

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

**К. В. Сызранцева, К. В. Кусков, М. А. Пазяк**

Обоснование выбора коррозионностойкого материала корпуса превентора на основе моделирования его упругопластического деформирования

В статье рассмотрен метод обоснования выбора коррозионностойкого материала для изготовления корпуса превентора на основе компьютерного моделирования упругопластической задачи в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL. Для описания свойств материала используется мультилинейная модель деформирования, опорные точки которой вычисляются в результате отработки разработанного авторами макроса на основе двух моделей: Ромберг-Осгуда и «метода последовательных коррекций», предложенного специалистами ЦАГИ. В статье приведены результаты компьютерного моделирования по нагружению корпуса превентора ПШКМ-АСМТ-114х21 рабочим и двойным пусковым давлением для четырех вариантов материалов корпуса. Расчеты подтвердили высокий запас прочности корпуса для применяемой в настоящее время стали 40Х, показали достаточную работоспособность коррозионностойких сталей 20Х13 и 30ХМА. Однако компьютерный эксперимент выявил весьма обширные зоны и уровень пластических деформаций в результате нагружения корпуса, изготовленного из стали 12Х18Н10Т двойным пусковым давлением. Полученные результаты свидетельствуют, что исследуемый превентор может быть изготовлен в коррозионностойких исполнениях К1 и К2, но для исполнения К3 необходимо разрабатывать принципиально другую геометрию корпуса.

**Ключевые слова:** превентор, прочностная надежность, коррозионностойкая сталь, компьютерное моделирование, ANSYS, упругопластическое деформирование, диаграмма деформирования материала.

**Л. Ю. Волкова.**

Определение технического состояния насоса высокого давления и форсунок судового дизеля MAN B&W 6S50MC-C по изменению давления и температуры в трубопроводе

Целью работы является предложение методов и средств определения технического состояния топливной аппаратуры. Предложена методика определения технического состояния насоса высокого давления и форсунок судового дизеля MAN B&W 6S50MC-C по изменению максимального давления топлива и температуры внешней поверхности трубопровода. Для топливной аппаратуры с максимальным давлением в трубопроводе от 50 до 150 МПа определена допустимая зона изменения давления.

Предложена формула, учитывающая цикловую подачу топлива и массу при оценке температуры от его сжатия плунжером насоса. Определена температура топлива при сжатии в зависимости от величины давления.

Выполнен расчет процесса переноса тепла через стенку трубопровода и от нагретой поверхности стенки к воздуху. Для измерения температуры на поверхности трубопровода и определения технического состояния топливной аппаратуры выбран переносной пирометр RGK PL12. Приведена допустимая зона изменения температуры поверхности трубопровода, по которой оценивают исправное состояние насоса и форсунок.

**Ключевые слова:** насос, трубопровод и форсунка, техническое состояние, давление и температура, диагностический сигнал, допустимая зона, пирометр.

**А. П. Жигadlo, Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, В. В. Рындин**

Выбор кулачковых механизмов для привода плунжера насоса высокого давления дизельных двигателей с применением программы Mathcad

Целью статьи является выбор профиля кулачка (при равных конструктивных параметрах) для привода плунжера насоса высокого давления, обеспечивающего максимальную скорость и допустимое ускорение толкателя. Предложена методика выбора профиля кулачка по анализу совмещенных графиков изменения пути, скорости, ускорения толкателя кулачков различного профиля с применением программы MATHCAD. Выполнены расчеты и построены совмещенные графики изменения пути, скорости, ускорения толкателя кулачков с тангенциальным, выпуклым и вогнутым профилем. Сравнительный анализ совмещенных графиков показал, что максимальная скорость толкателя кулачка с вогнутым профилем в 1,5 раза больше, чем для кулачков с тангенциальным или выпуклым профилем. Кулачок с вогнутым профилем рекомендуется для привода плунжеров насоса малооборотных судовых дизелей (до 250 мин<sup>-1</sup>). Для создания сверхвысоких давлений (более 120 МПа) система подачи топлива должна быть аккумуляторного типа с приводом плунжеров малого диаметра (4–6 мм) от эксцентрикового вала с шайбой специальной формы и электронным управлением форсунок.

**Ключевые слова:** кулачковые механизмы, профиль кулачков, расчет, программа Mathcad, графики пути, скорости, ускорения, выбор профиля кулачка.

### **О. П. Евдокимова, Д. С. Макашин**

Анализ влияния режима резания и СОЖ на образование заусенцев при сверлении алюминиевого сплава

Алюминиевый сплав АК5Мч широко используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности для замены более тяжелых сплавов. Это связано с его превосходными свойствами высокой удельной прочности, высокой коррозионной стойкостью, хорошей формемостью и низкой стоимостью изготовления. Пластичность и выделение тепла при сверлении АК5Мч часто приводит к образованию заусенцев на входе и выходе с поверхности заготовки. В данном исследовании показано влияние скорости резания и условий сверления на образование заусенцев в сплаве АК5Мч. Сверление проводилось с использованием СОЖ и без СОЖ с использованием сверл из быстрорежущей стали диаметром 6,0 мм со скоростями резания 20, 42 и 60 м/мин при постоянной подаче 0,15 мм/об. Это исследование показало, что сверление АК5Мч со скоростью резания 42 м/мин с использованием СОЖ является выгодным, так как приводит к наименьшему износу инструмента и минимальному образованию заусенцев.

**Ключевые слова:** сверление, алюминий, обработка, заусенец, отверстие, производительность, точность.

### **И. Ю. Лесняк, З. Н. Соколовский, С. В. Гавриленко**

Исследование выносливости сплава АМг6 при циклическом объемном температурном деформировании

Проведены теоретические исследования выносливости авиационного сплава типа АМг6 при его длительном циклическом объемном температурном деформировании за пределами закона Гука. Разработана методика оценки выносливости авиационных сплавов при циклическом объемном температурном деформировании с учетом наличия каверн (трещин), основанная на приведении условий циклических объемных температурных деформирований к условиям стандартных механических испытаний образцов. По разработанной методике проведена предварительная оценка выносливости авиационного сплава типа АМг6 с нагартованной и отожженной поверхностью, с использованием имеющейся ограниченной базы эмпирических данных, полученных на основе стандартных механических испытаний экспериментальных образцов. Проведена оценка влияния на выносливость экспериментальных образцов начальной длины трещины в экспериментальных образцах, при которой возможен ее неконтролируемый рост при циклическом объемном температурном деформировании. Сравнительный анализ расчетной выносливости экспериментальных образцов с фактической выносливостью материала конструкции (нагартованный сплав АМг6) реального орбитального объекта типа модуля «Заря» международной космической станции показал расхождение не более 12,5 %.

**Ключевые слова:** оценка выносливости, цикл температур, деформация, трещины, нагружение.

**Д. С. Макашин, Д. А. Блохин**

Сравнение процесса сверления и спирального фрезерования отверстий в титановом сплаве

Сверление отверстий в титановом сплаве ВТ-3 является сложной задачей ввиду его плохой обрабатываемости. Путем сравнения осевого усилия, шероховатости поверхности и диаметральной точности отверстия проводится оценка эффективности процесса спирального фрезерования с обычным процессом сверления. Отверстия, созданные с помощью спирального фрезерования, имеют высокое качество поверхности при более низкой осевой подаче, в то время как процесс сверления сопровождается более высокой осевой подачей, что приводит к вибрации режущего инструмента. При изготовлении высокоточных отверстий в элементах топливно-регулирующей аппаратуры рекомендуется применять винтовое фрезерование.

**Ключевые слова:** сверление, титановые сплавы, винтовое фрезерование, шероховатость, производительность.

**В. И. Киришцева, М. А. Мукутадзе**

Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале

Статья посвящена одной из важных проблем повышения износостойкости трибосистем, которые работают в гидродинамическом режиме, за счет нанесения на поверхность трибоконтакта антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего канавку. На основе уравнения течения микрополярной жидкости для «тонкого слоя» и уравнения неразрывности найдено автомодельное решение с учетом канавки и без учета канавки. В результате определены поля скоростей и давления в канавке и на поверхности полимерного антифрикционного композиционного покрытия, а также нагрузочная способность и сила трения, позволяющие обеспечить повышение износостойкости, увеличение продолжительности гидродинамического режима. Также приводятся результаты численного анализа полученных теоретических расчетных моделей и экспериментальной оценки предлагаемой конструкции с целью верификации и подтверждения эффективности полученных теоретических моделей.

**Ключевые слова:** радиальный подшипник, повышение износостойкости, антифрикционное полимерное композиционное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация.

**П. В. Литвинов, В. А. Борисов, В. Р. Ведрученко, З. Н. Грязнова, Я. В. Коцюба**

Моделирование статических и термических нагрузок поршня двухтактного двигателя, модифицированного каталитическими материалами

Выполнены расчеты теплового и напряженно-деформированного состояния поршней двухтактного бензинового двигателя 1Д 4,5/3,5. В расчетах применялась модель стандартного поршня и поршня, модифицированного каталитическими материалами. Описана методика, применяемая при моделировании статических и термических нагрузок с использованием возможностей программы SolidWorks Simulation. Приведен сравнительный анализ результатов моделирования оригинального и модифицированного поршней, оценена работоспособность поршня при модификации поверхности каталитическими материалами.

Для решения тепловых и механических задач была использована методика оценки граничных условий, позволяющая учесть особенности нагружения, а также имеющиеся расчетные и экспериментальные данные, относящиеся к рабочему циклу и индикаторному процессу.

**Ключевые слова:** каталитические материалы, поршень, двигатель внутреннего сгорания, теплонапряженность.

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

**К. А. Анкудинов, К. С. Халикова**

Анализ методологических основ оптимального построения газотранспортных информационных систем

Проведен анализ по проблеме создания методологических основ оптимального построения информационных технологий, обеспечивающих интегрированную логистическую поддержку жизненного цикла образцов газотранспортной системы при неопределенности исходных данных. Проведен анализ состояния исследований задач анализа, синтеза и прогнозирования развития сложной технической системы.

**Ключевые слова:** газопровод, газотранспортная система, трубопровод, сложная техническая система, блуждающие токи, коррозия.

**С. В. Бирюков, С. С. Колмогорова**

Сдвоенные сферические датчики напряженности электрического поля с отдельными чувствительными элементами и их исследования

Исследуется новый вид электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля, отнесенный по вновь введенному классификационному признаку к сдвоенным датчикам. В работе уделено внимание исследованию сдвоенных датчиков с отдельными чувствительными элементами. В результате исследования получена взаимосвязь между угловыми размерами чувствительных элементов сдвоенного датчика и его погрешности от неоднородности поля, поддерживаемой в максимально возможном пространственном диапазоне измерения. Эта взаимосвязь легла в основу построения математической модели сдвоенного датчика, позволившей выявить диапазоны угловых размеров чувствительных элементов датчика и его погрешностей от неоднородности электрического поля. Диапазон установленных угловых размеров чувствительных элементов первого двойного датчика  $35,53^\circ \leq \alpha \leq 133,53^\circ$  и второго двойного датчика  $35,53^\circ \leq \alpha \leq 285^\circ$  при  $\alpha_3 = 90^\circ$  и соответствующие им диапазоны погрешностей  $\pm 0,78\% \leq \Delta \leq \pm 9,12\%$  и пространственный диапазон измерения  $0 < a < 1$ .

Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, измерение, одинарные датчики, двойные датчики, сдвоенные датчики, составные чувствительные элементы, погрешность от неоднородности поля, математическая модель, оптимизация.

**К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов**

Разработка измерителя малых емкостей с линейной характеристикой

В статье рассмотрен измеритель малых емкостей с его техническими и метрологическими характеристиками. Приведены схема функционального генератора измерителя и временные диаграммы напряжений для изучения режимов его работы. Рассмотрены вопросы использования измерителя емкости при измерении параметров объектов железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** емкостной датчик, диэлектрическая проницаемость, измеритель емкости, линейная измерительная характеристика.

**В. В. Даньшина**

Характеристики электрических свойств нанокристаллических систем селенидов цинка и кадмия

Экспериментально и теоретически исследованы физические свойства нанокристаллических систем селенидов кадмия и цинка. Экспериментально изучено воздействие температуры и различных газовых сред на удельную проводимость пленок селенидов кадмия и цинка. Теоретически рассчитаны значения энергии Ферми, концентрации донорных носителей заряда в

зоне проводимости, энергии активации доноров и температурного коэффициента сопротивления. Показано, что рассчитанные значения коррелируют с экспериментальными, что позволит прогнозировать стабильность работы полупроводниковых приборов.

**Ключевые слова:** CdSe, ZnSe, энергия активации, энергия Ферми, концентрация доноров, температурный коэффициент сопротивления.

**А. С. Семёнов, Ю. В. Бебихов, И. А. Якушев, О. В. Федоров**

Реализация PI-регулятора скорости двигателя постоянного тока методом математического моделирования

Работа посвящена математическому моделированию системы управления скоростью вращения двигателя постоянного тока, основанной на применении PI-регулятора. Двигатели постоянного тока нашли широкое применение в промышленности для приведения в движение механизмов циклического действия, где требуется высокая скорость отклика, высокий пусковой крутящий момент, линейное управление. Основные методы управления требуемыми характеристиками скорости вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением заключаются в управлении параметрами обмоток якоря и возбуждения, питаемых от разных источников. PI-регулятор находит широкое применение в программируемых логических контроллерах благодаря простоте и ясности математического аппарата. Предлагаемая математическая модель PI-регулятора основана на выборе оптимальных параметров, обеспечивающих поддержание фактической скорости, близкой к заданной. Были определены оптимальные коэффициенты PI-регулятора KP и KI, дающие наилучший результат для постоянной скорости. Результаты компьютерного моделирования в MatLab были сопоставлены с результатами имитационного моделирования на лабораторной установке. Полученные данные при применении PI-регулятора по установившейся ошибке и времени переходного процесса выглядят предпочтительнее имитационной модели с регулировкой напряжения. Разработанная математическая модель показала следующие основные результаты: время разгона  $< 0,3$  с; время переходного процесса  $< 0,5$  с; перерегулирование не превышает 0,5 %; установившаяся ошибка не превышает 0,1 %. В результате исследования была разработана математическая модель и проанализирована работа двигателя постоянного тока с PI-регулятором, позволяющим практически полностью устранить вынужденные колебания и установившуюся ошибку. Отмечено преимущество предложенного метода применения PI-регулятора как более привычного и простого в использовании элемента управления при внедрении в существующую систему управления без особых изменений.

**Ключевые слова:** двигатель постоянного тока, PI-регулятор, математическое моделирование, MatLab, скорость вращения, установившаяся ошибка.

**В. В. Федянин**

Исследование СВЧ-генератора и антенн-излучателей для гипертермии онкологических заболеваний

**Цель.** В настоящее время (2022 год) существующие установки для гипертермии имеют большие размеры. В результате лечение гипертермией проводится только там, где расположено данное оборудование. В данной работе проведено исследование, направленное на создание компактного устройства гипертермии как средства для дополнительной терапии онкологических заболеваний. Разработаны и исследованы плоские антенны в виде спирали для нагрева локальной области. Проведены расчеты и имитационное моделирование для разработанных антенн.

**Материалы и методы.** В исследовании использовались материалы и методы вычислительной математики, технологии сверхвысокочастотной техники и теории автоматического регулирования. Использовалось специализированное программное обеспечение для разработки высокочастотных систем.

**Результаты.** Разработана и протестирована схема генератора гармонических колебаний. Получены диаграммы направленности электрического поля разработанных антенн. С помощью имитационного моделирования построены распределения напряженности магнитного поля для разработанных антенн. Установлена нелинейная зависимость напряжения питания от мощности излучения. В ходе экспериментов проводился локальный нагрев задней области левого предплечья

с использованием разработанных антенн и генератора. Максимальная температура нагрева составляла 41,5 °С.

Заключение. Технология нагрева с использованием спиральной антенны и генератора позволила нагревать локальные участки до температур терапевтического диапазона. Разработанная схема генератора оказалась очень простой в эксплуатации. Максимальная потребляемая мощность генератора составляла 3,2436 ватта. Напряжение питания составляло 6,36 вольта. Создание антенн на биоразлагаемой пленке с помощью струйного принтера позволит создавать как контактный, так и бесконтактный нагрев. В работе теория проверялась практикой. Работа включает расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование.

**Ключевые слова:** гипертермия, высокочастотный генератор, фрактальная модуляция, плоские антенны, спиральные антенны.

#### **И. В. Хоменко, А. В. Косых, Е. Ю. Компанец**

Оптимизация параметров источника опорной частоты с композитным резонатором-термостатом

Рассматривается перспективная конструкция термостатированного кварцевого генератора с резонатором-термостатом. С целью изучения влияния замены материала микроплаты в резонаторе-термостате на работу генератора исследуются процессы установления стационарного температурного режима после включения. Материал новой микроплаты соответствует технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Обнаружено неприемлемое изменение характера установления стационарного режима. Для решения обнаруженной проблемы предлагается изменение конструкции.

**Ключевые слова:** термостатированный кварцевый генератор, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика, кварцевый резонатор-термостат, терморегулятор, тепловая модель генератора, процесс установления температуры.

#### **А. И. Чередов, А. В. Щелканов**

Магнитоизмерительный преобразователь на основе осцилляторного эффекта

Одним из наиболее распространенных видов неразрушающего контроля является магнитный контроль, при проведении которого используются различные аналоговые магнитоизмерительные первичные измерительные устройства: феррозондовые, на основе эффектов Гаусса и Холла и др. Перспективным направлением исследований в области неразрушающего контроля и технической диагностики представляется разработка измерительных преобразователей с цифровым выходным сигналом или сигналом, легко преобразующимся в код.

В статье рассматривается магнитоизмерительный преобразователь на основе осцилляторного эффекта, который носит пороговый характер и заключается в возникновении колебаний электрического тока, протекающего по полупроводниковому образцу, помещенному в продольные электрическое и магнитное поля. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости пороговой напряженности электрического поля от напряженности магнитного поля. Приведена схема преобразователя, осуществляющего преобразование индукции магнитного поля в число импульсов электрического напряжения и диаграммы его работы.

Чувствительность преобразователя зависит от частоты генератора образцовой частоты и коэффициента преобразования генератора линейно возрастающего напряжения.

**Ключевые слова:** контроль, преобразователь, магнитное поле, напряженность, индукция, осциллятор.

#### **Н. Н. Чигрик**

Количественная оценка неопределенности случайного рассеивания среднего зазора и натяга в сопряжениях

Действительные размеры годных деталей, изготовленных по одним и тем же чертежам, могут колебаться между заданными предельными размерами, а зазоры и натяги в сопряжениях — в зависимости от случайного рассеивания действительных размеров с отклонением формы реальной

поверхности или профиля. Погрешность формы реальной поверхности влияет на вероятностную оценку результатов сортировки деталей, приводит к неопределенности размера максимума материала, случайному рассеиванию среднего зазора и натяга в сопряжениях и, как следствие, к невозможности применения всех поступивших на сборку деталей. Основным результатом исследования связан с обеспечением поступления на сборку равного количества деталей, выводом обладающих новизной аналитических зависимостей нахождения количественной оценки неопределенности случайного рассеивания среднего зазора и натяга в сопряжениях, случайного рассеивания среднего размера относительно верхней и нижней приемочных границ. Применение предложенного способа сборки с изначальным уменьшением реальных зазоров и натягов в сопряжениях посредством сужения допусков действительных размеров на допуск формы реальных поверхностей в диаметральном выражении в пределах случайного рассеивания среднего размера относительно верхней и нижней приемочных границ позволяет обеспечить поступление на сборку равного количества деталей, в том числе в проверяемых партиях деталей с разбиением допусков действительных размеров на равное число размерных групп.

**Ключевые слова:** подбор деталей, сборка, неопределенность среднего размера, неопределенность среднего зазора, неопределенность среднего натяга, размер максимума материала, погрешность формы.

**П. Ш. Мадиди, А. Д. Алькина, А. В. Юрченко, А. Д. Мехтиев, Р. Ж. Аймагамбетова**  
Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров

В данной работе представлены вопросы, связанные с разработкой системы контроля смещения горного массива, приводящего к обрушению бортов карьера. Система контроля использует точечные волоконно-оптические сенсоры. Волоконно-оптические сенсоры выполнены на основе Single Mode оптических волокон. Разработан лабораторный образец точечного волоконно-оптического сенсора, выполненного на основе двухплечевого интерферометра Маха-Цендера с использованием Single Mode оптического волокна для контроля смещений. Имитационный стенд лабораторного образца волоконно-оптического сенсора показал высокую точность измерений, линейность и может применяться для контроля устойчивости бортов карьера после усовершенствования конструкции. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью компьютерной программы Wolfram Alpha. Также разработан комплекс контроля программно-аппаратный с широким набором элементов, позволяющий регулировать чувствительность и имеющий элементы машинного обучения.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, сенсор, контроль, карьер, безопасность, откосы.