**Козлов Сергей Александрович. Магнитно-импульсная метательная установка для испытаний на ударные воздействия : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 Владимир, 2006 216 с. РГБ ОД, 61:07-5/978**

На правах рукописи

Владимирский государственный университет



**МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МЕТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.02.02- машиноведение, системы приводов и

детали машин

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент каф. «Приборостроение и информационно­измерительные технологии» ВлГУ Татмышевский К.В.

Владимир 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

Стр

ВВЕДЕНИЕ 6

Глава 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ПО ВОПРОСУ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТНО­ИМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА 15

ГГ Общие замечания 15

1. Магнитно-импульсный привод для обработки металлов давлением. ] 7
2. Магнитно-импульсный привод для проведения испытаний различ­

ных материалов и изделий машиностроения 27

1. Применение магнитно-импульсного привода в других областях со­

временной техники 36

1. Магнитно-импульсный привод в системах активной защиты объек­

тов особой важности 40

1. Функционалвная схема и принцип действия магнитно­импульсного привода в системах активной защиты 40
2. Оценка эффективности магнитно-импульсного привода в ,

системах активной защиты 50

1. Перспективы развития магнитно-импульсного привода. Цель и за­дачи исследований 70

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНО­ИМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА 73

2. Г Физические основы ускорения твердых электропроводящих тел

импульсным магнитным полем 73

1. Основные уравнения теории магнетизма 73
2. Получение импульсных магнитных полей в системах с кон­денсаторными накопителями энергии 75
3. Методика расчета импульсного магнитного поля в зазоре

«индуктор-метаемое тело» 85

1. Электромагнитные процессы, протекающие в метаемом теле. 99
2. Давление импульсного магнитного поля 94
3. Силы, действующие на индуктор 97
4. Обзор методов расчета электромагнитных полей. Метод ко­нечных элементов 100
5. Уравнения движения метаемого тела Ю5
6. Обзор математических моделей и методик расчета основных па­

раметров процесса магнитно-импульсного ускорения твердых электропроводящих тел в магнитно-импульсном приводе ^ ^

1. Трехмерное математическое моделирование магнитно­импульсного привода 119
2. Трехмерное математическое моделирование магнитно­
3. Краткий обзор возможностей пакета моделирова­ния FEMLAB 119
4. Трехмерное моделирование импульсного магнит­ного поля плоского спирального индуктора 125
5. Трехмерное моделирование силового воздействия

импульсного магнитного поля плоского спирального ин­дуктора на осесимметрично расположенный индентор *133*

1. Трехмерное моделирование силового воздействия

импульсного магнитного поля плоского спирального ин­дуктора на индентор, смещенный относительно оси ин­дуктора 135

2.3.2. Трехмерное моделирование в пакете 3D Studio Мах процес­сов движения индентора в магнитно-импульсном приводе... 137

1. Результаты теоретических исследований магнитно-импульсного привода 145

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНО­ИМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА 148

1. Задачи экспериментальных исследований 14g
2. Общее описание опытного образца магнитно-импульсной мета­

тельной установки МИМУ-219-1 на основе магнитно-импульс­ного привода 149

1. Силовой блок МИМУ-219-1 154
2. Узел индуктора МИМУ-219-1 151
3. Пульт дистанционного управления МИМУ-219-1 155
4. Метаемое тело (индентор) 159
5. Регистрирующая аппаратура 172
6. Методика проведения экспериментов 179
7. Результаты экспериментальных исследований магнитно­

импульсного привода 182

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ 195

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа **«Магнитно-импульсная метательная уста­новка для испытаний на ударные воздействия»** посвящена вопросам эффек­тивного ускорения макротел (массой до 1 кг) до высоких скоростей с использо­ванием магнитно-импульсного привода в целях воспроизведения в лаборатор­ных условиях высокоскоростных ударных нагрузок, имеющих место при экс­плуатации различных изделий и материалов. Кроме того, работа так же посвя­щена вопросам ускорения групп макротел до высоких скоростей с использова­нием магнитно-импульсного привода в целях создания систем активной защиты объектов особой важности для повышения антитеррористической устойчивости последних.

Среди целого ряда разнообразных внешних механических воздействий, имеющих место при эксплуатации изделий и материалов, особо выделяют вы­сокоскоростные импульсные ударные нагрузки, характерной особенностью ко­торых является высокий уровень напряжений в материале и малая длительность импульса ударного давления. Задача проведения высокоскоростных ударных испытаний особенно актуальна при проектировании изделий и материалов авиационной, космической, военной техники - тех объектов машиностроения, работа которых происходит в условиях импульсных воздействий высокой ин­тенсивности. Известно, что свойства материалов и конструкций в значительной степени зависят от амплитуды и длительности ударного воздействия.

Цель ударных испытаний - проверка способности изделия выполнять свои функции во время ударного воздействия и после него. Главным условием при проведении испытаний является имитация внешних ударных воздействий таким образом, чтобы они достаточно точно соответствовали ударным воздей­ствиям при определенных условиях эксплуатации изделия. С экономической и методической точки зрения предпочтительно проведение испытаний в лабора­торных условиях при наличии универсального устройства, позволяющего вос­производить широкий набор внешних ударных воздействий.

При экспериментальном исследовании поведения объектов испытаний под действием высокоскоростных импульсных ударных нагрузок используют различные методы разгона тел до требуемых скоростей. Для решения данных задач в настоящее время применяют специальные схемы с использованием энергии удара, взрыва, электромагнитного поля и других источников импульс­ной энергии. Известные устройства разгона тел (многоступенчатые легкогазо­вые установки, устройства для взрывного метания, рельсовые треки, рельсо- троны и т.д.) позволяют получить скорости до 15 км/с для тел различных масс. Однако, построенные на основе указанных устройств стенды для проведения ударных испытаний, как правило, не предназначены для применения в лабора­торных условиях, поскольку являются громоздкими, достаточно сложными в обслуживании и эксплуатации, а так же экологически вредными. Кроме этого, большинство из подобных устройств ускоряют тела небольших масс (микро-, миллиграммы) [1].

Одним из наиболее перспективных методов решения задач эффективного разгона макротел до высоких скоростей для проведения ударных испытаний является использование энергии импульсного магнитного поля.

Испытательные установки, построенные на основе магнитно-импульсного привода, являются достаточно эффективным средством изучения поведения материалов и изделий при динамических воздействиях в лабораторных услови­ях. Подобные установки по своим показателям выгодно отличаются от анало­гичных устройств высокой степенью воспроизводимости испытаний, высокой производительностью испытаний, бесшумностью и экологичностью процесса испытаний, простотой обслуживания и относительно малыми габаритами, раз­нообразием форм и размеров метаемых тел и т.д.

Принцип высокоскоростного магнитно-импульсного метания твердых электропроводящих тел, лежащий в основе работы магнитно-импульсного при­вода, основан на возникновении механических сил отталкивания между про­водниками, по которым течет электрический ток - явлении, описываемом зако­ном Био-С авара-Лапласа.

Вопросами физики и техники получения сильных магнитных полей и применения их для метания твердых электропроводящих тел занимались науч­ные коллективы под руководством П.Л. Капицы, Г. Кнопфеля, Г.А. Шнеерсона, В.Н. Бондалетова, А.Н. Андреева, Г.Л. Башарина, К.В. Татмышевского. В даль­нейшем данное направление получило свое развитие в исследованиях ряда из­вестных ученых как в нашей стране, так и за рубежом.

Принцип действия магнитно-импульсных приводов, способных сообщать телам высокие скорости (до нескольких километров в секунду), предоставляет широкие возможности их применению в различных областях науки и техники. Подобные привода могут применяться для испытаний средств бронезащиты, для проведений испытаний на ударное нагружение взрывательных устройств боеприпасов и т.д.

В состав магнитно-импульсных приводов входят: накопитель энергии, коммутирующее устройство и индуктор. В качестве накопителей энергии ис­пользуются емкостные или индуктивные накопители. В качестве коммутирую­щего устройства в магнитно-импульсных приводах используются различного вида разрядники - вакуумные, высокого или атмосферного давления, с твердым диэлектриком. В качестве индукторов могут использоваться одновитковые со­леноиды, многослойные спиральные соленоиды, плоские одновитковые и мно- говитковые катушки - индукторы.

В данной диссертационной работе исследуется магнитно-импульсный привод в качестве индуктора в котором используется плоская спиральная ка­тушка-индуктор, в качестве накопителя энергии - емкостной накопитель (бата­рея высоковольтных импульсных конденсаторов), а в качестве метаемых тзл (инденторов) - твердые электропроводящие тела (рис. 1).

Индуктор является первичным контуром, с которым индуктивно связано метаемое тело (например, пластина), представляющая собой вторичный контур. При разряде емкостного накопителя на катушку-индуктор ток, протекающий в первичном контуре, наводит вихревые токи во вторичном контуре, в результате чего между индуктором и метаемым телом наводятся два противоположных по

направлению магнитных поліг. Это приводит к возникновению интенсивных пондеромоториых сил, за счет которых метаемое тело приобретает большую начальную скорость. Затем метаемое тело летит свободно до встречи с объек­том испытаний. Таким образом, в данном процессе энергия электрического по­ля емкостного накопителя (батареи конденсаторов) преобразуется в энергию магнитного поля индуктора, а затем в механическую работу выталкивания ме­таемого тела из зоны индуктивной связи индуктора, а также, частично, в тепло­ту. Возможны различные схемы метания, в зависимости от конструкции индук­тора.

Применение магнитно-импульсных приводов позволяет проводить в лабо­раторных условиях целый комплекс испытаний - на ударную устойчивость, на ударную прочность, на эрозионное изнашивание и т.д. При этом испытания мо­гут проводиться как методом прямого, так и обращенного пусков. Это в ряде случаев значительно упрощает как проведение испытаний, так и обработку по­лученной входе проведения испытаний измерительной информации. При испы­таниях методом обращенного пуска (например, для испытаний изделий авиа­космической техники) объект испытаний крепится неподвижно, а метаемое те­ло (плоская пластина в качестве имитатора преграды) разгоняется до требуемой скорости.

*Рис.1.*

*Схема метода магнитно-импульсного метания твердых электропроводящих тел с использованием плоской спиральной катушки-индуктора:*

1. *- емкостной накопитель;*
2. *- коммутирующее устройство;*
3. *-узел индуктора;*
4. *- метаемое тело (индеитор);*
5. *- объект испытаний*

При этом скорость метания определяется напряжением заряда емкостного накопителя. Материал и толщина метаемой пластины-имитатора преграды вы­бираются такими же, как у реальной преграды. Метание тел плоской формы при испытаниях является наиболее актуальной задачей, т.к. к процессу соуда­рения изделий авиакосмической техники с плоскими листовыми преградами может быть сведена существенная часть испытаний подобных изделий на функциональные возможности.

Кроме этого, как показал анализ, перспективной областью применения магнитно-импульсных приводов являются системы активной защиты объектов особой важности (для круглосуточной внутриобъектовой и наружной охраны).

Магнитно-импульсный привод, как устройство для метания готовых по­ражающих элементов наиболее полно соответствует требованиям, предъявляе­мым на данный момент к средствам поражения для систем активной защиты особо важных объектов. Магнитно-импульсный привод для систем активной защиты объектов особой важности обладает; возможностью быстрой автомати­ческой перезарядки; возможностью бесшумного метания групп тел поражаю­щих элементов различной формы; возможностью оперативного регулирования степени воздействия на нарушителя; возможностью управления траекторий по­ражающих элементов; возможностью применения в закрытых помещениях. При срабатывании магнитно-импульсного привода отсутствуют звук, вспышка, демаскирующие охраняемый объект. Значительно упрощается процедура при­ведения системы в готовность и, особенно, снятия ее с боевого состояния.

Однако существующие на сегодняшний день математические модели и основанные на них методики расчета магнитно-импульсных приводов позво­ляют проектировать привода только с осесимметричной конфигурацией систе­мы «индуктор-метаемое тело». Данные модели обладают двухмерным режимом расчета. Они не позволяют производить расчет неосесимметричных моделей; моделей где присутствуют, например, спиральные индукторы у которых обра­зующая рабочей поверхности отличается от плоской, или индукторы сложной формы, а так же комбинации индукторов. Кроме этого, подобные модели не по­зволяют производить расчет процессов ускорения групп тел, а так же тел слож­ной формы. Перечисленные недостатки существенно сдерживают дальнейшее изучение магнитно-импульсного привода.

Таким образом, на сегодняшний день существует необходимость создания трехмерной математической модели, лишенной вышеперечисленных недостат­ков, с помощью которой можно было бы адекватно описать широкий спектр процессов магнитно-импульсного ускорения твердых электропроводящих тел, а именно процессов управления траекторией движения метаемых тел с целью формирования заданных траекторий.

Проведенный анализ показывает, что результаты исследований, направ­ленных на изучение эффективного ускорения макротел до высоких скоростей1 с использованием высокоскоростного магнитно-импульсного привода, могут быть широко использованы как в испытательной технике, так и в технике средств обеспечения защиты и безопасности.

**Целью** диссертационной работы является создание научно обоснованных методов управления кинетическими параметрами движения метаемых магнит­но-импульсным приводом тел.

**В задачи** диссертации входят:

1. Анализ физических процессов, протекающих при магнитно-импульсном ус­корении твердых электропроводящих тел для выявления факторов влияю­щих на скорость и начальный угол метания;
2. Разработка трехмерной математической модели, адекватно описывающей процесс ускорения твердых электропроводящих тел импульсным магнитным полем. Целью математического моделирования является исследование воз­можности управления траекторией движения метаемых тел с целью форми­рования заданных траекторий;
3. Разработка трехмерной математической модели процесса магнитно- импульсного метания индентора (электропроводящей плоской пластины) при смещении индентора относительно оси плоского спирального индуктора с целью управления траекторией движения индентора;
4. Исследование возможности применения высокоскоростного магнитно­импульсного привода в системах активной защиты объектов особой важно­сти с целью повышения антитеррористической устойчивости последних;
5. Проведение экспериментальных исследований магнитно-импульсного при­вода.

Используемые в работе **методы** основаны на применении теории электроди­намики движущихся тел, электромагнитного поля, теоретических основ элек­тротехники, методов вычислительной математики, теории вероятности и мате­матической статистики, теории внешней баллистики, теории раневой баллисти­ки.

**Научная новизна** работы заключается:

1. В исследовании возможности управления траекторией движения метаемых магнитно-импульсным приводом тел. В разработке трехмерной математиче­ская модели процесса магнитно-импульсного метания индентора (электро­проводящей плоской пластины) при смещении индентора относительно оси плоского спирального индуктора;
2. В получении новых зависимостей углов движения индентора (пластинві) от величины смещения индентора относительно оси плоского спирального ин­дуктора;
3. В разработке методик проведения испытаний методом прямого и обращен­ного пусков с использованием магнитно-импульсного привода. В экспери­ментальном исследовании лабораторной магнитно-импульсная метательной установки на основе магнитно-импульсного привода. В экспериментальном исследовании процессов осесимметричного метания инденторов (плоских пластин), процессов метания инденторов под углом к оси индуктора, про­цессов метания групп тел, процессов метания непроводящих тел с помощью специального поддона;
4. В разработке методик оценки эффективности магнитно-импульсного приво­да в системах активной защиты объектов особой важности.

**Практическая ценность работы** определяется внедрением и использовани­ем основных положений, выводов и рекомендаций, полученных при исследова­ниях и разработке магнитно-импульсной метательной установки на основе маг­нитно-импульсного привода.

1. Разработана и апробирована лабораторная магнитно-импульсная метатель­ная установка на основе магнитно-импульсного привода для проведения ис­пытаний различных изделий и материалов на динамические воздействия;
2. Предложены практические рекомендации по выбору конструктивных и энергетических параметров магнитно-импульсного привода и характеристик метаемого тела;
3. Определены факторы влияющие на углы движения метаемых тел (для ин­дукторов диаметрами 50, 72 и 130 мм);
4. Разработана схема применения магнитно-импульсного привода в системах активной защиты объектов особой важности;
5. Разработана программа расчета для оценки эффективности магнитнб- импульсного привода в системах активной защиты объектов особой важно­сти.

Разработанные методики испытаний и результаты научных исследований внедрены: в ФГУП «ФНПЦ «Прибор» (г. Москва) и во Владимирском государ­ственном университете.

Материалы диссертационной работы используются в НИР с ФГУП «ФНПЦ «Прибор» (г. Москва) «Разработка магнитно-импульсного метательно­го устройства для динамических испытаний выстрелов и их составных частей методом обращенных пусков».

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

По результатам теоретических и экспериментальных исследований магнитно-импульсного привода в рамках данной диссертационной работы были сформулированы следующие основные научные результаты и выводы:

1. Проведен анализ особенностей применения магнитно-импульсных приво­дов в установках для ударных испытаний. Доказано, что установки на основе таких приводов являются эффективным средством изучения поведения мате­риалов и изделий при ударных воздействиях в лабораторных условиях. Сформулированы основные требования к подобным установкам.
2. Разработана трехмерная математическая модель процесса магнитно­импульсного ускорения индентора (электропроводящей плоской пластины) при смещении индентора относительно оси плоского спирального индуктора; исследована возможность управления траекторией движения индентора с це­лью формирования заданных траекторий. Исследовано влияние величины смещения индентора относительно оси индуктора на угол движения и угол поворота индентора. Установлено, что угол движения и угол поворота ин­дентора зависят от величины смещения индентора относительно оси индук­тора.
3. Разработаны структурные и функциональные схемы устройств на основе' магнитно-импульсного привода для испытания материалов и изделий на ударные воздействия.
4. Разработана и исследована магнитно-импульсная метательная установка на основе магнитно-импульсного привода для проведения испытаний раз­личных материалов и изделий на ударные воздействия в лабораторных усло­виях.
5. Приведены основные технические характеристики разработанной магнит­но-импульсной метательной установки и принципиальные схемы основных узлов и блоков. Обоснованы особенности выбора и указаны основные тех­нические требования к элементам силового блока, узлу индуктора, метаемо­му телу. Предложены практические рекомендации по выбору конструктив­ных и энергетических параметров магнитно-импульсного привода и характе­ристик метаемого тела.
6. Разработана и впервые реализована методика проведения испытаний ме­тодом обращенного пуска с использованием магнитно-импульсного привода. Методом физического моделирования подтверждены основные положения теории и адекватность разработанной математической модели. Эксперимен­тально установлены основные закономерности изменения углов движения и углов поворота инденторов. Экспериментально доказано, что изменяя значе­ние величины смещения индентора относительно оси индуктора можно ме­нять углы движения инденторов относительно оси индуктора, тем самым управлять траекторией движения метаемых тел. Экспериментально подтвер­ждена возможность метания магнитно-импульсным приводом групп тел, тел сложной формы, в том числе тел из непроводящих материалов с помощью специальных поддонов.
7. Разработана методика оценки эффективности магнитно-импульсного при­вода в системах активной защиты объектов особой важности. Доказано, что магнитно-импульсный привод, как устройство для метания готовых пора­жающих элементов является эффективным средством поражения при созда­нии систем активной защиты объектов особой важности.

Разработана компьютерная программа расчета эффективности магнитно­импульсного привода в системах активной защиты. Программа позволяет по­лучить зависимости, характеризующие процесс полета метаемых тел и взаи­модействия их с биообъектом в зависимости от параметров привода.





1. ­­
2. ­­­­
3. 
4. ­­
5. ­­­­­
6. ­­­­­
7. ­­­

­­­