приводе камнефрезерного станка.

Общая методика выполнения исследований. В диссертационной работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследований. Аналитические исследования выполнены на основе нелинейной теории динамики движения инерционно-импульсных силовых систем. Экспериментальные исследования проведены на базовом камнефрезерном станке БКС-3 с использованием современной измерительной аппаратуры.

Научная новизна. Для различных схем полигармонических планетарных импульсных механизмов выполнено исследование их характеристик на разных режимах работы трансформатора, в результате которого разработана схема обобщенного полигармонического планетарного ИИМ и предложена классификация полигармонических планетарных ИИМ с последующей оценкой нагруженности импульсных механизмов разных классов с помощью безразмерных параметров.

Для разработанной схемы полигармонического ИИМ с однонаправленным выпрямителем и обобщенным полигармоническим планетарным ИИМ составлены дифференциальные уравнения движения и получены при их решении с учетом результатов анализа цикла трансформатора точные аналитические зависимости, обеспечивающие расчет полигармонического трансформатора с любым числом гармоник инерционного момента при заданных соотношениях их частот, амплитуд и фазовых смещений. Выполнено исследование динамики полигармонического ИИМ в условиях переменного в течении цикла момента сопротивления для случая вязкого трения. Исследована нагруженность однозначного выпрямителя и рассмотрены различные варианты его осуществления.

Предложена методика проведения экспериментальных исследований на камнефрезерном станке принципиально новой схемы передачи камнефрезерного станка - автоматического инерционно-импульсного привода (ИИП) камнерезного инструмента, разработанного автором.

Практическая ценность. Проведенный комплекс исследований полигармонического ИТВМ позволил определить пути снижения нагруженности автолога и улучшения характеристик трансформатора за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла, что способствует повышению надежности его работы.

Экспериментальные исследования на серийном базовом камнефрезерном станке БКС-3 опытно-промышленного образца автоматического ИП с полигармоническим трансформатором показали, что при этом обеспечивается комплексная автоматизация и интенсификация процесса резания, а также предотвращается поломка привода при заклинивании инструмента, что позволяет повысить производительность процесса и снизить его энергоемкость в 1,3-1,5 раза. При этом обеспечивается резание твердосплавным инструментом ранее не обрабатываемого на станке камня повышенной прочности типа гранита. Получаемые при резании камня продукты разрушения в виде скола вместо мелкой пергированной пыли, имевшей место при статическом приводе свидетельствуют о более эффективном протекании процесса и способствуют снижению износа трущихся частей станка, а также улучшению условий труда рабочего.

Реализация работы. Разработанный автоматический инерционно-импульсный привод, содержащий полигармонический ИТВМ с однозначным выпрямителем внедрен на базовом камнефрезерном станке БКС-3 на производственном комплексе Армянского НИИ камня и силикатов (г. Ереван). Действующий образец камнефрезерного станка с автоматическим инерционно-импульсным приводом демонстрируется в павильоне "Геология" ВДНХ СССР в 1975-1976 г.г.

Экономический эффект от внедрения автоматического ИП на камнефрезерном станке при резании базальта по Армянской ССР составит 155 тыс. руб. в год.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, на заседаниях Челябинского филиала семинара по ТММ АН СССР, на первой научно-технической конференции молодых ученых Урала по комплексной механизации, электрификации и автоматизации горного производства (Свердловск, 1972), на Четвертой Всесоюзной научно-технической конференции по вариаторам и передачам гибкой связи

(Одесса, 1972), на Первой Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульским механизмам, приводам и устройствам (Челябинск, 1972), на Международном симпозиуме по теории вибрационной техники (Вильнюс, 1973), на научно-технической конференции по добыче, обработке и переработке природного камня Армянского НИИ камня и силикатов (Ереван, 1974).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 28 научных работ, в том числе 10 изобретений, приведенных в конце авторефера.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, задач перспективных исследований, содержит 119 страниц машинописного текста, 73 иллюстрации, 174 наименования библиографии и 3 страницы приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ показана актуальность проводимых исследований, определена цель работы, кратко изложено содержание всех глав диссертации.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ выполненный анализ различных схем инерционных трансформаторов показывает, что широкий научный поиск в СССР и зарубежных странах направлен на разработку и исследование моногармонических трансформаторов, отдельные недостатки которых - отсутствие регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла, затрудненные переходные процессы и значительная нагруженность автодогом - препятствуют их широкому применению.

Специальные исследования по инерционным трансформаторам момента, выполненные советскими учеными - А.С.Антоновым, М.Ф.Балжи, А.А.Благородовым, С.Л.Баженовым, В.Г.Белоглазовым, Р.Н.Боддаревым, Г.Г.Васиным, А.В.Герентейном, Б.Л.Диковским, В.И.Заславским, В.А.Злоказовым, С.Н.Комевниковым, Б.Н.Крыловым, С.М.Крупицким, А.И.Леоновым, С.Ф.Левиным, Б.А.Ляпуновым, В.Ф.Мальцевым, А.Ф.Машенко, А.Т.Полецким, А.П.Поляковым, В.А.Умняшкиным и др., позволили установить особенности их работы и заложить основы теории ИТМ.

При этом рассматривается моногармонические трансформаторы с двухзначным выпрямителем (обеспечивающим преобразование импульсов обоих знаков инерционного момента) в применении к тяговым и транспортным машинам (автомобили, тракторы, мотоциклы и др.), и отсутствуют исследования динамики трансформатора при переменном в течение цикла моменте сопротивления, что имеет место при его установке в различные технологические машины.

Одним из путей совершенствования инерционных трансформаторов является использование регулирования их амплитудно-частотных характеристик протекания цикла в схемах полигармонических ИТВМ, создающих полигармоническое динамическое воздействие на выходной вал, одной из которых является разработанная автором схема полигармонического ИТВМ с однозначным выпрямителем, в которой обеспечивается непосредственная передача импульсов момента на выходной вал.

В результате анализа различных схем инерционных импульсных механизмов установлено, что наиболее широкими возможностями варьирования параметрами обладают планетарные полигармонические ИИМ. Анализ эффективности применения полигармонических ИИМ в различных областях техники (в испытательных стендах, в инерционно-импульсном вращателе, в приводе для вибротранспортирования материалов) показывает, что наибольший эффект достигается при полигармоническом динамическом воздействии с неравными амплитудами импульсов разных знаков.

Анализ различных схем механических выпрямителей показал, что в применении для инерционных трансформаторов одним из перспективных типов являются выпрямители клинового типа (клиновые автологи), разработка схем которых уделяется большое внимание как в СССР, так и в других странах (США, ФРГ и др.).

С целью устранения их основного недостатка - значительных потерь на трение в период свободного хода в связи с установкой пружин со значительным усилием поджатия клиньев - в диссертации приведены разработки новых схем клиновых автологов: с эксплуатационной регулировкой, что позволяет снизить усилие пружины, и клинового уравновешенного автолога, в котором уравновешивание тангенциальных сил инерции клина осуществляется не пружинами, а рычагом с грузом за счет сил инерции груза, имеющим одностороннее взаимодействие с клином.

В качестве одной из основных перспективных областей применения инерционных трансформаторов следует указать машины для резания природного камня.

Из анализа работ в этой области, выполненных советскими учеными - В.Д.Абезгаузом, Р.В.Акоповым, Р.В.Акопяном, О.Д.Алимовым, Д.Д.Барканом, Л.И.Бароном, В.Л.Баладинским, Г.С.Белорусовым, Б.А.Ветровым, М.И.Гальпериным, Е.И.Кромским, М.Г.Лейкиным, Н.А.Милжаком, М.Н.Протодьяконовым, С.А.Панкратовым, В.Н.Потураевым,

П.А.Ребиндером, М.И.Смородиновым, И.А.Тер-Азарьевым, Н.А.Цытовичем, Л.А.Шрейнером и др., следует, что работа машин при резании природного камня происходит в условиях постоянного случайного изменения параметров процесса (физико-механических свойств камня, износа инструмента, величины снимаемого при обработке слоя камня и др.), которые невозможно учесть заранее при настройке машины на определенный режим работы.

Существующие серийные машины содержат статические приводы рабочих органов и являются низкоэффективными при работе в указанных выше условиях из-за отсутствия автоматизации и интенсификации режимов в сочетании с предотвращением приводов от поломки при заклинивании рабочего органа.

Анализ конструкции и работы камнефрезерного станка ЕКС-3, содержащего статические приводы рабочих органов и камнерезный твердосплавный инструмент в виде торцевой фрезы, показывает, что на станке имеют место указанные выше недостатки, а получаемые продукты разрушения камня в виде мелкодиспергированной пыли вызывают необходимость периодической очистки от них станка в процессе работы, способствуют повышению износа трущихся узлов станка и ухудшению условий труда рабочего.

Разными авторами установлено, что повышение эффективности процесса резания камня достигается при его динамическом нагружении за счет использования усталостных явлений в породе, например, при установке в приводах машин возбудителей импульсов момента в виде инерционных импульсных механизмов.

В соответствии с этим все инерционно-импульсные приводы (ИИП) можно разделить на 2 типа: I - неавтоматические ИИП, II - автоматические ИИП.

В настоящее время ИИП I типа исследованы только в камнерезной машине СМ-177А при добыче мрамора.

ИИП II типа применительно к машинам для резания природного камня рассматриваются впервые.

Таким образом, комплексная автоматизация и интенсификация режимов работы в сочетании с предотвращением поломок привода при заклинивании рабочего органа являются одними из наиболее актуальных проблем в области создания высокоеффективных машин для резания природного камня.

В соответствии с выполненным анализом в работе была поставле-

на задача исследования динамики полигармонического инерционного трансформатора момента с однозначным выпрямителем и эффективности его применения в приводе камнефрезерного станка.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приведены результаты исследования полигармонических инерционных импульсных механизмов.

С целью определения наиболее эффективного применения полигармонических ИИМ необходимо рассмотреть их основную динамическую характеристику – изменение полигармонического момента импульсного механизма на различных режимах работы трансформатора.

Определяя условия получения в схемах полигармонических ИИМ неравных амплитуд импульсов инерционного момента разного знака и варьируя при этом изменением их параметров, установлено, что наибольшее значение соотношения амплитуд равно числу гармоник инерционного момента независимо от схемы ИИМ и обеспечивается при следующем законе изменения инерционного момента:

$$M_u = j_z \cos \varphi_i + (j_z - 1) \cos 2\varphi_i + \dots + \cos j_z \varphi_i, \quad (1)$$

где j_z – число гармоник инерционного момента,
 φ_i – угол поворота сателлита ИИМ.

Исследование на режиме трансформации разных схем полигармонических планетарных ИИМ показывает, что при изменении частоты действия импульсов момента имеют место различные законы изменения их основной динамической характеристики, а также изменение формы импульсов момента.

В соответствии с этим, выбирая в качестве критерия классификации различных схем полигармонических планетарных ИИМ – степень изменения их основной динамической характеристики, можно все схемы разделить на следующие 2 класса:

I класс – ИИМ с постоянной основной динамической характеристикой (схемы полигармонических планетарных ИИМ с ведущим водилом),

II класс – ИИМ переменной основной динамической характеристики (схемы полигармонических планетарных ИИМ с ведущей центральной шестерней).

Исследование на режиме динамической муфты показывает, что за счет изменения параметров полигармонического ИИМ можно получать различные законы изменения характеристики динамической муфты. При этом установлены отличительные особенности характеристики ИИМ I и II классов на режиме муфты.

Из полученных результатов следует, что при необходимости создания различной основной динамической характеристики на разных режимах работы необходимо применять ИИМ II класса.

Исследование характеристик полигармонических ИИМ позволяет предложить путь улучшения переходных процессов - за счет регулирования характеристики муфты. Достигаемое при этом снижение перегрузки двигателя определяется числом гармоник инерционного момента и не нарушает автоматичности трансформатора.

Одним из актуальных вопросов при проектировании полигармонических планетарных ИИМ I и II классов является оценка нагруженности указанных схем с различными вариантами установки основных и дополнительных неуравновешенных сателлитов с целью обеспечения снижения нагруженности основных элементов импульсного механизма - подшипников сателлитов и зубчатых зацеплений за счет правильного выбора его схемы и параметров.

Для этого при рассмотрении разных схем ИИМ были введены 4 безразмерных параметра - коэффициенты отношения частот (ν) и амплитуд (μ) отдельных гармоник, отношение метрических размеров импульсного механизма (λ), и относительный эксцентриситет груза (K), полностью описывающие изменение нагрузок в планетарных ИИМ.

Используя указанные безразмерные параметры, полученные выражения для определения реакций в подшипниках сателлитов и зубчатых зацеплениях механизма, определенные при сохранении неизменных значений максимального инерционного момента (M_{\max}), угловой скорости ведущего звена (ω), и габаритов ИИМ (Γ), были сведены к следующим простым зависимостям:

$$R_i = \frac{M_{\max} \cdot c_i}{\Gamma} ; \quad N_i = \frac{M_{\max}}{\Gamma \cdot \cos \alpha} \cdot c_i , \quad (2)$$

где R_i - реакции в подшипниках основных и дополнительных сателлитов; N_i - реакции в зубчатых зацеплениях ИИМ, α - угол зацепления, c_i - безразмерные коэффициенты, содержащие параметры ν, μ, λ , и K .

В результате этого исследование нагруженности ИИМ разных классов значительно упрощается и было сведено к анализу изменения безразмерных коэффициентов " c_i ", из которого следует, что при различном числе сателлитов в схемах полигармонических планетарных ИИМ II класса по сравнению с ИИМ I класса реакция в кинематических

парах уменьшаются в 3–8 раз, а установка дополнительных сателлитов в зацеплении с основными обеспечивает снижение нагруженности элементов механизма по сравнению с другими схемами в 1,5–2 раза.

На основании полученных выражений выполнено исследование нагруженности подшипников скольжения сателлитов при выборе за критерии величины удельного давления (ρ) и значения произведения (ρU). При этом использование введенных безразмерных параметров также позволяет при анализе ограничиться рассмотрением изменения безразмерных коэффициентов " C_i ".

При этом приведены примеры выбора параметров полигармонических планетарных ИИМ при различных вариантах исходных данных из условия снижения нагруженности подшипников сателлитов и получены простые зависимости, позволяющие определить при проектировании полигармонического планетарного ИИМ его габариты и предельное допустимое по нагруженности механизма значение инерционного момента при заданном значении угловой скорости ведущего звена, из которых следует, что для увеличения момента необходимо применять низкооборотные двигатели.

Одной из актуальных задач при проектировании полигармонических ИИМ является выбор схемы механизма, в которой одновременно обеспечивается широкий диапазон варьирования амплитудно-частотными характеристиками при снижении нагруженности его элементов.

В соответствии с этим автором разработана схема обобщенного полигармонического планетарного ИИМ с установкой дополнительных сателлитов в зацеплении с основными и в которой обеспечивается возможность получения различных законов изменения импульсов инерционного момента.

Анализируя при этом изменение основной динамической характеристики ИИМ при изменении скорости ведомого звена по следующим критериям:

- 1) изменение амплитуды импульса момента ($M_{\text{u max}}$),
- 2) изменение формы импульса момента (M_{u}), разработана классификация полигармонических планетарных инерционных импульсных механизмов (рис. I).

В результате исследования для наиболее общего случая режимов движения выходного вала механизма установлено, что в полигармоническом ИИМ обеспечиваются различные законы движения выходного вала, включая нереализуемый в моногармонических ИИМ режим его прерывис-

того вращения, а величина момента сопротивления для случая знако-постоянного вращения выходного вала может быть меньше амплитуды инерционного момента в период движения.

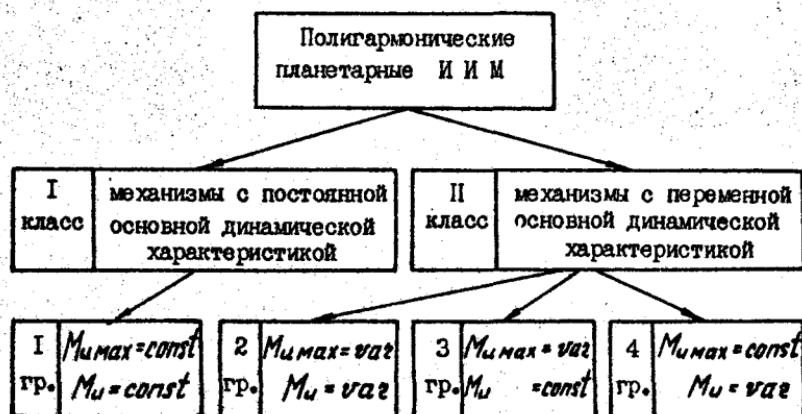


Рис.1. Классификация полигармонических планетарных инерционных импульсных механизмов

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена разработке и исследованию динамики полигармонического ИИМ с однозначным выпрямителем.

С целью осуществления в трансформаторе варьирования амплитудно-частотными характеристиками протекания цикла была разработана схема полигармонического ИИМ с однозначным выпрямителем, физическую модель которой можно представить (рис.2) состоящей из следующих элементов:

- 1) полигармонического ИИМ с ведущим звеном 1 и ведомым звеном 2, между которыми осуществляется полигармоническая инерционная связь,
- 2) однозначного выпрямителя 3, обеспечивающего замыкание импульсов момента одного знака на корпус,
- 3) выходного вала 4, на который приложен момент сопротивления, непосредственно соединенного с ведомым звеном ИИМ.

При этом для полигармонического ИИМ с однозначным выпрямителем с учетом обобщенного полигармонического планетарного ИИМ (гл-

ва I) получена система дифференциальных уравнений движения вида:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}\ddot{\theta} + a_{12}\dot{\varphi} + a'_{11}\dot{\theta}\dot{\varphi} + a'_{12}\dot{\varphi}^2 &= M_\theta - M_\psi \\ a_{12}\ddot{\theta} + a_{22}\dot{\varphi} + 0,5(a'_{22}\dot{\varphi}^2 - a'_{11}\dot{\theta}^2) &= z^{-1}M_\psi \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_{11} = & J_1 + J_2 + \pi_k m_k h_k^2 + \pi_k J_k \{ 1 - \nu_j^2 z^2 [1 - (-1)^{k+1}] \} + \dots \\ & \dots + 2\pi_k m_k e_k h_k \cos \varphi_k; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{12} = & -z^{-1} \{ J_2 + \pi_k m_k h_k^2 + \pi_k J_k [1 + (-1)^{k+1} \nu_j z] + \dots \\ & \dots + \pi_k m_k e_k h_k [2 + (-1)^{k+1} \nu_j z] \cos \varphi_k \}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_{22} = & z^{-2} \{ J_2 + \pi_k m_k h_k^2 + \pi_k J_k [1 + (-1)^{k+1} \nu_j z]^2 + \dots \\ & \dots + 2\pi_k m_k e_k h_k [1 + (-1)^{k+1} \nu_j z] \cos \varphi_k \}, \end{aligned} \quad (6)$$

где θ, ψ – углы поворота ведущего и выходного валов передачи,

φ – угол поворота сателлита, ν_j – коэффициент отношения частот гармоник инерционного момента, J_1, J_2, J_k – моменты инерции ведущих, ведомых звеньев передачи и неуравновешенных сателлитов; z – коэффициент цикличности; m_k, π_k, e_k, h_k – параметры импульсного механизма.

Для оценки изменения характеристики полигармонического трансформатора введен безразмерный критерий изменения режимов работы – коэффициент относительного момента сопротивления K_c , равный отношению момента сопротивления к максимальному инерционному моменту на стоящем режиме.

В результате анализа цикла трансформатора установлены условия начала и конца движения выходного вала, что позволило разделить полный цикл полигармонического ИТВМ с одноаналитическим выпрямителем на периоды движения и остановки выходного вала (с нагружением и без нагружения выпрямителя), используя которые получены точные аналитические зависимости для расчета его характеристик при $M_e = const$, которые с учетом выражений коэффициентов a_{11}, a_{12}, a_{22} для полигармонического ИТВМ с любым числом гармоник момента после преобразований имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\psi} = & z \omega_r \sqrt{1 - 2M_{max}[(\cos \psi_{i0} - \cos \psi_f) + \dots + \nu_j \nu_j^{-1} (\cos \psi_{j0} - \cos \psi_f) - K_c(1 + \mu_e + \dots + \mu_j)(\psi_f - \psi_{i0})]} \\ & J_2 \text{ при } \psi = \omega_r (1 + \mu_e + \dots + \mu_j) \\ = & z \omega_r \cdot Y; \quad (7) \qquad \dot{\psi} = \omega_r (1 - Y); \quad (8) \end{aligned}$$

$$\dot{\psi} = \frac{M_{\max} [(\sin \varphi_1 + \mu_1 \sin \varphi_2 + \dots + \mu_j \sin \varphi_j) / (z \cdot \dot{\psi})^2 - K_c (1 + \mu_2 + \dots + \mu_j)]}{T_2 \text{ приб. } (1 + \mu_2 + \dots + \mu_j)}; \quad (9)$$

$$\psi = \omega, t - z^{-1} (\varphi_1 - \varphi_{10}); \quad (10)$$

$$T_1 = \int_{\varphi_{10}}^{\varphi_1} (z \omega, \dot{\psi})^{-1} d\varphi; \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{2\pi \cdot (\varphi_{11} - \varphi_{10})}{z \omega}; \quad ; \quad (12) \quad K_c = \frac{\sin \varphi_{10} + \mu_1 \sin \varphi_{10} + \dots + \mu_j \sin \varphi_{10}}{1 + \mu_2 + \dots + \mu_j}, \quad (13)$$

где ψ , $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ - угол поворота, угловые скорость и ускорение выходного вала; $\dot{\psi}$ - угловая скорость сателлита; T_1 , T_2 - продолжительность периода движения и остановок выходного вала, z - коэффициент цикличности; ω - угловая скорость ведущего звена; φ_1 , φ_{10} - коэффициенты отношения амплитуд и частот гармоник инерционного момента; φ_{10} , φ_{11} - углы поворота сателлита, соответствующие началу и концу периода движения выходного вала.

Полученные зависимости позволяют оценить влияние изменения различных данных на характеристики трансформатора. Графики изменения основных характеристик полигармонического ИТВМ с однозначным выпрямителем при изменении скорости вращения ведущего звена и неизменных параметрах механизма приведены на рис.3 и показывают, что угол поворота выходного вала остается неизменным, а остальные характеристики изменяются по различным законам.

При этом установлено, что с увеличением коэффициента K_c продолжительность периода движения уменьшается, а продолжительность периода остановок возрастает.

Из выражения (8) получена зависимость для определения выходной характеристики полигармонического ИТВМ вида

$$i = 1 - \sqrt{1 - \frac{2M_{\max} [(\cos \varphi_{10} - \cos \varphi_1) + \mu_1 \mu_2 (\cos \varphi_{10} - \cos \varphi_1) - K_c (1 + \mu_2 + \dots + \mu_j) (\varphi_{11} - \varphi_{10})]}{T_2 \text{ приб. } 2 \cdot \omega_z^2 (1 + \mu_2 + \dots + \mu_j)}}, \quad (14)$$

где i - передаточное отношение максимальной внутренней скорости выходного вала к скорости ведущего звена передачи, из анализа которого установлено изменение i при изменении параметров трансформатора.

Используя полученные при решении дифференциальных уравнений движения зависимости, получено выражение для определения изменения мощности двигателя:

$$N = \frac{M_{\max} K_c \omega_z}{1 + 2\pi (z \cdot \varphi_{\max})^{-1}}, \quad (15)$$

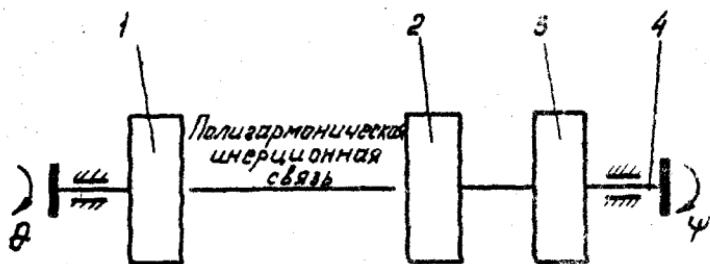


Рис.2. Обобщенная схема полигармонического ИTEM с однозначным выпрямителем

$M_{\text{имах}}, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \ddot{\psi}, T_1, T_2$

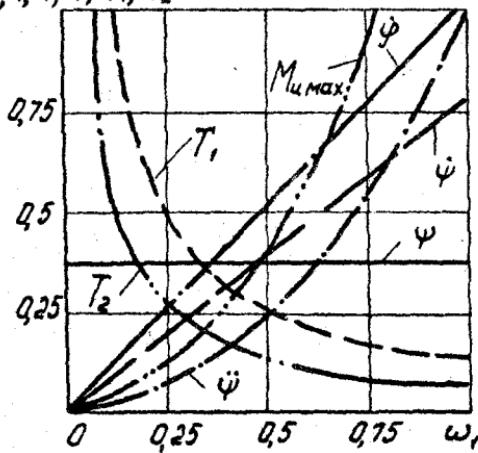


Рис.3. Изменение основных характеристик полигармонического ИTEM с однозначным выпрямителем

из анализа которого следует, что при остановке выходного вала ($\varphi_{max} = 0$) имеет место полная разгрузка приводного двигателя - это должно предотвратить в этом случае поломку передачи и выход из строя двигателя.

Одним из важных вопросов динамики ИТВМ является исследование нагруженности автолога, работа которого в полигармоническом ИТВМ с однозначным выпрямителем в общем случае имеет следующие особенности:

1) момент внешних сил действует на выходной вал и в период заклинивания автолога;

2) автолог нагружается импульсами полигармонического инерционного момента.

Из решения дифференциальных уравнений движения (3) с учетом указанных особенностей, после преобразований получено выражение для определения действующих на автолог нагрузок вида

$$M_A = (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2 + \dots + A_i \sin \varphi_i) - M_c, \quad (16)$$

из анализа которого следует:

1) наличие момента сопротивления на выходном валу способствует снижению нагрузок на автолог,

2) при выполнении равенства между слагаемыми в выражении (16) автолог полностью разгружается ($M_A = 0$), а функция выпрямителя выполняет внешнюю среду, т.е. схема трансформатора может быть выполнена без автолога.

В соответствии с этим можно выделить 2 основных типа однозначных выпрямителей:

I тип - механические выпрямители (автологи),

II тип - внешняя рабочая среда, взаимодействующая с выходным валом трансформатора.

Из анализа нагруженности автолога в полигармоническом ИТВМ с однозначным выпрямителем установлено, что с увеличением числа гармоник инерционного момента обеспечивается снижение нагрузок на автолог и более плавный характер их изменения за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла трансформатора.

Продолжительность нагружения выпрямителя зависит от величины коэффициента K_c и является наибольшей на столовом режиме и близких к нему режимах трансформации.

Предложен способ задания момента сопротивления в виде функции от угла поворота сателлита в период движения выходного вала,

обеспечивающего получение аналитических зависимостей характеристик трансформатора при различных законах изменения момента сопротивления, и установлено, что выходная характеристика трансформатора при работе в условиях вязкого трения смешается вниз к оси обсцисс.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведены результаты экспериментальных исследований полигармонического ИТВМ с однозначным выпрямителем в приводе камнефрезерного станка.

Из анализа различных работ в области исследования машин для резания камня следует, что их эффективность во многом определяется характеристиками главного привода-привода камнерезного инструмента.

В соответствии с этим после оценки эффективности применения в машинах различных схем ИТВМ была впервые разработана схема автоматического ИИП камнерезного инструмента, содержащая полигармонический ИТВМ с однозначным выпрямителем, в которой обеспечивается настройка на оптимальные режимы работы за счет варьирования амплитудно-частотными характеристиками привода в широком диапазоне.

Схема камнефрезерного станка с автоматическим ИИП приведена на рис.4 и содержит двигатель 1, инерционный импульсный механизм 2 и однозначный выпрямитель 3, образующие полигармонический ИТВМ, шпиндель инструмента 4 и обрабатываемый камень 5 на столе подачи станка 6.

Опытно-промышленный образец автоматического ИИП камнерезного инструмента, содержащий обобщенный полигармонический планетарный ИИМ и клиновой уравновешенный автолог, был смонтирован на базовом камнефрезерном станке БКС-3, содержащем камнерезный инструмент в виде торцевой фрезы, оснащенной пластинками твердого сплава ВУ-8.

Задачами экспериментальных исследований являлись:

1. Оценка возможностей снижения нагруженности автолога в полигармоническом ИТВМ за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла, а также частоты его нагружения при полигармоническом динамическом воздействии.

2. Исследование эффективности работы в автоматическом ИИП камнефрезерного станка различных типов однозначных выпрямителей (автолога и внешней среды).

3. Исследование эффективности работы автоматического ИИП с полигармоническим ИТВМ при резании разных пород камня в условиях переменного момента сопротивления.

4. Сравнительное исследование эффективности работы разных типов приводов камнефрезерного станка в условиях переменного момента сопротивления.

5. Проверка основных конструктивных решений автоматического ИИП в процессе работы камнефрезерного станка.

При этом была принята следующая методика проведения экспериментальных исследований:

1) Оценка нагруженности автолога производилась на наиболее нагруженном стоповом режиме с помощью тензодатчиков, наклеиваемых на корпусную обойму автолога, усилителя ПЭТ-ЗВМ и осциллографа Н-105.

Результаты эксперимента подтверждают снижение нагрузок на автолог в полигармоническом ИТВМ за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла и более плавный характер их изменения. Расхождение полученных результатов с теоретическими находится в пределах 8 + 12%.

При этом нагружение автолога происходит с частотой основной гармоники инерционного момента, что совпадает с результатами теоретических исследований.

Для оценки эффективности выполнения внешней средой в виде базальта функций однос�ичного выпрямителя в автоматическом ИИП ведомое звено ИИМ было установлено на валу шпинделя инструмента без автолога. Экспериментальные исследования показали, что в процессе работы привода имеют место крутильные колебания инструмента, приводящие к его разрушению, а резание камня отсутствует, что свидетельствует о том, что внешняя среда в виде базальта не выполняет функций однос�ичного выпрямителя.

2) С целью обеспечения переменных параметров процесса резания камня, изменяющихся по известному закону, поверхность камня предварительно обрабатывалась, а затем камень устанавливался под определенным углом к плоскости фрезы и при резании снимался слой камня переменной глубины, что обеспечивало последовательное осуществление различных режимов работы: холостого хода, резания камня и заклинивания инструмента.

В соответствии с указанной выше методикой производилось на станке НС-3 автоматическим ИИП с полигармоническим ИТВМ резание разных пород камня, охватывающих весь диапазон значений прочности камня (туфа - $\sigma = 150$ кг/см², мрамора - $\sigma = 530$ кг/см², базальта - $\sigma = 1380$ кг/см², гранита - $\sigma = 2050$ кг/см²). При этом с помощью

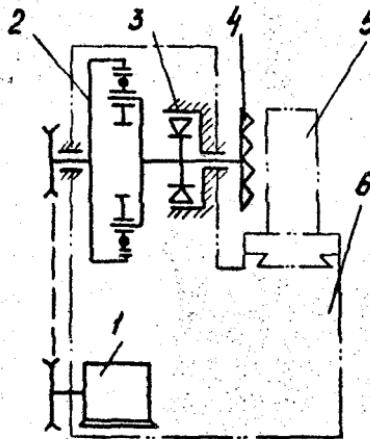


Рис. 4. Схема камнефрезерного станка с автоматическим инерционно-импульсным приводом

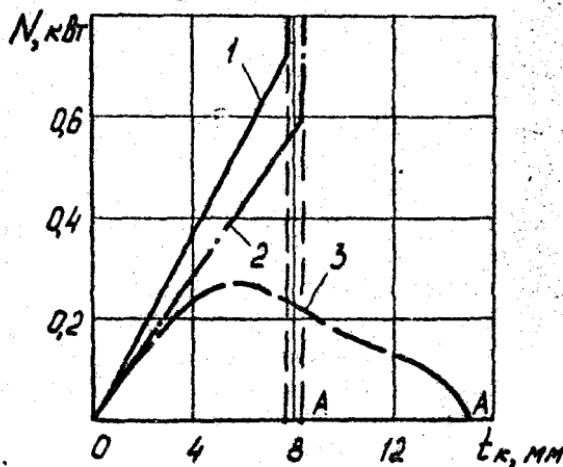


Рис.5. График изменения расхода мощности при резании базальта разными типами приводов инструмента:
1 - статический привод, 2 - неавтоматический ИИП,
3 - автоматический ИИП; А - точки заклинивания
инструмента

ваттметра Н-348 производилась запись расхода мощности на процесс резания, анализ которой показывает, что закон изменения мощности совпадает с теоретическим, а величина расхода мощности определяется физико-механическими свойствами камня и уменьшается с увеличением прочности породы от мрамора до гранита. При этом отмечается устойчивая работа автоматического ИИП при резании разных пород камня, а также надежность работы основных узлов автоматического ИИП (импульсного механизма, автолога) и системы смазки.

3) С целью обеспечения при исследовании разных типов приводов неизменных исходных параметров процесса (физико-механических свойств обрабатываемого камня, геометрии и степени износа инструмента, схемы установки резцов и т.д.) была разработана схема комплексного ИИП камнерезного инструмента, в которой путем несложных переключений обеспечивается реализация основных типов приводов: статического привода, неавтоматического ИИП и автоматического ИИП с ИТВМ.

Регистрация мощности осуществлялась при помощи ваттметра Н-348 с самописцем для режимов, последовательно включавших периоды холостого хода, резания камня и остановки инструмента при его заклинивании. Кривые изменения расхода мощности приведены на рис.5.

Из анализа полученных результатов следует, что применение автоматического ИИП обеспечивает повышение производительности процесса и снижение его энергоемкости в 1,3-1,5 раза, а при заклинивании инструмента двигатель не только не перегружается (кривые 1 и 2), а наоборот разгружается (кривая 3), что совпадает с теоретическими результатами.

Также при этом была произведена оценка продуктов разрушения разными типами приводов, из которой следует, что при резании автоматическим ИИП туфа, мрамора, базальта и гранита обеспечиваются продукты разрушения в виде скола, что свидетельствует о более эффективном протекании процесса.

Выводы

I. Обзор различных схем автоматических инерционных трансформаторов момента показал, что в моногармонических ИТВМ не обеспечивается регулирование амплитудно-частотных характеристик протекания цикла.

Одним из путей совершенствования инерционных трансформаторов является использование регулирования амплитудно-частотных характе-

ристик протекания цикла в схемах полигармонических ИТВМ, которые являются недостаточно изученными.

2. Исследование различных схем полигармонических ИИМ на разных режимах работы трансформатора показывают возможность улучшения его характеристики за счет варьирования изменения основной динамической характеристики ИИМ.

На основании полученных результатов разработана схема обобщенного полигармонического планетарного ИИМ и впервые предложена классификация полигармонических планетарных инерционных импульсных механизмов.

3. Исследование между собой с помощью безразмерных параметров нагруженности полигармонических планетарных ИИМ I и II классов показало снижение нагрузок в ИИМ II класса в 3-8 раз.

В ИИМ обоих классов целесообразно устанавливать дополнительные сателлиты в зацеплении с основными сателлитами.

4. Разработана схема полигармонического ИТВМ с однозначным выпрямителем, для которой с учетом обобщенного полигармонического планетарного ИИМ получены точные аналитические зависимости, обеспечивающие его расчет с различным числом гармоник инерционного момента при заданных соотношениях их амплитуд, частот и фазовых смещений.

5. Исследование характеристик трансформатора показывает, что в полигармоническом ИТВМ за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик протекания цикла обеспечивается снижение нагрузок на автолог с увеличением числа гармоник момента и более плавный характер их изменения в течение цикла.

Расхождение между экспериментальными и теоретическими результатами находится в пределах 8-12%.

6. Впервые выполнена оценка изменения характеристик трансформатора при его работе в условиях переменного в течение цикла момента сопротивления (вязкое трение).

При этом разработан способ задания момента сопротивления, позволяющий получить аналитические зависимости характеристик трансформатора при различных законах изменения момента внешнего сопротивления.

7. Одной из основных перспективных областей применения ИТВМ являются машины для резания природного камня, содержащие статические приводы рабочих органов и отличающиеся низкой эффективностью работы.

В соответствии с этим разработана новая схема передачи камнефрезерного станка - автоматический инерционно-импульсный привод,

содержащий полигармонический ИТВМ с однозначным выпрямителем, в которой обеспечиваются широкие возможности настройки за счет варьирования параметрами привода на оптимальные режимы работы.

Опытно-промышленный образец автоматического ИИП, содержащий ИТВМ с обобщенным полигармоническим планетарным ИИМ и разработанным клиновым уравновешенным автологом смонтирован на базовом камнефрезерном станке ЕКС-3.

8. Экспериментальные исследования на камнефрезерном станке ЕКС-3 разных типов приводов при резании туфа, мрамора, базальта и гранита на различных режимах (холостой ход, резание, заклинивание инструмента) позволили установить, что автоматический ИИП обеспечивает:

- 1) комплексную автоматизацию и интенсификацию режимов работы;
- 2) предотвращает поломку привода и двигателя при заклинивании инструмента;
- 3) получение продуктов разрушения в виде скола, что свидетельствует о более эффективном процессе резания по сравнению с серийным статическим приводом;
- 4) эффективную обработку камня повышенной прочности типа гранита;
- 5) повышение производительности процесса резания и снижение его энергоемкости в 1,3-1,5 раза.

При этом автоматический ИИП по сравнению с неавтоматическим ИИП позволяет упростить схему привода, снизить его вес и металлоемкость за счет выполнения по однопосточной схеме и исключения из схемы коробки скоростей.

9. Установлено, что при резании камня на станке с автоматическим ИИП расход мощности зависит от физико-механических свойств камня и с увеличением его прочности при резании мрамора, базальта и гранита уменьшается. Закон изменения расхода мощности в процессе работы соответствует теоретическому.

10. Экономический эффект от внедрения автоматического инерционно-импульсного привода на камнефрезерном станке по Армянской ССР составит 155 тыс. руб. в год.

• ЗАДАЧИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

I. Исследование динамики различных схем полигармонических инерционных трансформаторов момента с корпусным и выходным автологами, с двумя выходными автологами и др.

2. Исследование эффективности применения полигармонического ИТМ в приводе подачи машин для резания камня.
3. Исследование автоматических приводов рабочих органов технологических машин различного назначения (бетоносмесители, буровые станки, металлорежущие станки и т.п.) с установкой полигармонического инерционного трансформатора момента.
4. Исследование эффективности применения полигармонического трансформатора момента в динамических стендах ускоренных испытаний деталей и узлов машин с разными режимами нагружения исследуемых объектов.

5. Для повышения эффективности работы камнефрезерного станка с автоматическим ИМП необходимо провести исследование процесса разрушения природного камня и оптимальных режимов инерционно-импульсного фрезерования различных пород природного камня, а также определить рациональные параметры камнерезного инструмента.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

- I. Исследование инерционного трансформатора момента с полигармоническим импульсным механизмом.-В сб. № 142 "Машиноведение". Челябинск, ЧИИ, 1974.
2. Особенности применения инерционного трансформатора момента для автоматизации процесса резания камня. Там же.
3. Разработка новых вибрационных механизмов, приводов машин и устройств (в соавторстве). Труды международного симпозиума по теории вибрационных механизмов. Вильнюс, АН СССР, 1973.
4. К динамике инерционного трансформатора момента с однозначным выпрямителем (в соавторстве).-В сб. № 142 "Машиноведение". Челябинск, ЧИИ, 1974.
5. Исследование характеристик планетарных инерционных импульсных механизмов со спаренными сателлитами (в соавторстве). Там же.
6. Динамика инерционного трансформатора момента при знакопеременном за цикл моменте сопротивления (в соавторстве). Там же.
7. Исследование нагруженности планетарного импульсатора с ведущим эпициклом (в соавторстве).-В сб. № 125 "Машиноведение". Челябинск, ЧИИ, 1973.
8. Определение приведенного момента инерции реактора для различных схем планетарных импульсаторов (в соавторстве).-В сб. № 125 "Машиноведение". Челябинск, ЧИИ, 1973.
9. К анализу нагруженности инерционных полигармонических пла-

нетарных импульсных механизмов (в соавторстве). - В сб. № I29 "Динамика машин и рабочих процессов". Челябинск, ЧИИ, 1973.

10. Оценка влияния параметров инерционных полигармонических импульсаторов на их нагруженность (в соавторстве). Труды I-ой Всесоюзной научной конференции по инерционно-импульсным механизмам, приводам и устройствам. Челябинск, АН СССР, 1974.

11. О некоторых особенностях пространственных инерционных импульсаторов (в соавторстве). Там же.

12. Исследование полигармонического пространственного инерционного импульсатора (в соавторстве). Там же.

13. Исследование нагруженности некоторых схем планетарных инерционных импульсаторов с дополнительными сателлитами (в соавторстве). Тезисы 4-ой Всесоюзной научно-технической конференции по вариантам и передачам гибкой связью. Одесса, АН СССР, 1972.

14. Исследование автоматического инерционно-импульсного вращателя для выборозания горных пород (в соавторстве). Тезисы I-ой научно-технической конференции молодых ученых Урала по комплексной механизации, электрификации и автоматизации горного производства. Свердловск, СГИ, 1972.

15. О возможности повышения производительности камнерезных машин (в соавторстве). - В сб. № I25 "Машиноведение". Челябинск, ЧИИ, 1973.

16. Исследование режимов работы горной машины с импульсным приводом (в соавторстве). - В сб. № I38 "Выбор и эксплуатация тяговых и несущих органов горных шахтных установок". Магнитогорск, МГМИ, 1973.

17. Обоснование и область применения импульсного привода (в соавторстве). Там же.

18. Камнефрезерный станок с автоматическим инерционно-импульсным приводом (в соавторстве). Описание экспоната ВДНХ СССР. М., ВИЭМС, 1975.

19. Автоматическая планетарная инерционно-импульсная передача. Положительное решение ГК СМ СССР от 9.12.1974 по заявке № 1781761/25-28.

20. Автоматический планетарный инерционно-импульсный привод камнефрезерного инструмента. Авт.свид. № 422610.-"Боллетень изобретений", 1974, № 13.

21. Клиновая муфта свободного хода (в соавторстве). Авт.свид. № 453513.-"Боллетень изобретений", 1974, № 46.

22. Полигармонический инерционный импульсатор (в соавторстве). Авт.свид. № 456939.-"Боллетень изобретений", 1975, № 2.

23. Инерционный импульсатор (в соавторстве). Авт.свид. № 466358.-"Бюллетень изобретений", 1975, № 13.
24. Вибропривод сверлильного станка (в соавторстве). Авт.свид. № 474403.-"Бюллетень изобретений", 1975, № 23.
25. Инерционно-импульсный привод камнерезного инструмента (в соавторстве). Авт.свид. № 401514.-"Бюллетень изобретений", 1973, № 41.
26. Инерционно-импульсный привод камнерезного инструмента (в соавторстве). Авт.свид. № 409874.-"Бюллетень изобретений", 1974, № 1.
27. Инерционно-импульсный привод камнерезного инструмента (в соавторстве). Авт.свид. № 417301.-"Бюллетень изобретений", 1974, № 8.
28. Камнерезная машина (в соавторстве). Авт.свид. № 417302.-"Бюллетень изобретений", 1974, № 8.

Пожбенко
Владимир Иванович

Исследование динамики полигармонического
инерционного трансформатора момента
с одноволновым выпрямителем и эффективности
его применения в приводе камнефрезерного станка

Технический редактор Т.А.Лашёвина

ФБ 02429. Подписано к печати 24/IX-75 г. Формат бумаги 60x90/16.
Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧИИ. Тираж 120 экз.
Заказ № 327/1254..