

*На правах рукописи*

ПУЛЕНЕЦ Николай Евгеньевич

**РОТОРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ,  
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ  
БОЛЬШИХ УСКОРЕНИЙ**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение,  
системы приводов и детали машин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Дьяченко Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Каразин Владимир Игоревич  
кандидат технических наук, доцент  
Балашов Алексей Леонидович

Ведущая организация: ОАО «ВНИИ Трансмаш»

Защита состоится «15» мая 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Ваши отзывы на автореферат диссертации (2 экз., заверенные печатью учреждения) просим отправлять по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, ГОУ ВПО «СПбГПУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.12.

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.229.12 кандидат  
технических наук, профессор



Евграфов А.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Известно, что применимость различных разрабатываемых технических средств определяется по результатам испытаний, виды и типы которых устанавливаются стандартами, а конкретное содержание программ испытаний и режимов применительно к конкретным объектам испытаний различных классов определяется нормативными документами различных уровней.

Задачи оценки предельных возможностей при создании роторов различных конфигураций актуальны для испытательных центрифуг, однако проработки в этом направлении немногочисленны. Можно отметить только диссертацию Г.А.Дуброва и его публикации.

Значительный вклад в теорию и практику проектирования роторных стендов в 60-80 гг. XX века внесли ученые Ленинградского политехнического института (ныне СПбГПУ): Г.А.Смирнов, В.А.Дьяченко, Ал.Н.Тимофеев, Ан.Н.Тимофеев, В.И.Каразин, С.А.Ковчин и др. Из других российских коллективов следует отметить специалистов Владимирского государственного университета.

Основной объем исследований приходится на динамику колебаний. Из работ последних двух десятилетий в первую очередь следует отметить монографии И.А.Биргера, Б.Ф.Шорра, Г.Б.Иосилевича, А.В.Левина, К.Н.Боришанского, Е.Д.Консона, А.С.Кельзона, Ю.П.Циманского, В.И.Яковлева. Колебания роторов исследовались в работах И.И.Вульфсона, В.Л.Вейца. В этих источниках основное внимание уделяется расчету собственных частот, на которых возможны резонансы, и соответствующих форм свободных колебаний, оценкам влияния статических и динамических небалансов, построению процедур балансировки, анализу возможностей снижения уровней резонансных колебаний и ухода от резонансов, анализу процессов прохождения через резонансы и т.д.

Теоретической основой для расчета роторов стендов рассматриваемого типа следует считать теорию быстро вращающихся

роторов, которая основывается на общих уравнениях динамики твердого тела и теории колебаний. В прикладных аспектах эта теория развивалась в значительной мере применительно к турбомашинам, турбогенераторам, компрессорам и пр. Наиболее сложные модели рассматривались для валов с дисками, на которых закреплены лопатки, имеющие сложную геометрию.

В настоящее время имеется потребность в центрифугах, которые способны создавать очень большие линейные ускорения (порядка  $60000 \text{ м/с}^2$ ), тогда необходимо «выжимать» из конструкций все предельные возможности, при условии сохранения прочности ротора. При этом наиболее простые конструктивные решения часто оказываются неудовлетворительными. Рассматриваемые в этой диссертации роторы центрифуг в качестве объектов проектирования, в отличие от роторов большинства других машин, обладают той особенностью, что при задании в технических требованиях максимального ускорения и желаемого радиуса установки испытуемого объекта в принципе допускаются широкие пределы варьирования общих форм и отдельных элементов ротора. Поэтому после анализа возможностей удовлетворения в принципе требованиям по ускорению и радиусу ротора необходимо проводить сопоставительный анализ большой совокупности возможных вариантов конструкций, рассчитываемых по различным расчетным моделям и при использовании разнообразных средств анализа. Подобные комплексные исследования до сих пор не проводились.

Для комбинированных сложных конструкций, в которых некоторые узлы заданы, а на параметры других налагаются различные ограничения, как правило, не находятся аналитические решения. Соответствующие задачи расчета прочности и деформаций решаются методом конечных элементов на компьютере при использовании специального программного обеспечения, такого как CosmosWorks, AnSys, ProEngineer и др.

Однако, несмотря на то, что конструкции роторов центрифуг не относятся к категории самых сложных деталей машин, представляет

трудности преимущественно подробный содержательный анализ результатов. Подобные работы до сих пор не проводились.

Вследствие этого тема данной диссертации, посвященной исследованию различных типов и конфигураций роторов и разработке комплекса обоснованных рекомендаций при проектировании роторных стендов, – испытательных центрифуг - предназначенных для воспроизведения больших ускорений, является актуальной.

**Целью работы** данной диссертации является разработка методик оценки предельных возможностей и обоснованного выбора роторов испытательных центрифуг, предназначенных для воспроизведения больших линейных ускорений, обобщение и развитие методик расчета их прочностных характеристик.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- систематизация требований к механическим характеристикам испытательных центрифуг и их роторов;
- анализ возможных схемных и конструктивных решений роторов испытательных центрифуг, их классификация, формулировка предложений по новым конструкциям высоконагруженных роторов;
- построение расчетных схем основных вариантов высоконагруженных роторов испытательных центрифуг, обобщение и развитие методик их расчета; разработка рекомендаций по выбору их основных параметров;
- вывод и обоснование критерия оценки предельных возможностей роторов центрифуг, предназначенных для воспроизведения больших ускорений, исходя из условий обеспечения заданных запасов прочности;
- формулирование требований к устройствам крепления испытуемых изделий на роторе центрифуги, обоснование и постановка задачи их силового и контактного взаимодействия;

- применение разработанных в диссертации методик оценки предельных возможностей и расчета конструкций роторов испытательных центрифуг при разработке роторного стенда ПЦ-14 «Энергия».

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- развитие методик расчета стержневых и осесимметричных роторов центрифуг и вывод критерия предельных возможностей, обеспечивающего определение граничных значений областей функционирования роторов центрифуг;

- обоснование и постановка задачи разработки методик расчета и проектирования устройств крепления испытуемых изделий на роторе центрифуги с учетом их силового контактного взаимодействия;

- применение методик расчета, проектирования и оценки предельных возможностей роторов испытательных центрифуг на примере центрифуги ПЦ-14 «Энергия».

Внедрение полученных в диссертации результатов осуществлено в плане анализа технических требований, предварительного и окончательного расчета вариантов конструкции ротора испытательной центрифуги ПЦ-14 «Энергия». Обоснованность и достоверность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами их практического использования при доработке и испытаниях центрифуги ПЦ-14 «Энергия».

**Методы исследования.** Геометрические, кинематические, силовые, прочностные и динамические характеристики роторов исследовались с использованием методов аналитической геометрии, теории механизмов и машин, теоретической и аналитической механики, методом конечных элементов (*CosmosWorks*). При расчетах были использованы также пакеты математических вычислений «*Maple*» и «*MathCad*».

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

- установлено, что для роторов испытательных центрифуг предельные режимы, устанавливаемые из условий прочности,

определяются произведением максимального ускорения  $a$  на радиус ротора  $R$  или окружной скоростью  $V$ ;

- показано, что существует единый, устанавливаемый из условий прочности, критерий достижимости предельных режимов для разных схем несущих частей роторов в виде стержней (балок), дисков постоянного или переменного сечений, или колец;

- для многопозиционных стендов целесообразно использовать конструкцию с кольцевым, бесцентровым кусочно-дуговым ротором; чтобы избежать его изгиба протяженные кусочно-дуговые участки должны иметь определенную форму в виде многоугольника с криволинейными сторонами, позволяющую избежать их изгиба; определены пути построения решетчатых конструкций;

- для типовых элементов роторов, работающих на растяжение и на изгиб, получены условия, при которых можно пренебрегать изгибом;

- для типовых принципиальных решений установочных устройств для базирования и закрепления испытываемых объектов сформулированы и формализованы задачи расчета прочности и предложены пути построения соответствующих математических моделей.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что в ней предложены и обоснованы критерии, позволяющие при анализе технических требований на испытательные центрифуги, предназначенные для воспроизведения больших перегрузок, оценивать принципиальную возможность их создания, а при установленной возможности реализации – обоснованно выбирать конструктивные схемы и затем проводить необходимые расчеты конструкции ротора и его элементов на прочность и определять его деформации.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях СПбГПУ в 2005 и 2006 гг., на семинарах кафедры «Автоматы» СПбГПУ, а также на IV международной научно-практической

конференции СПбГПУ в 2006г. По результатам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Список использованной литературы содержит 121 наименование. Общий объем диссертации 168 страниц, в тексте имеется 91 рисунок и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, приведен краткий обзор содержания диссертации по главам. Основной материал диссертации распределен по четырем главам.

В **первой главе** проведен конструктивный и функционально-параметрический анализ роторов центрифуг, исследованы методы их расчета и выявлены основные недостатки. Определено место испытательных центрифуг в классе машин с быстро вращающимся ротором. Приведены сведения из истории разработки центрифуг различного назначения, в том числе и технологических. Особое внимание обращено на сведения о разработках в рассматриваемой области, выполненных в ЛПИ (СПбГПУ), в частности, на кафедре «Автоматы» в 60 - 80 гг. Отмечено, что при большом числе публикаций по различным аспектам данной тематики, вопросы расчета и проектирования роторов центрифуг проработаны недостаточно, особенно в плане выявления их потенциальных возможностей. Многообразие возможных схемных решений представлено в виде классификационной схемы (рис.1), разработанной автором.

Далее в этой главе проанализированы типовые требования, предъявляемые к испытательным центрифугам, из которых в качестве основных выделены требования к величине радиуса  $R$  установки





Рис.1. Классификационные признаки роторов центрифуг

испытуемого объекта, по диапазонам угловой скорости  $\omega$  и воспроизводимого ускорения  $a$ , по прочности, по точности и ограничения на увеличение радиуса. В связи со спецификой темы диссертации, особое внимание уделено выявлению предельных возможностей роторов при совместном учете требований к прочности и параметрам режимов испытаний. Детально проанализирована специфика требований к испытательным центрифугам и выявлены вытекающие из этих требований особенности принципиальных и конструктивных решений центрифуг в целом, их роторов и основных узлов. В заключение главы формулируются задачи научных исследований, представленных в диссертации.

**Вторая глава** посвящена разработке методик расчета роторов центрифуг в тех случаях, когда ротор реализуется в виде прямолинейной и работающей только на растяжение радиальной балки, несущей на конце устройство для установки и закрепления объекта испытаний. Рассмотрены

случаи постоянного, ступенчато или линейно изменяющихся сечений ротора. Во всех случаях одинаковы постановка, схема решения задач, совокупность ограничений, используемые критерии и методология анализа результатов. Считаются задаваемыми радиус  $R$  установки объекта и максимальное ускорение  $a$ , показано, что эти два требования сводятся к одному требованию на их произведение или на ограничение максимальной окружной скорости  $V$  испытываемого объекта.

Уравнение для силы растяжения, обусловленной распределенными и сосредоточенными центробежными силами, изменяющимися по радиусу имеет вид

$$dF = -S(r)\rho r\omega^2 dr,$$

где  $S(r)$  – площадь сечения, в общем случае изменяющаяся по радиусу,

$\rho$  – плотность материала.

При  $r = R$  задается граничное условие  $F$ :

$$F(R) = m_0 a,$$

где  $m_0$  – масса испытываемого объекта вместе с массой установочного устройства.

При постоянном сечении по заданному допускаемому напряжению определяются площади сечений

$$S_{\min} = \frac{am_0}{\sigma_{\text{дон}}} \cdot \left(1 - \frac{a\rho R}{2\sigma_{\text{дон}}}\right)^{-1},$$

а затем и массы несущей части ротора (стержня) и его удлинение. Рассмотрены случаи постоянного сечения, сечения, изменяющегося по радиусу ступенчато и линейно. Показано, что критерий реализуемости имеет вид

$$\psi = \frac{a\rho R}{2\sigma_{\text{дон}}} < 1.$$

Таким образом, доказано, что во всех случаях имеет место жесткое

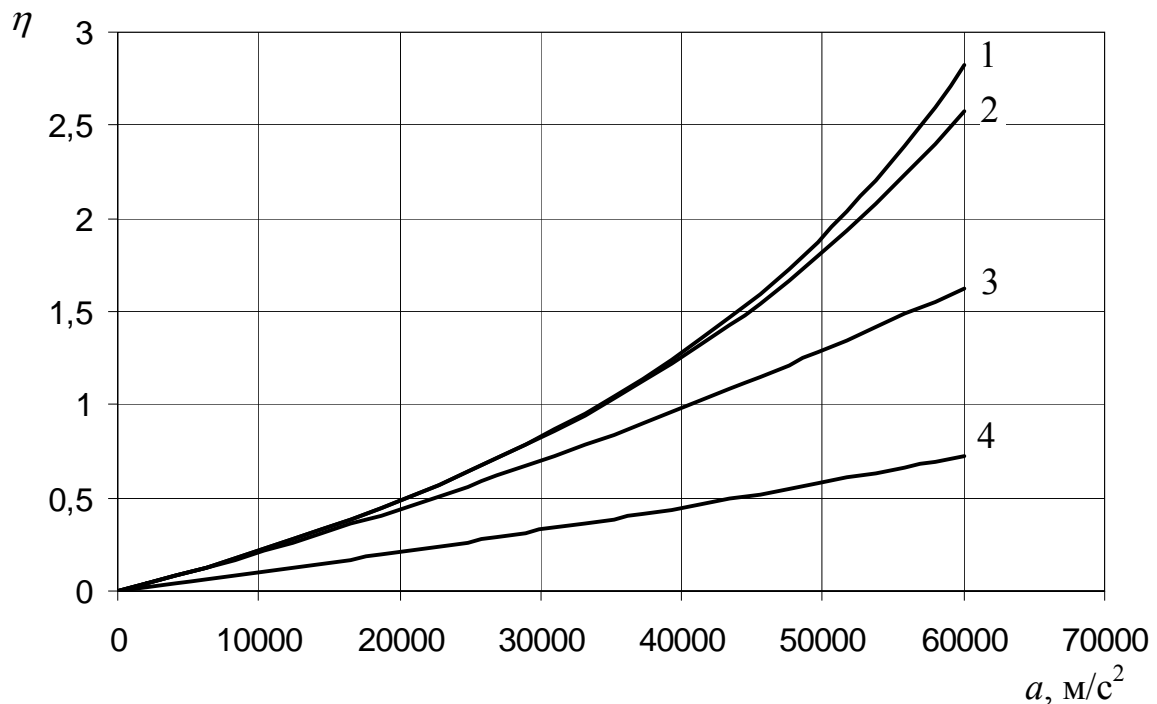


Рис.2. Зависимость отношения масс ротора и объекта испытаний от воспроизводимого ускорения

1 – постоянная площадь сечения; 2 – ступенчато-изменяющаяся площадь сечения; 3 - линейно-изменяющаяся площадь сечения; 4 – стержень равного сопротивления

ограничение на произведение радиуса  $R$  на ускорение  $a$  или, что тоже самое, на окружную скорость  $V$ ; уровень ограничения пропорционален отношению допускаемого напряжения  $\sigma_{дон}$  материала к его плотности  $\rho$ . По мере приближения к ограничению ( $\psi = 1$ ) потребная масса  $m = \rho R \int S(r) dr$  ротора растет, графическая интерпретация зависимости отношения массы ротора к массе испытуемого изделия  $\eta = m/m_0$  для постоянной (1), ступенчато (2) и линейно изменяющейся (3) площади сечения представлены на рис.2.

Рассматривается также случай балки равного сопротивления (на рис.2 кривая 4), для которой строгое ограничение на произведение радиуса и ускорения отсутствует. Однако при увеличении указанного произведения ( $V^2 = (aR)^2$ ) выше определенного уровня требуемая масса ротора начинает

быстро расти. В заключение главы рассмотрены задачи расчета ротора с конструкцией параллельных стержней, которые помимо растяжения подвергаются также и изгибу. Получены ограничения по прочности на подобные конструкции.

**Третья глава** посвящена разработке методик расчета основных характеристик несущих частей многопозиционных роторов центрифуг в тех случаях, когда ротор реализуется по нетрадиционным схемам, а также установочных устройств. Из нетрадиционных схем с точки зрения полноты исследования представляет особый интерес кольцевая бесцентровая схема; в этом случае центральный шпиндель отсутствует, а приводной двигатель располагается по кольцу. Объекты испытаний устанавливаются равномерно по окружности (рис.3).

Показано, что для устранения изгиба элементов контур кольца должен представлять собой многоугольник со сторонами определенной кривизны, в соответствии с разработанной методикой определены пути построения решетчатых конструкций (рис.4). В заключение главы рассмотрены задачи анализа условий работы устройств для установки испытуемого объекта. Рассмотрены различные случаи взаимодействия испытуемого объекта и установочной плиты, предложены пути устранения его деформации при изгибе установочной плиты.

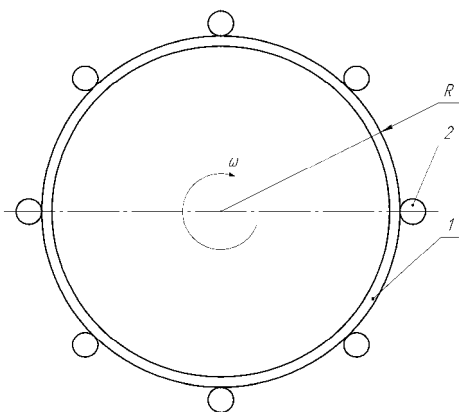


Рис.3. Кольцевой ротор

1 – кольцевой ротор, 2 – испытуемое изделие

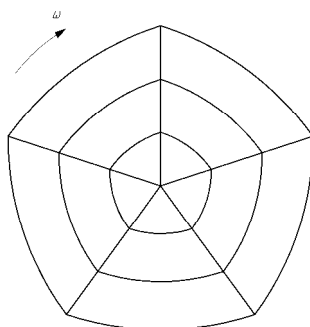


Рис.4. Решетчатая конструкция ротора, исключая изгиб дуг

Показано, что при расчете элементов установочного устройства, работающих на изгиб, необходимо учитывать характер контакта с ним основания объекта и контактные напряжения. При рассмотрении изгиба важно корректное описание свойств основания испытываемого объекта и вытекающее из этого описание распределение поверхностных напряжений по площади.

**Четвертая глава** содержит описание результатов расчета и проектирования испытательной центрифуги ПЦ-14 «Энергия», в создании которой принимал участие автор. Ее основные параметры: масса испытываемого объекта 50 кг, радиус установки объекта 1,0 м, максимальное воспроизводимое ускорение  $50000 \text{ м/с}^2$ .

На основе разработанной автором методики произведен анализ технических требований и показано, что конструкция ротора выполнима на основе балки постоянного сечения. Приведено сокращенное техническое описание всего комплекса центрифуги.

Далее, следуя алгоритму проектирования, поставлены и решены задачи определения напряжений, деформаций и упругих перемещений под действием центробежных сил для нескольких вариантов конструкции ротора. Ввиду наличия сочетаний сложных форм и сопряжений осуществлены компьютерные расчеты методом конечных элементов с помощью пакета программ *CosmosWorks*.

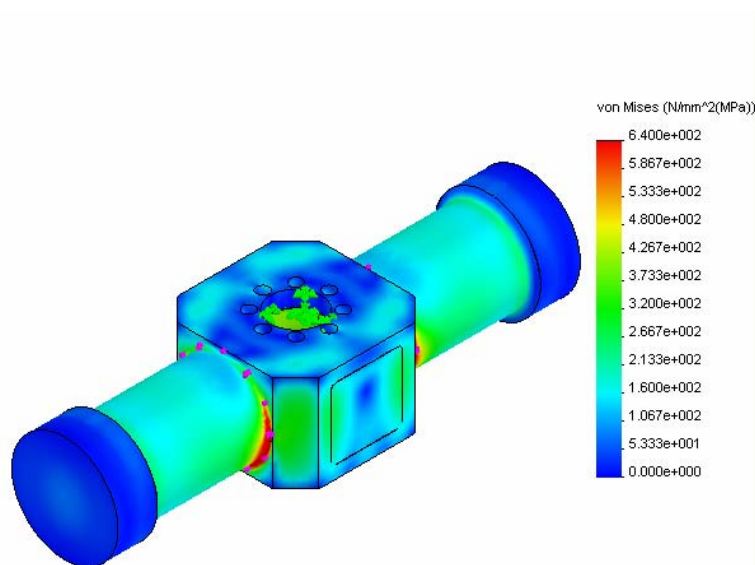


Рис.5. Распределение нормальных напряжений ротора

Приведены данные о программе расчетов. Результаты расчетов представлены наглядно в виде эпюр. Рассчитанное методом конечных элементов для одного из вариантов распределение нормальных напряжений по поверхности ротора представлено на рис.5.

По результатам расчетов был забракован первый вариант с несимметричной центральной частью. Приемлемыми по критериям прочности оказались два других варианта конструкции. Последним является вариант конструкции ротора с четырьмя параллельными штангами.

В отношении прочности «слабым» местом оказалась установочная плита, на которую устанавливается и к которой крепится испытуемый объект. По результатам расчетов распределений нормальных напряжений методом конечных элементов была разработана конструкция установочной плиты, удовлетворяющая требованиям заданного запаса прочности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научная проблематика проектирования роторов испытательных центрифуг проработана недостаточно, особенно для центрифуг, воспроизводящих большие ускорения.

2. Разработана классификация роторов центрифуг и их элементов, которая позволяет упорядочить информацию о многообразии принципиальных и конструктивных решений роторов испытательных и градуировочных центрифуг и систематизировать задачи их исследования.

3. Показано, что предельные возможности центрифуг определяются произведением радиуса установки изделия на максимальное воспроизводимое ускорение или квадратом окружной скорости.

4. Для конструкций роторов, построенных на основе радиальной балки постоянного или переменного сечений, сформулирован критерий предельных возможностей ротора. Получены и исследованы соотношения для оценки несущей способности ротора центрифуги.

5. Доказано, что для многопозиционных стендов при размещении на роторе нескольких испытуемых объектов целесообразно использовать конструкцию с кольцевым бесцентровым кусочно-дуговым ротором, позволяющим избежать изгибных деформаций его элементов. Предложены подходы к расчету таких конструкций.

6. Доказано, что для сплошного дискового ротора постоянной или переменной толщины применим критерий предельных возможностей ротора центрифуги, выведенный для роторов стержневого типа; оценены ограничения по воспроизводимому ускорению на таких роторах.

7. Обоснована и поставлена задача разработки методик расчета установочного устройства для крепления испытуемого объекта. Показано, что при расчете работающих на изгиб элементов установочного устройства необходимо учитывать характер его возможных деформаций при контакте с ним основания испытуемого изделия.

8. По результатам расчетов методом конечных элементов показано, что наиболее перспективным для центрифуги ПЦ-14 «Энергия» является ротор с системой параллельных штанг; предложены рациональная конструкция такого ротора и его установочной плиты.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Пуленец Н.Е.** Контроллерное управление механизмами испытательного комплекса // XXXIV неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции. - СПб: издательство СПбГПУ. – 2005. –Ч.III. –С.19-20.

2. **Пуленец Н.Е.** Предельные возможности испытательных центрифуг // XXXV неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции. - СПб: издательство СПбГПУ. -2006. -Ч.III. -С.8-9.

3. **Павлюченко С.В., Попов А.Н., Пуленец Н.Е., Тимофеев А.Н.** Измерительные токосъемники // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ.конф. СПб: издательство СПбГПУ. -2006. –С.46-50.

4. **Павлюченко С.В., Попов А.Н., Пуленец Н.Е., Тимофеев А.Н.** Испытательные и градуировочные стенды // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ.конф. СПб: издательство СПбГПУ. - 2006. –С.50-56.

5. **Павлюченко С.В., Попов А.Н., Пуленец Н.Е., Тимофеев А.Н.** Специальное программное обеспечение и аппаратные средства испытательных градуировочных стендов// Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ.конф. СПб: издательство СПбГПУ. - 2006. –С.56-60.

6. **Пуленец Н.Е.** Задачи и методы обеспечения прочности роторов испытательных центрифуг // Научно-технические ведомости СПбГТУ. -СПб: издание СПбГПУ; №5-1 (47). -2006. –С.193-197.