

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Калужский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРО- И МАШИНОСТРОЕНИИ И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ

**Материалы
Региональной научно-технической конференции**

Том 1



Калуга 2021

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
Н34

Руководитель конференции:

С.А. Кусачева (председатель совета по НИР студентов и аспирантов)

Руководители направлений:

А.И. Пономарев (ф-т КМК), *Ю.С. Белов* (ф-т ФНК), *М.Ю. Адкин* (ф-т ЭИУК),
А.Г. Вяткин (ф-т МТК), *О.А. Артеменко* (ф-т СЭК)

Руководители секций:

Е.Н. Малышев; Г.В. Орлик; В.В. Андреев; А.А. Жинов;
Ю.П. Корнюшин; А.П. Коржавый; А.И. Пономарев; А.К. Рамазанов;
А.А. Анкудинов; Ю.С. Белов; В.Г. Косушкин; А.В. Мазин; А.А. Шубин;
А.К. Горбунов; Н.Е. Шубин; А.В. Максимов; В.Н. Пащенко;
М.В. Астахов; Е.Н. Сломинская; О.Л. Перерва; В.В. Ильин; В.М. Алакин

Н34 **Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе:** материалы региональной научно-технической конференции, 20–21 апреля 2021 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 251 с.

В сборнике материалов Региональной научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкции и материалы.

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2021
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2021
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2021

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ВЛИЯНИЕ НАСТРОЙКИ СБОРНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Режущий инструмент, входящий в состав технологической системы, имеет ограниченный срок службы, определяемый периодом его стойкости. В связи с этим режущий инструмент необходимо постоянно заново настраивать на размер. Но все-таки нельзя установить инструмент абсолютно точно в прежнее положение так и появляется погрешность настройки. Смысл этой погрешности состоит в том, что наблюдается разброс положений из-за базирования на одну и ту же опорную поверхность станка инструментов с различными в пределах поля рассеивания геометрическими показателями опорных поверхностей. Помимо этого, положение инструмента дополнительно изменяется при его закреплении.

С целью минимизации воздействия погрешностей режущего инструмента на точность необходимо:

1. Правильно настроить инструмент.
2. Выбирать наиболее подходящие режимы резания .
3. Применять инструмент соответствующей точности .
4. Применять СОЖ.

В случае появления отклонений расположения поверхностей от их необходимого расположения может возникнуть:

1 Торцевое биение. Представляет собой разность наименьшего и наибольшего расстояний от точек реальной торцевой поверхности, до плоскости, перпендикулярной базовой оси вращения.

2 Радиальное биение. Представляет собой разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реальной поверхности до базовой оси вращения в сечении, перпендикулярном этой оси.

3 Отклонение от перпендикулярности осей или оси и плоскости.

4 Отклонение от параллельности оси вращения и плоскости. Представляет собой разность наибольшего и наименьшего расстояний между осью и прилегающей плоскостью на заданной длине.

5 Отклонение от соосности. Представляет собой максимальное расстояние между осью рассматриваемой поверхности и осью базовой поверхности на всей длине рассматриваемой поверхности или расстояние между этими осями в рассматриваемом сечении.

Следует иметь в виду, что действие износа на точность обработки осложняется налипанием металла на передней грани режущего инструмента. Граница налипания может выходить за пределы режущей кромки, что в каком-то смысле уравнивает износ по задней грани.

Нарушение точности форм исполнительных поверхностей в продольном сечении может привести к погрешности установки детали в патроне или к

возможному повороту резцедержателя с инструментом, что, в конечном итоге, отразится на точности обработки. Нарушение точности формы исполнительных поверхностей в поперечном сечении может привести к нарушению точности относительного положения исполнительных поверхностей.

Погрешности обработки, вызванные неточностью изготовления режущего инструмента для совокупности партий деталей являются случайными погрешностями.

На точность обработки, к примеру отверстий, огромное влияние оказывает неточное расположение инструмента относительно детали, из-за чего происходит смещение оси инструмента и отверстия или их перекося, что приводит к изменению расположения режущих кромок относительно необходимого положения. При перемещении резца на размер в большую или меньшую сторону относительно оси станка диаметр заготовки увеличивается или уменьшается. Биение вращающихся центров станка приводит к биению обрабатываемых поверхностей заготовки относительно оси центральных отверстий. При установке обработанной детали на другой станок с другим биением центров может появиться отклонение от соосности у заготовок, обрабатываемых в разных условиях.

Таким образом, можно сделать вывод, что для получения заданных геометрических параметров готового изделия необходимо также тщательно настраивать инструмент перед началом работы, а также следить за его состоянием.

Список литературы

[1]. *Болотин Х.Л., Костромин Ф.П.* Станочные приспособления. – М.: Машиностроение, 1973. – 245 с.

[2]. *Справочник технолога-машиностроителя.* В 2 т. Т. 1 / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2001. – 914 с.

[3]. *Колесов И.М.* Основы технологии машиностроения. – М.: Высшая школа, 2001. – 591 с.

[4]. *Воробьев Л.Н.* Технология машиностроения и ремонт машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 344 с.

Михаил Сергеевич Вишневский – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mishavishnevskiy74@gmail.com

ВЫБОР ВИДА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Введение. Термической обработкой стали и других конструкционных материалов называется технологический процесс тепловой обработки заготовок, деталей машин и инструмента, в результате которой изменяется микроструктура материала, а вместе с ней механические, физико-химические и технологические свойства. Процессы термической обработки конструкционных материалов связаны с аллотропными превращениями (полиморфизмом), а также с изменением химического состава материала изделия.

Термической обработке подвергают заготовки, поковки, штамповки, а также готовые детали и инструмент для придания им необходимых свойств: твердости, прочности, износостойкости, упругости, снятия внутренних напряжений, улучшения обрабатываемости.

Сущность термической обработки заключается в нагреве металла до температуры, которая несколько выше или ниже критических температур, выдержке при этих температурах и быстром или медленном охлаждении. В процессе охлаждения в структуре металла происходят аллотропные изменения, вследствие которых резко изменяются механические свойства. При быстром охлаждении увеличиваются твердость, износостойкость, упругость и т. д., при медленном охлаждении – пластичность, ударная вязкость, обрабатываемость. Кроме того, существует термическая обработка, связанная с изменением химического состава материала изделия, так называемая химико-термическая обработка.

Термическая обработка применяется для повышения твердости зубьев. С повышением твердости растет несущая способность передач по контактной прочности. Поэтому закалку используют для повышения твердости зубьев в силовых передачах. В кинематических передачах, предназначенных для точной передачи вращательного движения между валами при небольших значениях крутящего момента, зубчатые колеса закалке не подвергаются.

Основными видами упрочняющей термической обработки зубчатых колес являются:

1. Объемная закалка
2. Химико-термическая обработка
3. Поверхностная закалка

Характеристики:

Шестерня. Материал Сталь 40Х. HRC 45

Объемная закалка. Объемная закалка – наиболее простой способ получения высокой твердости зубьев. При этом зуб становится твердым по всему объему. Для объемной закалки используют углеродистые и легированные стали со средним содержанием углерода 0,35...0,5%. Твердость на поверхности зуба 35...40 HRC.

Недостатки объемной закалки: коробление зубьев и необходимость последующих отделочных операций, понижение изгибной прочности при ударных нагрузках (материал приобретает хрупкость); ограничение размеров заготовок, которые могут воспринимать объемную закалку. Последнее связано с тем, что для получения необходимой твердости при закалке скорость охлаждения не должна быть ниже критической. С увеличением размеров сечений детали скорость охлаждения падает, и если ее значение будет меньше критической, то получается так называемая мягкая закалка. Мягкая закалка дает пониженную твердость.

Объемную закалку во многих случаях заменяют поверхностными термическими и химико-термическими видами обработки, которые обеспечивают высокую поверхностную твердость (высокую контактную прочность) при сохранении вязкой сердцевины зуба (высокой изгибной прочности при ударных нагрузках).

Поверхностная закалка. Целью поверхностной закалки является повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стальных изделий. Это достигается нагревом на заданную глубину только поверхностного слоя, который при последующем охлаждении закаливается. Сердцевина изделия остается незакаленной, сохраняя достаточно высокие пластичность и вязкость, а, следовательно, будет хорошо воспринимать динамические нагрузки.

Закалка токами высокой частоты (ТВЧ). Закалка ТВЧ наиболее широко применяется в промышленности и представляет собой закалку с индукционным нагревом поверхностного слоя изделий (деталей, инструментов) токами высокой частоты. Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуцируемого в изделии.

После нагрева ТВЧ производится охлаждение изделия двумя способами:

- окупанием в охлаждающую жидкость, находящуюся в закалочном баке;
- опрыскиванием охлаждающей жидкостью с помощью душевого устройства (спрейера). В качестве охлаждающей жидкости при закалке ТВЧ используют воду, подогретую до 30...40°C или эмульсию.

Закалка ТВЧ особенно эффективна для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях, повышенных износа, динамических и знакопеременных нагрузок (зубчатые колеса, валы и т.п.). Закалке ТВЧ подвергают некоторые режущие инструменты, изготавливаемые из углеродистых и легированных инструментальных сталей (напильники, ножовочные полотна). После закалки ТВЧ и низкого отпуска они приобретают структуру мартенсита и цементита вторичного и высокую твердость (42...55 HRC), а сердцевина сохраняет структуру перлита и цементита вторичного.

Химико-термическая обработка. Для химико-термического упрочнения тяжело нагруженных деталей в машиностроении применяют процессы газовой цементации и нитроцементации, вакуумную и ионную ХТО, высокотемпературную цементацию и обработку с насыщением в азотных атмосферах и в кипящем слое. Однако на отечественных заводах и за рубежом для

упрочнения высоконапряженных деталей и, прежде всего, зубчатых колес в основном используются цементация и нитроцементация.

После обработки ХТО поверхностный слой приобретает твердость HRC 60-63.

Недостатки данного метода:

- значительные затраты времени (для цементации на глубину 0,1 мм затрачивается 1 час);
- низкая производительность процесса;
- громоздкое оборудование;
- сложность автоматизации процесса.

Способ применяется в мелкосерийном производстве.

Вывод. Для термической обработки зубчатых венцов детали типа «шестерня» наилучшим методом для данного типа производства и предъявляемых технологических требований необходимо использовать ТВЧ.

Преимуществом ТВЧ состоит в том, что этот метод позволяет нагреть только необходимую область. Таким образом, снижаются поковки деталей (коробления), что особенно важно при термической обработке некоторых прецизионных шестерен.

В данном случае ТВЧ сильно проигрывают такие альтернативные способы упрочнения, как ионное или газовое азотирование, цементация и т.д. ТВЧ позволяет локализовать нагрев в определенных областях и зонах, вплоть до закалки отдельных зубьев, впадин, эвольвент, что достигается использованием спец. индукторов. Так получают твердую поверхность при вязкой сердцевине, которая гасит удары и препятствует разрушению детали. Шестерни прошедшие сквозную закалку подвержены разрушению даже при работе с небольшими биениями в зубчатом зацеплении.

А также ХТО имеет ряд недостатков по сравнению с ТВЧ:

- большой расход атмосферы процесса и высокие затраты на ее изготовление;
- постоянный выброс CO₂ и CO в окружающую среду из-за неполного сгорания атмосферы после завершения процесса.
- окисление рабочих поверхностей зубьев колес, которое снижает твердость поверхности зубьев и их контактную прочность;
- большие энергетические расходы и трудоемкость обслуживания оборудования.

Список литературы

[1]. *Зинченко В. М.* Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 302 с.

[2]. *Козловский И. С.* Химико-термическая обработка шестерен. М.: Машиностроение, 1970. 232 с.

[3]. *Bausch Tomas.* Innovative Zahnradfertigung. Expert verlag GmbH, D-71262, Renningen, Germany, 2006, 778 s.

[4]. *Калашиников А. С., Моргунов Ю. А., Калашиников П. А.* Современные методы обработки зубчатых колес. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 238 с.

[5]. *Саушкин Б. П., Шандров Б. В., Моргунов Ю. А.* Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей. «Известия МГМУ «МАМИ». 2012. № 2 (14). Т. 2. С. 242–248.

[6]. *Loser K.* Innovative Wärmebehandlungsprozesse und-anlagen in der Getriebeherproduktion. Доклад на конгрессе «GETRO», Германия, Вюрцбург. Март 2007. 15 с.

[7]. *Калашиников А. С., Моргунов Ю. А., Калашиников П. А.* Химико-термическая обработка зубчатых колес с использованием газовой вакуумной цементации. Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 10. С. 12–16.

Русанов Владислав Дмитриевич – студент МК1-81Б КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: linkz.ggwp@gmail.com

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТНОГО НАКЛОНА ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

Для гибридных параметров шероховатости таких как местный наклон оцениваемого профиля, влияние режимов резания не оценено должным образом, отсутствуют данные, которые могли сформировать понимание о том, как именно изменяется местный угол наклона профиля при различных технологических режимах обработки. Поэтому существует необходимость в проведении экспериментов, которые дадут нам возможность правильно выбирать подачу, скорость, глубину резания и траекторию движения режущего инструмента для получения необходимого значения угла наклона профиля.

Местный угол наклона профиля (dz/dx) – это гибридный параметр шероховатости поверхности. Этот параметр очень полезен для оценки отражательной способности, концентрации напряжений, устойчивости к износу, трения, адгезии, вибрации и т. д. [1,2]. Являясь гибридным параметром, зависит как от амплитуды, так и от шага выступов профиля. Как правило, чем меньше угол, тем лучше отражательная способность, чем больше угол, тем лучше фрикционные свойства поверхности [2].

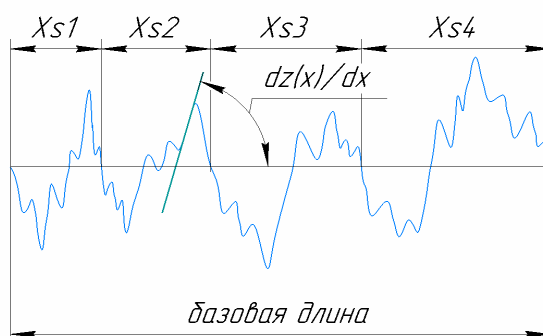


Рис.1 Местный угол наклона профиля

Чтобы получить среднеквадратичное значение или средний уклон профиля, можно использовать три формулы. Были выбраны уравнения на основе 2, 3 или 7 соседних точек. Следующие формулы используются для расчета местного уклона соответственно [4]:

$$\frac{dz_i}{dx} = \frac{z_i - z_{i-1}}{\Delta x}, \quad (1)$$

$$\frac{dz_i}{dx} = \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2\Delta x}, \quad (2)$$

$$\frac{dz_i}{dx} = \frac{z_{i+3} - 9z_{i+2} + 45z_{i+1} - 45z_{i-1} + 9z_{i-2} - z_{i-3}}{60\Delta x}, \quad (3)$$

где Z_i – ординаты точек профиля.

Следует отдавать предпочтение расчету уклона поверхности по 2-х и 7-ми точечной формуле. Семи точечную следует использовать для небольших интервалов выборки, как рекомендует ISO для профиля [3]. Этот метод обеспечивает в целом более стабильные значения наклона независимо от погрешности измерения. Для больших интервалов выборки (например, в 3D-системах) 2-точечный метод лучше. Наклон, полученный по формуле с двумя точками, наиболее близок к теоретическим предсказаниям, поэтому этот метод следует использовать в научных исследованиях.

Поскольку средний и среднеквадратичный наклоны взаимосвязаны, во время производственного контроля следует использовать только среднеквадратичный наклон. Он чувствителен к экстремальным поверхностным особенностям, в отличие от среднего уклона, который очень стабилен на протяженности поверхности. В научном исследовании эти два параметра следует использовать вместе с другими параметрами для оценки характера топографии поверхности [4].

Средний наклон профиля, измеренный методом щупа, обычно стремится к нулю [4].

Поэтому в исследовании будем опираться на среднеквадратичный наклон оцениваемого профиля и находить его корреляцию с технологическими режимами резания, среднеквадратичный наклон профиля находится по формуле из ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [5]:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 dx} \quad (4)$$

Из вышесказанного следует, что будет проведен полный факторный эксперимент для выявления зависимости среднеквадратичного наклона профиля оцениваемой поверхности от глубины, подачи и скорости резания.

Список литературы

[1]. *Захарова Н.В.* Характеристика параметров шероховатости поверхности, установленных в международных стандартах ИСО // Решетневские чтения. 2015.

[2]. *Nakar D., Feuermann D.* Surface roughness impact on the heat loss of sola vacuum heat collector elements, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus, Israel, 2016.

[3]. *ISO – International Organization for Standardization (1997) ISO4287 Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters.*

[4]. *Pawel Pawlus/ An analysis of slope of surface topography. Rzeszow University of Technology, Department of Manufacturing Technology and Production Organization 35-959 Rzeszow, Poland.*

[5]. *Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделия. Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.*

Фадеев Ростислав Романович – студент МК1-21М КФ МГТУ им.Н.Э. Баумана. E-mail: rostislavfadeev@gmail.com

Научный руководитель: к.т.н. доцент **Мусохранов Марсель Владимирович.**

ВЫБОР МЕТОДА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

Одним из наиболее популярных способов обработки заготовок является обработка отверстий. Сверление глубоких отверстий с помощью специальных инструментов относится к наиболее сложным операциям процесса. Здесь необходимо выбрать скорость движения инструмента. Учитывая физико-химические процессы, необходимо оценить взаимодействие инструмента с поверхностью детали. Во время сверления возникают различные динамические явления. Они негативно влияют на функциональность инструмента и качество отверстий. Поэтому научное изучение процесса глубокого сверления является актуальной задачей. Диаметральная точность, шероховатость, отклонения от круглости, а также прямолинейность оси отверстия являются главными требованиями к отверстиям, и соблюдать эти требования при сверлении глубокого отверстия сложнее, чем при обработке обычного. [1]

Глубоким считается отверстие с отношением длины к диаметру $l \geq 10d$. Выделяется 5 технологий глубокого сверления:

1. Глубокое сверление универсальным и специализированным инструментом. Здесь используются модернизированные (т.е. удлиненные) спиральные сверла, в которых есть отверстия для подвода СОЖ в зону резания, либо пластинчатые сверла, закрепленные на длинных опорах.

2. Технология ружейного сверления предполагает использование ружейных сверл (в различных источниках встречаются термины трубчато-лопаточные или сверла одностороннего резания с внутренним подводом СОЖ). Этот процесс в международной практике получил название «система глубокого сверления ELB» (нем. ELB – einlippenbohrer – однорезцовое сверло).

3. Технология глубокого сверления ВТА. СОЖ здесь подается в зону резания через зазор между стенкой обрабатываемого отверстия и наружной поверхностью стебля. Выводится СОЖ через внутреннюю поверхность стебля вместе со стружкой, которая затем попадает в стружкоприемник. В отечественной литературе можно встретить название «Технология сверления глубоких отверстий с наружным подводом СОЖ». [2]

4. Технология сверления однотрубным инструментом с внутренней подачей СОЖ. Такой способ получения отверстия напоминает рассмотренную ранее систему ВТА, но СОЖ подводится через отверстие в стебле.

5. Технология эжекторного сверления предполагает использование инструмента, имеющего два стебля (две трубы). Особенность заключается в использовании специального устройства – эжектора для отвода стружки из зоны резания. Отличительная особенность такого метода состоит в возможности применения эжекторного сверления на универсальных станках, дополнив их насосной станцией. [3]

Выбор конкретного метода зависит от различных параметров: диаметр и глубина отверстия, материал и габариты заготовки, требования к точности получаемого отверстия и др. Метод получения глубокого отверстия в каждом конкретном случае выбирается исходя из совокупности вышеперечисленных факторов.

Также немаловажную роль играют режимы резания, которые оказывают сильное влияние на процесс обработки глубоких отверстий.

В зависимости от условий обработки степень влияния скорости резания и подачи на тот или иной показатель различна. Также по-разному проявляется влияние параметров режима резания. Например, с увеличением скорости резания увод оси отверстия уменьшается, а с увеличением подачи возрастает. При механическом дроблении стружки канавкой на передней поверхности лезвия длина элементов стружки увеличивается с увеличением скорости, а при увеличении подачи она уменьшается.

Опыт разработки и внедрения процессов глубокого сверления показывает, что для его успешной реализации необходимо обеспечить [4]:

- стабильное стружкообразование на всей глубине сверления при обработке партии заготовок;
- надежное удаление стружки потоком СОЖ при допустимом расходе и давлении, которые не превышают значений этих параметров насосной станции;
- допустимый (безопасный для инструмента) уровень поперечных и крутильных колебаний в технологической системе;
- приемлемую (заданную) величину увода оси отверстия;
- оптимальную производительность и надежность процесса по совокупности показателей.

Список литературы

[1] *Основные сведения о глубоком сверлении и растачивании // Обработка глубоких отверстий.* Н. Ф. Уткин, Ю. И. Кижняев, С. К. Плужников и др. М.: Машиностроение, 1988. С. 6 – 27.

[2] *Немцев Б.А., Яковлев П.Д., Яковлев С.П.* Технология глубокого сверления отверстий малых диаметров с наружным подводом СОЖ // *Металлообработка*, №4, 2015.

[3] *Андрющенко А.И., Серебrenицкий П.П.* Эжекторное сверление глубоких отверстий // *Металлообработка*, №1(73)/2103.

[4] *Выбор и оптимизация режимов резания для операций глубокого сверления // Технологии сверления глубоких отверстий.* Звонцов И. Ф., Серебrenицкий П. П., Схиртладзе А. Г. СПб.: Лань, 2013. URL: <https://e.lanbook.com/book/6598>. (Дата обращения: 05.12.2020).

Ковалева Надежда Леонидовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: bananamama.kov@gmail.com

Максимов Д.Е.

ВЫБОР МЕТОДА И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Зубчатый венец характеризуется очень большим количеством параметров и размеров, каждый из которых может иметь отклонения. В странах СНГ точность изготовления цилиндрических зубчатых колес регламентируется ГОСТ 1643-81. Предусмотрено 12 степеней точности, более точные колеса имеют меньшие степени точности. Каждая степень точности регламентирует три нормы – инематической точности, плавности работы и контакта зубьев в передаче, а также шесть видов сопряжений и восемь видов допусков на боковой зазор.

Перечень основных средств контроля зубчатых венцов: прибор для комплексного однопрофильного контроля, прибор для абсолютного измерения накопленной погрешности шага, приборы для относительного измерения накопленной погрешности шага, кинематомер, зубомерный микрометр, нормалемер, биениемер, прибор для двухпрофильного контроля (межцентромер), волномер, эвольвентомер, шагомер накладной, ходомер (для контроля линии зуба), зубомер смещения, штангензубомер.

Основные особенности современного состояния метрологического обеспечения зубчатых колес: практически для контроля каждой погрешности применяется свое средство измерения; каждый из этих приборов имеет высокую стоимость; требуется специально обученный персонал, в некоторых случаях для работы только на отдельных приборах; метрологическое оборудование, как правило, работает не более 1000 часов в год.

Приборы для контроля цилиндрических зубчатых колес стандартизованы и бывают двух типов:

1. станковые приборы (СЦ);
2. накладные приборы (НЦ).

По ГОСТ 25513-82 условные обозначения приборов в зависимости от вида измеряемых зубчатых (червячных) колес и червяков, относительного расположения измеряемого зубчатого (червячного) колеса, размеров измеряемого зубчатого (червячного) колеса, от измеряемых параметров и класса точности прибора должны выполняться по схеме, показанной на рис. 1.



Рис. 1. Код расшифровки условного обозначения приборов по ГОСТ 25513-82

Пример условного обозначения прибора для измерения цилиндрических зубчатых колес, станкового, для зубчатых колес с модулем 1 мм, для измерения кинематической погрешности, класса точности А:

C-SI-1-A

Основные современные тенденции в измерении зубчатых колес: не просто измерение детали с заключением «годная – негодная», а анализ отклонений с обратной связью с производством; более высокая точность измерений; более высокая скорость измерения; возможность измерения модификаций и топографии зуба; достоверность измерений; выдача стандартизованных протоколов.

Зубоизмерительные машины. Зубоизмерительная машина является средством аналитического контроля отклонений зубчатого венца. Применение этого средства контроля обеспечивает оптимальное качество контроля и представления результатов проверки параметров зубчатого венца. Получаемые результаты дают полную информацию о причинах возникновения погрешностей позволяют использовать эту информацию для соответствующей корректировки технологии изготовления детали. К недостаткам данного метода проверки следует отнести сложность в применении зубоизмерительной машины непосредственно около станка – являясь метрологическим средством очень высокой точности, машина требует установки в специально подготовленное помещение. При получении диаграммы профиля можно определить пять основных причин возникновения данной погрешности: биение фрезы на оправке (может быть вызвано плохой фрезой, поврежденной оправкой или загрязнением оправки при монтаже); неправильная заточка фрезы (фреза была переточена с радиальным биением из-за установки с перекосом на оправку или оправки на заточной станок); слабо закрепленная или изношенная оправка в противоопоре станка; слишком большой люфт шпинделя фрезы фрезерного станка; слишком большой люфт стола фрезерного станка.

Измерительные центры с ЧПУ от компании «Mahr». Рассмотрим основные конструктивные особенности зубоизмерительных машин на примере машин фирмы Mahr (Германия). Эти зубоизмерительные машины обладают уникальной встроенной системой термокомпенсации, что обеспечивает точность измерения даже при колебаниях температуры в помещении.

Функциональные возможности: сравнение параметров колес до и после термической обработки (результат представляется в графическом виде, что позволяет легко и быстро определить деформации детали при термической обработке), измерение «колес» с определением их основных параметров, измерение колеса после операции зубофрезерования с исключением влияния следа от подачи; измерение формы и размеров тел вращения (т. е. деталей с зубчатыми венцами), также позволяют контролировать конические зубчатые колеса, червяки и червячные колеса, колеса с торцовым зубом и венцы синхронизаторов, без конструктивных изменений возможно измерение зуборезных инструментов – червячных фрез, долбяков и шевверов.

Таблица 1.

Основные характеристики приборов компании «Mahr»

модель	GMC200	GMC260	GMC350	GMC450	GMC500	GMC650	GMC800	GMC1000	GMC1500
Модуль зубчатого венца, мм	0,5-1,6	0,5-12	0,5-12	0,5-12	1-12	1-15	1-15	1-20	1-20
Максимальный диаметр детали, мм	200	260	350	450	500	650	800	1000	1500
Угол наклона зуба, град.	0-90								
Расстояние между центрами	20-400	20-450	20-600	20-600	20-700	20-700	50-1000	50-1000	200-2000
Максимальный вес детали, кг	50	50	80	200	300	300	800	1500	8000
Вес прибора, кг	2078	2120	2150	2238	2508	2970	5648	5814	5920
Габариты прибора, мм	1092x925x1561	900x1100x1810	1292x945x1761	1300x1030x1870	1552x1275x1965	1702x1405x1990	1770x1664x2570	1900x1764x2570	2150x1864x2570

Измерительные центры с ЧПУ от компании «Линкс-Раша». Компания «Линкс-Раша» предлагает машины и приборы для измерения зубчатых колес. Измерительные центры с ЧПУ выполняют широкий спектр операций и проводят проверку и измерения: параметров зуба, шага, профиля; фасонных, гребенчатых, червячных, модульных фрез; контроля биения; червячных валов и шестерен; прямых и косозубых конических дифференциалов; отклонения между зубьями; радиального биения зубчатого венца; двухстороннего обката за оборот; отклонения между зубьями цилиндрических и червячных пар; вершины делительного конуса конических шестерен в прямом межосевом углу, а также ряд других параметров.

Таблица 2.

Основные характеристики приборов компании «Линкс-Раша»

модели	Модуль зубчатого венца, мм	Максимальный диаметр детали, мм	Угол наклона зуба, град.	Максимальный вес детали, кг	Вес прибора, кг	Габариты прибора, мм
<u>GearSpect DO 0 PC</u>	0,5-2	120	0-90	1	-	-
<u>GearSpect DO-3 PC</u>	0,5-8	280	0-50	20	-	-
<u>GearSpect DO-500 CNC</u>	1-20	500	0-90	300	-	-
<u>GearSpect IMO 1000 K CNC</u>	1-20	1000	0-90	1000	3500	2700x3400x2300

По данным таблиц составлены сравнительные диаграммы характеристик для упрощенного выбора необходимого оборудования.

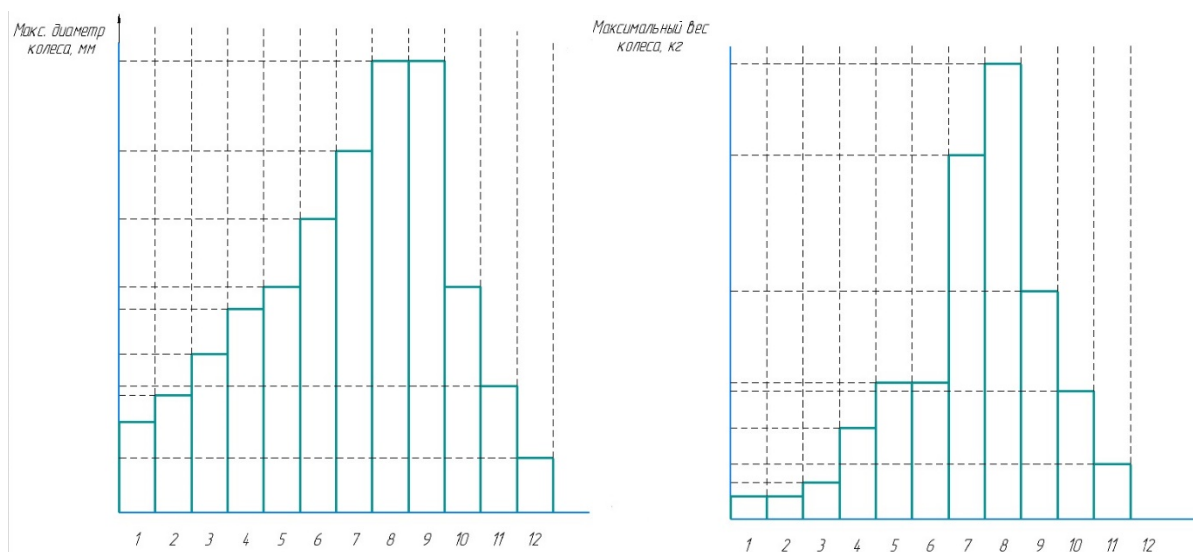


Рис. 2. Сравнительные диаграммы характеристик оборудования
(начало)

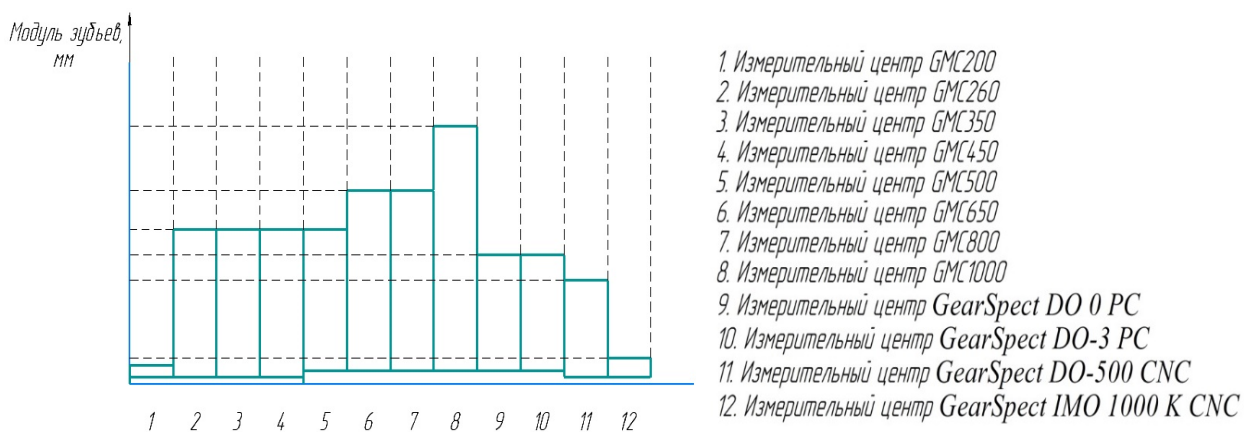


Рис. 2. Сравнительные диаграммы характеристик оборудования
(окончание)

Вывод: современные средства измерения зубчатых колес – зубоизмерительные машины – позволяют выполнить основные требования, которые определяются современной конструкцией и технологией изготовления. Зубоизмерительная машина обеспечивает измерение зубчатых колес в течение 3-х минут, при замене инструмента, на стыке рабочих смен и при изменениях в технологическом процессе, также обеспечивает измерение топографии зуба с оценкой пятна контакта, не имеет ограничений в части измерения колес с нестандартными параметрами профиля и линии зуба (модификации по профилю и линии зуба). Практически зубоизмерительная машина как современное средство измерения заменяет все ранее применявшиеся приборы для контроля зубчатых колес.

Список литературы

- [1]. *Елисеев Ю.С.* Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. – М.: Высшая школа, 2001 – 492 с.
- [2]. *Калашиников А.С.* Технология изготовления зубчатых колес – М.: Машиностроение, 2004 – 480 с.
- [3]. *Тайц Б.А.* Точность и контроль зубчатых передач – Л.: Машиностроение, 1978 – 137 с.
- [4]. *ГОСТ 1643 – 81.* Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.
- [5]. *ГОСТ 25513-82.* Приборы для измерения зубчатых колес. Условные обозначения. Термины и определения.
- [6]. *Допуски и посадки.* Справочник в 2-х т./В.Д. Мягков М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А.Брагинский.
- [7]. *Перель Л.Я.* Подшипники качения: расчёт, проектирование и обслуживание опор.
- [8]. *ГОСТ 2015-84 (СТ СЭВ 4135-83).* Калибры гладкие нерегулируемые. Технические требования.
- [9]. *ГОСТ 1643-81.* Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.

Максимов Дмитрий Евгеньевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmks283@gmail.com

ВЫБОР МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для передачи вращательного движения между валами и втулками применяют шлицевые соединения. Главными достоинствами таких соединений являются: лучшее центрирование деталей; значительно ниже нагрузки на детали; выше прочность соединения при динамических и переменных нагрузках. На точность соединения главным образом влияет выбранный метод изготовления шлицевых поверхностей. Параметрами качества являются: шероховатость поверхности; степень точности; отклонение толщины зубьев; отклонение от параллельности зубьев относительно оси вала; накопленная погрешность окружного шага зубьев и др. В зависимости от типа производства и параметров качества изделий выделяют следующие методы нарезания шлицов:

1. Метод копирования

Метод копирования предусматривает обработку дисковыми профильными фрезами, шлицестроганием и протягиванием. Шлицестрогание и протягивание отличаются высокой производительностью и рекомендуется в условиях крупносерийного и массового производства, а так же повышение производительности шлицеобработки дисковыми профильными фрезами может быть достигнуто за счет установки на одной оправке двух-трех фрез и одновременной обработки зубьев в соответствующем количестве деталей, что дает возможность применить этот метод в крупносерийном и массовом производстве. Если главными параметрами шлицевой поверхности является шероховатость и степень точности предпочтительнее выбирать метод шлицестрогания. Однако меньшее отклонение толщины зубьев способен обеспечить метод обработки дисковыми фрезами

2. Методы обработки огибанием

Из них выделяют фрезерование червячными фрезами, обработка долбляками на зубодолбежных станках, обработка методом зуботочения. Фрезерование червячными фрезами является в настоящее время наиболее отработанным и распространенным способом обработки зубьев на валах в условиях крупносерийного и массового производства. Точность профиля и других элементов шлицевого вала при обработке методом обкатки выше, чем при применении метода копирования. Трудоемкость нарезания зубьев на валах червячной фрезой в среднем составляет 50–60% от общей трудоемкости изготовления, поэтому это метод применяют в серийном производстве. Метод зубодолбления обеспечивает высокую точность профиля и взаимного расположения зубьев. Одним из главных достоинств этого метода является возможность производить обработку зубьев на валах, конструкция которых не позволяет производить фрезерование. Методом зуботочения можно нарезать зубья прямобочного, эвольвентного и треугольного профилей как с прямоли-

нейным, так и спиральным направлением образующей. Целесообразная область применения – чистовое нарезание при крупносерийном и массовом производстве. При выборе обработки методом огибания следует отдать предпочтение обработке червячными шлицевыми фрезами поскольку данный метод позволит обеспечить необходимое качество изделия и сохранить высокую производительность.

3. Методы чистовой обработки зубьев вала

Существует два метода чистовой обработки зубьев: шлифование зубьев и скоростное фрезерование с большими подачами боковых поверхностей зубьев. Из всех известных способов наилучшие результаты как в смысле точности, так и производительности получаются при шлифовании зубьев одним профильным кругом. Шлицешлифовальные станки обеспечивают высокую точность размеров и взаимного расположения зубьев. Значительного повышения режимов резания и стойкости абразивного инструмента можно достигнуть за счет применения для чистового шлифования кругов из эльбора, слой которого наносят на поверхность керамического круга. Чистовое фрезерование боковых граней зубьев прямобочного профиля производят набором двух твердосплавных фрез, что расширяет возможности изготовления валов повышенной твердости. Обработку можно выполнять на шлицешлифовальных станках с небольшой их модернизацией. Анализ стоимости технологической обработки показал, что метод черновой обработки зубьев двухзаходными червячными фрезами в сочетании с чистовой обработкой боковых поверхностей зубьев комплектом двух твердосплавных торцовых фрез позволяет снизить машинное время полной обработки в 2,3 раза, штучное время в 1,8 раза и технологическую стоимость на 40% по сравнению с однократным фрезерованием однозаходной червячной фрезой [7].

4. Способы изготовления шлицевых поверхностей методом пластических деформаций.

По сравнению с методами обработки резанием холодное пластическое формообразование имеет существенные преимущества. При накатывании происходит упрочнение материала детали и повышение твердости поверхности. Износостойкость шлицевых валов, полученных пластическим деформированием, выше, чем фрезерованных, на 30–40%. Накатанные зубья при скручивании на 10–20 прочнее фрезерованных. После накатывания предел прочности на разрыв у образцов, вырезанных из поверхностных слоев вала, на 20–80%, а центральных слоев на 40% выше, чем без накатки. При пластическом формообразовании отсутствует разрушение зерен структуры, зерна располагаются по контуру профиля зубьев, что повышает усталостную прочность зуба и уменьшает вероятность появления трещин. Одним из важнейших преимуществе метода пластических деформаций является низкая шероховатость. Однако в связи с высокой стоимостью оборудования и оснастки и сложностью переналадки применение этого метода шлицеобразования экономически целесообразно только в условиях крупносерийного и массового производства, при закреплении за шлиценакатным станком одного типоразмера детали [7].

Подробные сведения о параметрах обработанного изделия для различных методов обработки приведены в диаграмме 1 и табл. 1.

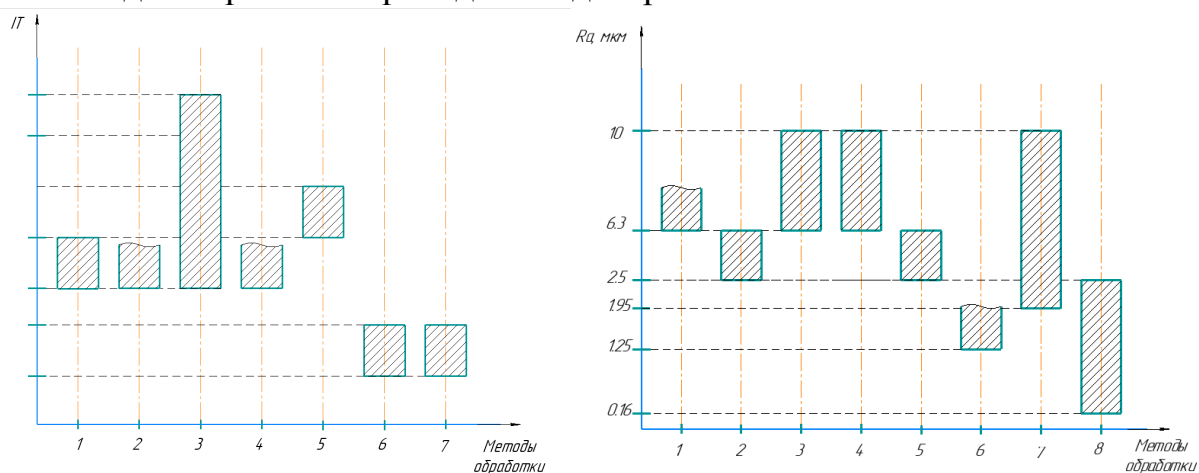


Диаграмма 1. Параметры шероховатости (справа) и точности (слева) при обработке: 1 – дисковыми профильными фрезами; 2 – шлицестроганием; 3 – червячными фрезами; 4 – долбяками на зубодолбежных станках; 5 – зуботочением; 6 – шлифование зубьев; 7 – скоростным фрезерованием; 8. методом пластических деформаций

Таблица 1.

Параметры качества получаемого изделия для различных методов

Метод обработки	Шероховатость обработанной поверхности R_a , мкм	Степень точности	Отклонение толщины зубьев, мм	Отклонение от параллельности зубьев относительно оси вала, мм	Накопленная погрешность окружного шага зубьев, мм
1. Обработка дисковыми профильными фрезами	6,3	8-9	0,015-0,05	-	-
2. Обработка шлицестроганием	2,5 - 6,3	8	0,05	0,04 (на длине 100 мм)	-
3. Обработка протягиванием	-	-	-	-	-
4. Обработка червячными шлицевыми фрезами	6,3 - 10	8-12	0,025-0,12	0,04 (на длине 100 мм)	-
5. Обработка долбяками на зубодолбежных станках	6,3 - 10	8	-	-	-
6. Обработка методом зуботочения	2,5 - 6,3	9-11	до 0,1	0,04 (на длине 100 мм)	-
7. Шлифование зубьев	1,25	5-6	-	0,009 (на длине 100 мм)	0,007
8. Скоростное фрезерование	1,95-9,5	5-6	-	0,045 (на длине 100 мм)	0,02-0,04
9. Обработка методом пластических деформаций	0,16-2,5	-	-	-	-

Список литературы

[1] *Должиков В.П.* Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве: учебное пособие / В. П. Должиков. – 3-е изд., стер. – СПб: Лань, 2019. – 328 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/119289>

[2] *Матвеев А.С.* Справочник кузнеца / Матвеев А.С., Кочетков В.А. / Под ред. В.Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2011. – 360 с. – Текст: электронный // ЭБС "Консультант студента": [сайт]. – URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785942755799.html>

[3] *Тимирязев В.А.* Основы технологии машиностроительного производства: учебник / В.А. Тимирязев, В.П. Вороненко, А.Г. Схиртладзе. – СПб: Лань, 2012. – 448 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/3722>

[4] *Бахвалов В.А.* Процессы обработки заготовок: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2007. – 448 с.

[5] *Егоров М.Е., Деменев В.И., Дмитриев В.Л.* Технология машиностроения: учебник для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 1976. – 534 с.

[6] *Маталин А.А.* Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – 4-е изд., стер. – СПб: Лань, 2016. – 512 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/71755>

[7] *Скундин Г.И., Никитин В.Н.* Шлицевые соединения. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с. ил. – URL: <http://techlib.org/books/skundin-shlicevye-soedineniya/>

Родионов Денис Анатольевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: thegroundgames9@gmail.com, d_rodionov99@mail.ru

ВЫБОР МЕТОДА НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧЕРВЯКОВ

Нарезание резьбы червяков может осуществляться профильными резцами на токарно-винторезных станках, позволяющих нарезать модульную резьбу [1]. Наиболее точно шаг червяка можно обеспечить на станках с ходовым винтом, шаг которого кратен π .

Черновое нарезание витка червяка следует производить резцом, установленным по оси заготовки, т.к. в этом случае создаются наиболее благоприятные условия резания.

Черновое нарезание червяка любого профиля можно производить двусторонним резцом прямолинейного профиля. При этом архимедов червяк будет иметь теоретически правильный профиль витков, а два других типа червяков получают искажения профиля, которые должны быть устранены при чистовом нарезании.

Чистовое нарезание для получения правильного (без теоретических искажений) профиля целесообразно производить резцами прямолинейного профиля, учитывая особенности каждого типа червяка посредством соответствующей установки резца.

При обработке архимедова червяка, имеющего прямолинейный профиль в осевом сечении, резец устанавливают так, чтобы его режущие кромки лежали в плоскости оси червяка.

При раздельной обработке левой и правой сторон витка (у червяков с большим углом подъема витка) установка каждого резца должна обеспечить положение его режущей кромки в осевой плоскости червяка.

Раздельная обработка сторон резьбы рекомендуется для червяков с большим углом подъема витка, т.к. использование двустороннего резца приводит к разным условиям резания по левой и правой сторонам.

Конволютный червяк может иметь прямолинейный профиль в сечении, нормальном к впадине, или сечении, нормальном к витку. Резцы, имеющие прямолинейный профиль, устанавливают так, чтобы режущие кромки лежали в плоскости соответствующего сечения.

Нарезание конволютного червяка первого типа производится двусторонним резцом, а второго типа – раздельно правой и левой сторон витка односторонними резцами.

Эвольвентный червяк имеет прямолинейный профиль в сечении плоскостью, касательной к основному цилиндру. Резцы, имеющие прямолинейный профиль, устанавливают так, чтобы их режущие кромки лежали в горизонтальных плоскостях, касательных к основному цилиндру.

Обработка со смещением от осевой плоскости при углах подъема витка более 5° не рекомендуется из-за неблагоприятных условий резания. Поэтому

червяки с углом подъема более 5° рекомендуется резать резцами с криволинейным профилем с установкой их в осевом или нормальном сечении.

При нарезании многозаходных червяков необходимо деление. Используются три способа деления:

- с помощью специального патрона, имеющего делительный диск;
- поворотом одной сменной шестерни гитары станка, имеющей число зубьев, кратное числу заходов червяка;
- смещением суппорта в продольном направлении на величину, равную шагу червяка без поворота червяка.

Нарезание червяков возможно дисковыми фрезами на резьбофрезерных станках [2-4]. Фрезу устанавливают так, чтобы ее ось вращения была бы наклонена на угол подъема витка червяка λ на среднем диаметре. При такой установке червяк профилируется в нормальном сечении по впадине. Поэтому для конволютного червяка фреза должна иметь прямолинейный профиль, а для архимедова и эвольвентного – криволинейный. Он должен специально рассчитываться. Но даже при нарезании конволютного червяка неизбежны завалы или искажения профиля витка у основания и на вершине из-за разных углов подъема витка λ на внутреннем и наружном диаметрах (рис. 1).

Эти искажения возрастают с увеличением угла λ , диаметра фрезы и модуля червяка (рис. 2). Поэтому необходимо корректировать профиль фрезы. Фрезы с рассчитанным криволинейным профилем могут использоваться только для одного конкретного червяка, то есть они лишены универсальности. Обладая значительно большей производительностью, чем нарезание резцами, дисковые фрезы при нарезании червяков не обеспечивают достаточной точности и качества поверхностей витков червяка. Они применяются в основном для чернового фрезерования. В этом случае можно использовать фрезы с прямолинейным профилем, оставляя припуск под чистовую обработку, превышающий получаемую погрешность профиля червяка.

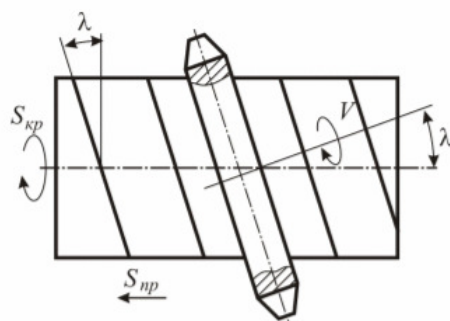


Рис. 1. Схема нарезания червяка дисковыми фрезами

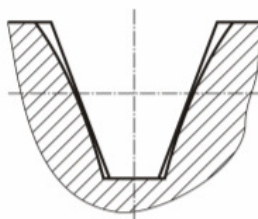


Рис. 2. Схема искажения профиля червяка

На рис. 3, *а* показана схема резьбофрезерования с наружным касанием фрезы относительно заготовки. Хорошие результаты по производительности и шероховатости поверхностей можно получить при фрезеровании резьбы по схеме внутреннего касания (охватывающее фрезерование) (рис. 3, *б*) [2].

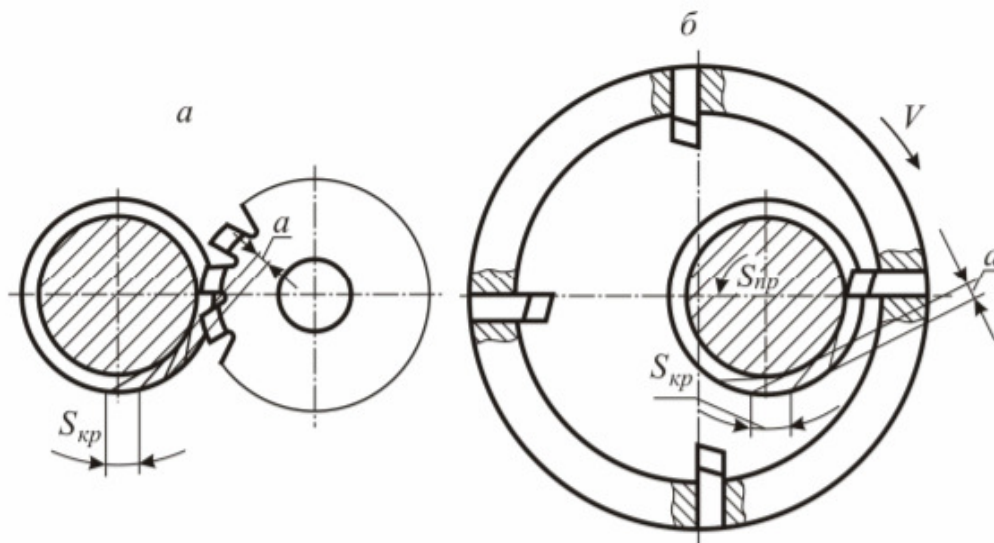


Рис. 3. Схемы резьбофрезерования:
а – наружное касание; *б*-внутреннее касание

При одной и той же максимальной толщине срезаемого слоя круговая подача при работе по схеме внутреннего касания значительно (в 2...3 раза) больше, чем при работе по схеме наружного касания. Это дает возможность при прочих равных условиях увеличить производительность примерно в то же число раз. Использование большого диаметра охватывающей головки открывает возможность оснащения ее взаимозаменяемыми резцами, оснащенными твердым сплавом. Из сравнения схем (рис. 3, *а* и 3, *б*) нетрудно заметить, что при охватывающем фрезеровании каждый зуб инструмента значительно большее время находится в контакте с изделием, что способствует повышению плавности работы [4].

При нарезании червяков пальцевыми (концевыми) фрезами кинематика процесса полностью аналогична дисковому фрезерованию. Фрезу устанавливают так, чтобы ее ось вращения пересекала ось червяка под углом 90°. Все вопросы профилирования фрез аналогичны дисковым фрезам, однако искажения профиля конволютного червяка не возникает. Производительность ниже, чем у дисковых фрез. Пальцевые фрезы используют для нарезания крупномодульных червяков в единичном и мелкосерийном производствах.

Возможно нарезание червяков червячными фрезами по методу обката, так как любой червяк можно рассматривать как зубчатое колесо с числом зубьев, равным числу заходов червяка.

Нарезание проводят на универсальных зубофрезерных и шлицефрезерных станках. Этим способом нарезают эвольвентные червяки с большим углом подъема витка (обычно многозаходные). Обработка производится червячными фрезами с прямолинейной режущей кромкой. При нарезании одно- и малозаходных червяков с небольшим углом подъема режущие кромки чер-

вячной фрезы загружены со значительной неравномерностью. Кроме этого конструкции универсальных станков (зубо- и шлицефрезерных) не позволяют нарезать мало- и однозаходные червяки, так как одному обороту фрезы должен соответствовать $1/z$ оборота червяка (где z – число заходов червяка). Следовательно, для однозаходного червяка одному обороту фрезы соответствует один оборот нарезаемого червяка, а кинематика станков не рассчитана на обеспечение такого соотношения. Данный способ обеспечивает высокую производительность, так как все витки многозаходных червяков нарезают одновременно, однако получаемая точность невысока (~ 9-я степень), поэтому его применяют на предварительных операциях.

Список литературы

[1] Гапонов Д.Е., Кузнецов Е.Ю., Ямников А.С. Анализ способов нарезания резьбы червяков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 10. С. 59-63.

[2] Прогрессивная технология обработки винтовых поверхностей и резьб. / А.С. Ямников [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008 – 233с.

[3] Солянкин Д.Ю., Ямников А.С. Относительная производительность фрезоточения резьб / Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». №6(284) 2010. С. 109-114.

[4] Технология изготовления деталей и сборки металлообрабатывающих станков и автоматических линий. / Л.Т. Боярский, Н.П. Коршиков. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 312-314.

[5] Сидоренко А.К., Карцев А.К., Шатский Е.Е. Изготовление зубчатых и червячных передач. – М.: Машгиз, 1954.

[6] Справочник металлиста. Т.5. – М.: Машгиз, 1960 – С. 939-977.

[7] Основы технологии машиностроительного производства [Электронный ресурс]: Учебник / В.А. Тимирязев, В.П. Вороненко, А.Г. Схиртладзе Под ред. В.А. Тимирязева. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – С. 220-222. URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/3722/#223> (дата обращения: 01.07.2020).

[8] Брюханов В.Н. Автоматизация производства: учебник // В.Н. Брюханов, А.Г. Схиртладзе, В.П. Вороненко / Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 2005. – 367 с.

[9] Пуш В.Э. Металлорежущие станки: учебник для вузов // В.Э. Пуш, В.Г. Беляев, А.А. Гаврюшин и др. / Под ред. В.Э. Пуш. – М.: Машиностроение, 1986. – 574 с.

[10] Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. // Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1994. – 558 с

Тоиржонов Омадбек Зафаржон угли – студент КФ МГТУ им. Баумана.
E-mail: omadbek.toirjonov.99@mail.ru.

Трегубов А.В.

ВЫБОР МЕТОДА ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ СТАЛИ

Профилирование зубьев при нарезании зубчатого венца может осуществляться по методу копирования или обката. При нарезании методом копирования в качестве зуборезного инструмента используют дисковые или пальцевые модульные фрезы.

Нарезание выполняют на горизонтальных и вертикальных универсальнофрезерных станках с использованием делительной головки для периодического поворота зубчатого колеса на шаг между зубьями.

Дисковые фрезы применяют для нарезания зубчатых колес малых модулей, пальцевые – для зубчатых колес средних и больших модулей, а также для нарезания шевронных зубчатых колес.

Метод применяют для нарезания зубчатых колес невысокой (8...12) степени точности. При этом производительность обработки на универсально-фрезерных станках также является невысокой. Однако преимуществом данного метода является его простота и доступность: возможность нарезания зубчатых колес на универсальных станках в различных мастерских без применения специального зуборезного оборудования.

Нарезание зубчатых колес по методу обкатки (огибания) выполняют на специальных зуборезных станках, где в качестве зуборезного инструмента используют червячные фрезы, долбяки, режущие рейки (гребенки), обкатные резцы. Боковая поверхность нарезаемых зубьев формируется при этом как огибающая последовательных положений режущих кромок инструмента при их движении относительно заготовки.

При вращении червячная фреза создает геометрию режущей (производящей) рейки, которая, зацепляясь с колесом, осуществляет его нарезание. В свою очередь, долбяк при осевом перемещении и вращении создает геометрию режущего (производящего) колеса, которое, зацепляясь с заготовкой, нарезает зубья. Требуемую последовательность положения режущих кромок инструмента относительно формируемого профиля зубьев получают в результате кинематически связанных движений резания и подачи, создаваемых зуборезным станком, что определяет высокую точность обработки. Производительность нарезания зубьев по методу обкатки значительно более высокая, так как происходит непрерывное формообразование, при котором движения формообразования и деления совмещены во времени.

Шевингование – процесс чистовой обработки боковых поверхностей зубьев колес, в том числе срезания гребешков волнистости после зубофрезерования. Для шевингования применяется специальный инструмент – шевер – многолезвийный инструмент в виде зубчатого колеса или рейки с лезвиями на боковых поверхностях зубьев. Резание осуществляется за счет относительного скольжения между зубьями инструмента и заготовки в процессе их зацепления. Оси заготовки и инструмента должны быть перекрещены.

Достоинства шевингования – увеличение точности зубчатого венца, получение высокого качества поверхностей зубьев, высокая производительность процесса обработки. Шевингование уменьшает шум при эксплуатации колес. Шевингование применяют в крупносерийном и массовом производстве.

Шлифование зубьев производится для окончательной обработки обычно закаленных зубчатых колес с целью достижения необходимой точности размеров и формы зубьев и малой шероховатости их поверхности. Применяются как методы копирования, так и методы обкатки.

Процесс зубошлифования малопроизводителен. Оборудование и инструмент дорогостоящие. Применение устройств ЧПУ в управлении процессом позволяет использовать зубошлифование и в мелкосерийном производстве. В целом, способ получения зубчатых колес механообработкой является малопроизводительным и дорогостоящим. Поэтому он вытесняется другими методами обработки, в частности, обработкой давлением (прецизионной штамповкой, холодным накатыванием, спеканием).

Зубопритирку выполняют на зубопритирочных станках для чистовой отделки зубчатого венца. Притирка осуществляется путем одновременной обкатки зубчатого колеса тремя притирами из серого мелкозернистого чугуна 180...220 НВ. В качестве притиров используют сопряженные зубчатые колеса одного модуля. Толщина зуба притиров меньше толщины зуба нарезаемого колеса на 0,07м, при этом число зубьев притира не должно быть кратным числу зубьев колеса. Допустимая погрешность изготовления притиров составляет: по профилю – 0,005 мм, по шагу – 0,01 мм, по биению зубьев – 0,015 мм.

В результате наклонного расположения сопрягаемых боковых поверхностей колеса и притиров происходит профильное скольжение, которое обеспечивает качественную притирку по всей ширине обеих боковых поверхностей зубьев. Искусственное изнашивание боковых поверхностей зубьев колеса в соответствии с профилем зубьев притира формирует поверхность высокого качества $Ra = 0,16...0,32$ мкм, что увеличивает плавность работы передачи, снижает шум и повышает долговечность колес.

Зубопритирку выполняют после зубошлифования для повышения качества ответственных зубчатых колес. Максимальный слой материала, удаляемый при притирке, не должен превышать 0,05 мм. Значительные погрешности бокового профиля зубьев притирка не исправляет.

Ниже приведена таблица методов обработки зубьев.

Таблица 1. (начало)

Методы обработки зубьев. Их преимущества и недостатки

Название метода	Инструмент для обработки	Преимущества метода	Недостатки метода
1	2	3	4
Метод копирования	Дисковые и пальцевые фрезы	Возможность нарезания зубьев на универсальном фрезерном оборудовании	Низкая производительность, низкая степень точности обработки зуба

Таблица 1. (окончание)

1	2	3	4
Метод обкатки	Червячные фрезы, долбяки	Высокая производительность и точность; Универсальность режущего инструмента	Сложная кинематика зуборезных станков и конструкция самих инструментов
Шевингование	Круглый шевер, шевер-рейка, шевер-червяк	Увеличение точности зубчатого венца, получение высокого качества поверхностей зубьев, высокая производительность процесса обработки.	Отсутствие жесткой кинематической связи между шевером и обрабатываемым колесом
Шлифование	Шлифовальные круги	Универсальность, высокая точность, малая шероховатость, обработка закаленных заготовок	Износ шлифовального круга
Притирка	Притир	Высокий класс чистоты обработанной поверхности, высокую точность и исправляет геометрическую форму деталей	Увеличение времени притирки приводит к местным выработкам профиля и к снижению качества колес

Список литературы

[1]. *Безъязычный В.Ф.* Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]: учеб. / В.Ф. Безъязычный – М.: Машиностроение, 2016. – 568 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/107152> (дата обращения: 21.03.2021).

[2] *Обработка зубчатых колес: учебн. пособие/* сост. Пегашкин В.Ф.; М-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с

[3] *Основные свойства строительных материалов* [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторным работам для студентов всех направлений подготовки, реализуемых НИУ МГСУ / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т, каф.строительных материалов; сост. М.Б. Каддо, О.Б. Ляпидевская, С.М. Пуляев [и др.]. URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/4323/#622> (дата обращения: 21.03.2021)

[4] *Чернышов Е.А., Паньшин В.И.* Литейные технологии. Основы проектирования в примерах и задачах: учебное пособие. 2-е изд., испр. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 288 с.

Трегубов Артем Викторович – студент КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: artytregubov@yandex.ru

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ

На данный момент выбор способа изготовления заготовки является одной из наиболее значимых задач в машиностроении. Для того, чтобы выбрать подходящий метод необходимо учитывать множество параметров детали, таких как: материал, габариты и масса детали.

Каждое из этих свойств напрямую влияет на выбор метода, например, при использовании метода пластической деформации, чем ниже пластичность материала, тем сложнее получить заготовку высокого качества способом горячего, а также холодного деформирования. Если заготовку не получить методами деформирования, то можно воспользоваться литьем расплавленного материала в заранее подготовленные формы, но здесь также материал влияет на выбор метода, так как способ литья зависит от его литейных свойств, температуры плавления, ликвации и т.д. [1]

Габариты и масса детали так же влияют на выбор метода изготовления заготовки, многие методы ограничены по максимальным габаритам изготавливаемых изделий вследствие ограниченных технологических возможностей [2].

Теперь рассмотрим методы изготовления заготовки типа «Шкив», учитывая ее массу, серийность производства, материал и габариты детали. Материал детали СЧ15, химический состав стали указаны в табл. 1. Данный материал используют для литья, так как он обладает высокими литейными свойствами, для пластической деформации данный материал не подходит. Годовая программа выпуска деталей составляет 4000 шт., из этого следует, что производство деталей является среднесерийным. Деталь является малогабаритной, с учетом перечисленных характеристик детали можно выбрать один из следующих способов: литье в песчано-глинистые формы, литье в кокиль и литье по выполняемым моделям. [3]

Таблица 1.

Химический состав стали СЧ15

C	Si	Mn	S	P
3.5-3.7	2-2.4	0.5-0.8	до 0.15	до 0.2

В научно исследовательской работе был проведен сравнительный анализ способов изготовления заготовок для детали типа «Шкив», все параметры анализа сведены в табл. 2.

По этой формуле была рассчитана себестоимость изготовления заготовок:

$$C_3 = C_M + C_{инстр}$$

где C_M – стоимость материала; $C_{инстр}$ – стоимость инструмента.

Таблица 2.

Параметры методов получения заготовок

Способы получения заготовок	Максимальная масса заготовок, т	Точность заготовок	Шероховатость поверхности по Ra, мкм	Типы производства	Себестоимость производства одной детали, руб.
Литье в песчано-глинистые формы, ручная формовка	до 100	17	20-80	Единичное и мелкосерийное	138,6
Литье в песчано-глинистые формы, машинная формовка	до 10	14	5-20		
Литье в оболочковые формы	до 0,15	13	10-25	Серийное, крупносерийное, массовое	101,6
Литье в кокиль	до 7	12	20-25		101,6

По результатам расчета себестоимости изготовления заготовок в зависимости от их количества, был составлен график, который показан на рис. 1.

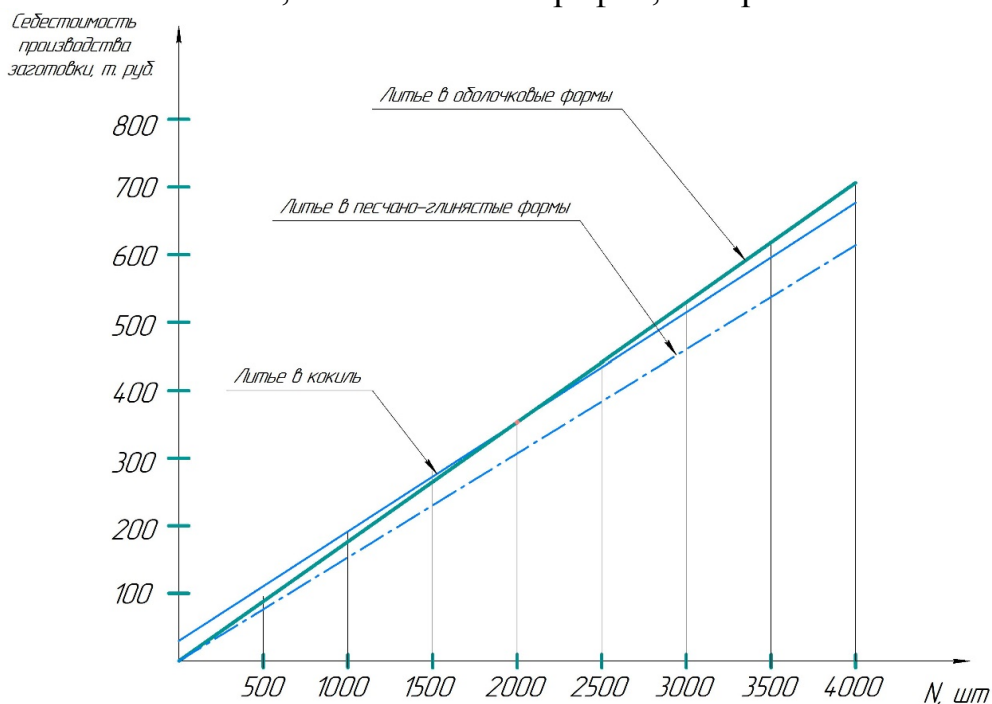


Рис. 1. График зависимости себестоимости производства заготовок в зависимости от количества заготовок

По графику видно, что литье в кокиль предпочтительно при массовом производстве деталей. Для производства заготовок этим способом необходимо дорогостоящее оборудование, а именно кокиль. Самым окупаемым способом изготовления заготовок является литье в песчано-глиняные формы, так как оснастка для этого метода является самой дешевой.

Вывод. Литье в оболочковые формы не так актуально для данной детали, так как себестоимость заготовок хоть и является дешевой, но подготовка материалов дорога, а также очень сложна модельная оснастка. В процессе изготовления заготовок этим способом выделяется большое количество вредных веществ из-за термического разложения смоляного связующего, из-за этого необходимо закупать дополнительное оборудование для очистки воздуха от загрязняющих веществ, что увеличивает капиталовложения, которые возможно в дальнейшем не окупятся.

Себестоимость заготовки в кокиле хоть дешевле себестоимости литья в песчано-глинистые формы, но подготовка оснастки, а именно многоразовых частей кокиля является не простой задачей и очень дорогим вложением. Данный метод больше подходит для более крупного типа производства, так как окупаемость оснастки будет происходить за счет неоднократного использования пресс-форм, а также за счет снижения общего времени производства заготовок.

Литье в песчано-глинистые формы будет наиболее актуально при изготовлении заготовок для данной детали, так как оснастка дешевая и производство форм для заливки может достигать 180-240 шт в час, что позволит быстро наладить производство, и сам процесс литья с учетом оборудования и себестоимости изготовления одной заготовки является самым дешевым и имеют-ся большие шансы на его окупаемость при данных капиталовложениях. [4]

Список литературы

[1]. *Материаловедение* и технологии конструкционных материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие / О.А. Масанский [и др.]. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2015. – 268 с. : табл., граф., ил. URL: biblioclub.ru/index.php?page=book&id=435698

[2]. *Кузнецов В.Г.* Технология литья [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Кузнецов, Ф.А. Гарифуллин, Г.С. Дьяконов; – Казань : КНИТУ, 2012. – 146 с. URL: biblioclub.ru/index.php?page=book&id=258609

[3]. *Ковшов А.Н.* Технология машиностроения [Электронный ресурс]/ А.Н. Ковшов – СПб. : Лань, 2016. – 320 с. URL: <http://e.lanbook.com/book/86015>.

[4]. *Марукович Е.И.* Литейные сплавы и технологии [Электронный ресурс]: монография/ Е.И.Марукович, М.И.Карпенко– Минск: Белорусская наука, 2012.– 443 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/29469>

Куликова Виктория Романовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: vkulikovaaa@mail.ru.

Морозова Д.Д.

ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Процесс изготовления зубчатых колес – это сложный технологический цикл. Он включает следующие основные операции: выбор и проектирование заготовки (в приоритете отливка или штамповка), термическая и механическая обработка, дальнейшая сборка с другими деталями.

В зависимости от вида зубчатого колеса и технологии его обработки некоторые операции могут быть исключены из этой цепочки или повторяться несколько раз. Готовые изделия хранятся и эксплуатируются, при этом их параметры могут претерпевать изменения. [1]

При этом при механической обработке не исключено выявление дефектов заготовок. Они зависят от материалов заготовки, типа заготовки, ее геометрической формы, и т.д.

Заготовки для зубчатых колёс выбирают, исходя из многих факторов, таких как: размеров, материала, конфигурации колеса и объёма выпуска.

Для изготовления зубчатых колес используются следующие виды заготовок: прокат, поковки, штамповки в открытых и закрытых штампах, штамповки на горизонтально-ковочных машинах, а также отливки.

Главной задачей литейного производства является повышение качества отливок, снижение брака и дефектов. Для того чтобы правильно определить причину появления дефектов и принять меры по предупреждению брака отливок, штамповок и поковок все дефекты должны быть классифицированы [2].

Их разделяют на 5 групп:

- дефекты несоответствия по геометрии;
- несплошности в теле отливки;
- дефекты поверхности;
- включения;
- несоответствие по структуре.

Дефекты в заготовках часто возникают из-за материалов, из которых изготавливают зубчатые колеса. Материал зубчатых колес должен обладать необходимой прочностью, износостойкостью и однородной структурой.

Зубчатые колеса изготавливают из сталей 12ХН3А, 20Х, 25ХГТ, 18ХГТ, 40Х и 40ХФА. Чугуны применяются для изготовления крупногабаритных зубчатых колес тихоходных и открытых передач. Чугунные зубчатые колеса изготавливают из серого чугуна СЧ21, СЧ24, модифицированного чугуна СЧ25, СЧ30, СЧ35, а также из высокопрочного чугуна всех стандартных марок. Для неотчетственных зубчатых колес применяют серый чугун СЧ15 и СЧ18. [3]

Выделим 3 представителя от разных классов материалов для изготовления зубчатых колес:

- Сталь конструкционная легированная 40ХН;
- Сталь конструкционная углеродистая 35;
- Серый чугун СЧ20.

На диаграмме наглядно покажем соотношение недостатков в каждом материале.

Флокены образуются преимущественно в стали. Чтобы избавиться от флокенов, нужно уменьшить содержание водорода в стали и обеспечить условия его выделения при охлаждении металла.

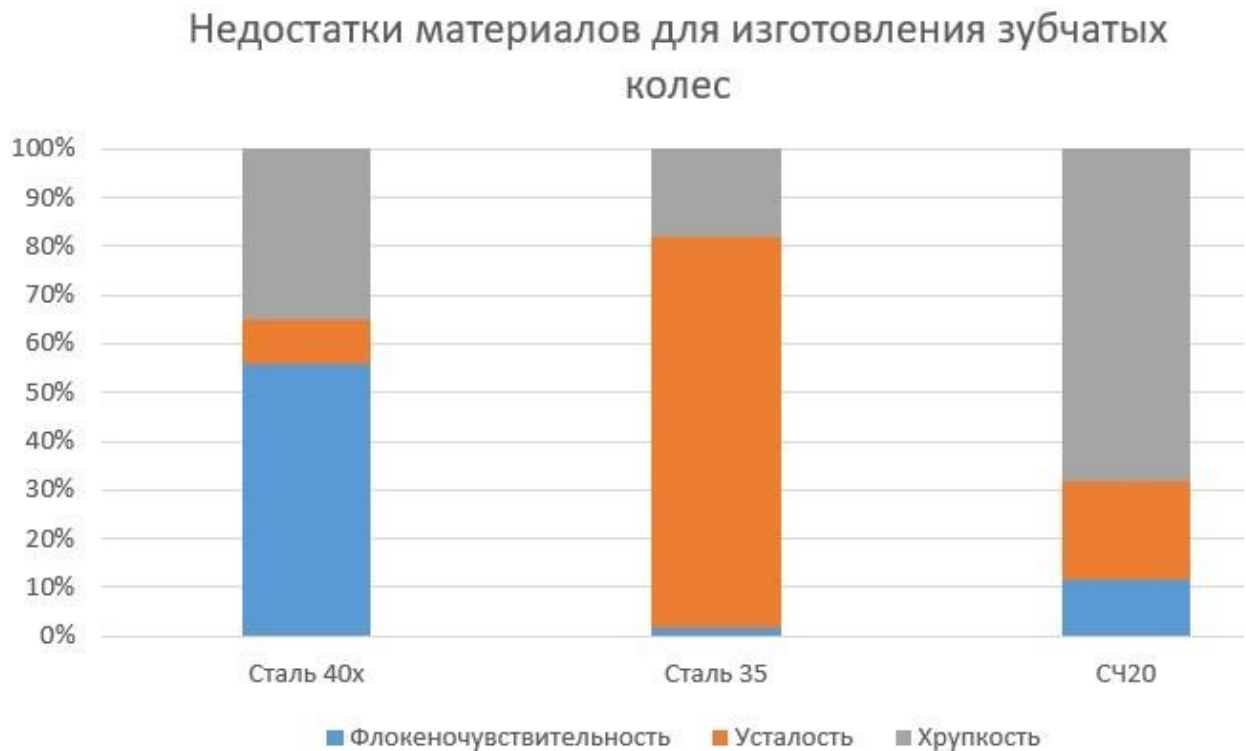


Рис.1 Недостатки материалов для изготовления зубчатых колес

К усталостным относят повреждения и последующие разрушения, возникающие в результате воздействия переменных нагрузок.

Чтобы устранить такой дефект, как усталость, нужно придать деталям форму без закруглённых углов и резких переходов сечений. При пренебрежении этими мерами концентрация напряжений резко увеличивается. Но эту проблему можно решить, просто увеличив размеры детали. Предел усталости не превысится, напряжения пойдут на спад [4].

Параметры и свойства сплава СЧ20 напрямую зависят от режима охлаждения, в процессе медленного охлаждения происходит образование кристаллов железа, сочетание металла и углерода становится перлитным. В ходе такого охлаждения происходит не только увеличение размера кристаллов металла, но и углеродных включений. Такое сочетание приводит к повышенной хрупкости.

Точная классификация дефектов устанавливает реальные причины их возникновения. Безусловно, важно правильно установить причины возникновения дефектов, ведь в дальнейшем довольно легче разработать эффективные

меры по их устранению. Всё это повысит качество выпускаемых заготовок и снизит трудоемкость их получения.

Список литературы

[1] *Безъязычный В.Ф.* Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]: учеб. / В.Ф. Безъязычный М.: Машиностроение, 2016. 568 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/107152> (дата обращения: 21.03.2021).

[2] *Вальтер А.И.* Основы литейного производства: учебник: / А.И. Вальтер, А.А. Протопопов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2016.

[3] *Основные свойства строительных материалов* [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторным работам для студентов всех направлений подготовки, реализуемых НИУ МГСУ / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т, каф.строительных материалов; сост. М.Б. Каддо, О.Б. Ляпидевская, С.М. Пуляев [и др.]. URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/4323/#622> (дата обращения: 21.03.2021)

[4] *Чернышов Е.А., Панышин В.И.* Литейные технологии. Основы проектирования в примерах и задачах: учебное пособие. 2-е изд., испр. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 288 с.

Морозова Дарья Дмитриевна – студентка КФ МГТУ им. Баумана.
E-mail: m_dasha.9@mail.ru.

Старкова Е.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТИ ШЛИЦЕВ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ НА ПРИМЕНЯЕМОСТЬ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В настоящее время очень распространены шлицевые соединения. Им находят применение во многих областях, таких как автомобилестроение, машиностроение, приборостроение и т.д. Поэтому важно исследовать шлицы на прочность, чтобы выяснить какой из его профилей целесообразнее применять в данном соединении.

Шлицевые поверхности применяются для передачи большого крутящего момента и когда нужно обеспечить высокие требования к соосности соединяемых деталей.

Есть несколько типов исследуемых соединений: прямобочные, эвольвентные и треугольные. Их сравнительную характеристику и будем проводить.

Наибольшее распространение шлицы получили в машиностроении. Они часто используются в посадках на вал зубчатых колес, фланцев, маховиков, шкивов ременных передач, звездочек цепных передач, муфт, дисков и др.

В табл. 1 приведена применяемость прямобочных и эвольвентных шлицевых соединений.

Таблица 1.

Применяемость шлицевых соединений

Машина	С прямобочными соединениями	С эвольвентными соединениями
Трактор	ДТ-54А; Т-74; К-701; Т-40; Т-28Х4; Т-25; Т-38М; Т-54В; ТДТ-55; Т-150	ДТ-75; Т-100М; Т-130; Т-4А; МТЗ-50/80; ТДТ-75
Автомобиль	ГАЗ-51А; ГАЗ-53Ф; ЗИЛ-130; УАЗ-452; ГАЗ-69; ГАЗ-24; МЗМА-412	МАЗ-200; МАЗ-500; УРАЛ-275; ЗАЗ-965
Экскаватор	Э-303А; Э-652Б; Э-304В; ЭТЦ-163; ЭТЦ-202А	ЭТЦ-205С; ЭО-262А; Э-153; Э-2131А

При выборе типа соединения необходимо учитывать их конструктивные и технологические особенности. Эвольвентный профиль зуба имеет повышенную прочность, также для их обработки требуется более простой комплект фрез, плюс при экономически выгодном нарезании зубьев долбяком легче применить эвольвентное соединение. Но для прямобочного профиля зуба меньше трудоемкость при шлифовании, также для их обработки требуются более простые и дешевые протяжки.

Основным критерием прочности шлицевых соединений является способность сопротивляться смятию и изнашиванию их рабочих поверхностей.

Смятие и изнашивание рабочих поверхностей зубьев происходит из-за постоянного контакта с ними напряжениями смятия в рабочих условиях.

На рис. 1 показаны приведенные напряжения изгиба $\sigma_{0 \text{ изг}}$ и смятия $\sigma_{0 \text{ см}}$ для различных ρ_H . При малых ρ_H (узкие и частые шлицы) напряжения смятия невелики, а напряжения изгиба значительны. При больших ρ_H (широкие и редкие шлицы) напряжения смятия превышают напряжения изгиба.

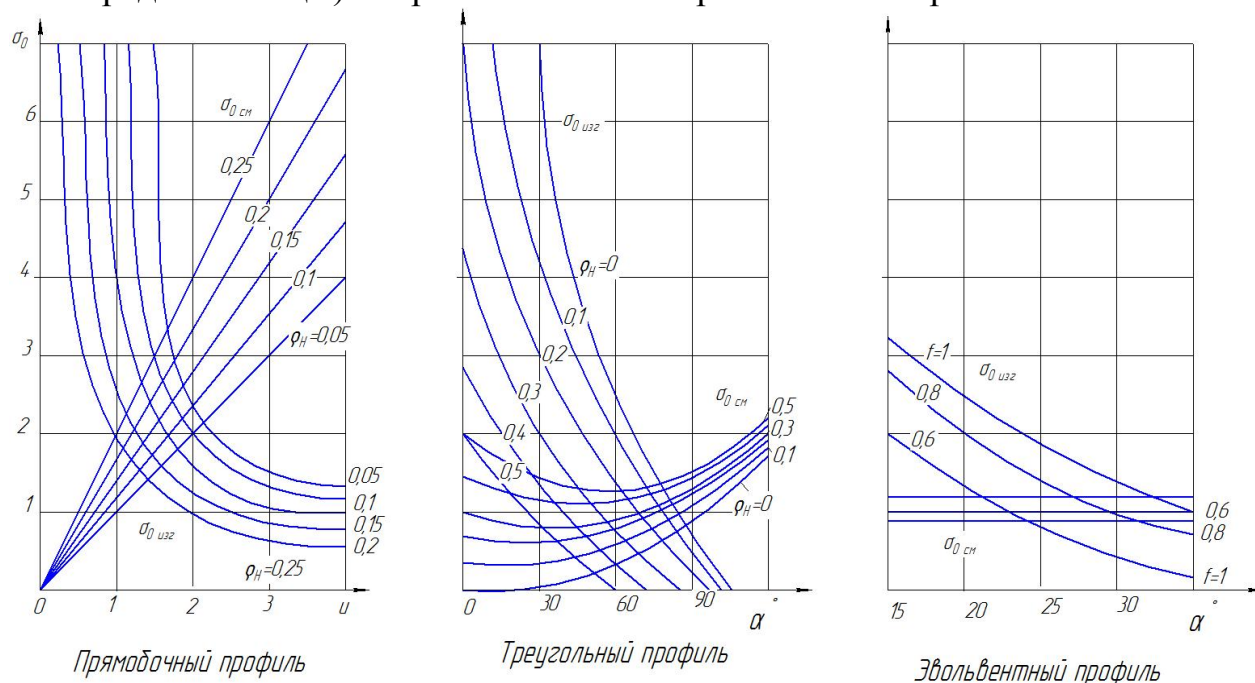


Рис.1. Прочность шлицев различного профиля

Где $\sigma_{0 \text{ изг}}$ – напряжение изгиба, $\sigma_{0 \text{ см}}$ – напряжение смятия, ρ_H – эффективный коэффициент концентрации напряжения.

Сравнительные характеристики разных шлицев можно свести в табл. 2.

Таблица 2.

Сравнение различных профилей по критериям

Критерии	Прямоугольный профиль	Эвольвентный профиль	Треугольный профиль
Нагрузочная способность	Нормальная	Высокая	Низкая
Прочность зубьев	Нормальная	Повышенная	Низкая
Стоимость изготовления	Высокая	Высокая	Высокая
Сложность изготовления	Сложная	Сложная	Сложная
Применение	Для передачи больших вращательных моментов (Например, в коробке передач)	Для передачи больших вращательных моментов (Например, в соединениях карданных валов)	Для передачи небольших вращательных моментов (Например, в приводе стеклоочистителя автомобиля)

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что по всем параметрам выигрывают эвольвентные соединения.

Эвольвентных шлицевых соединения имеют: повышенную прочность эвольвентных зубьев (в связи с утолщением выступа к основанию и наличием галтели); большую нагрузочная способность вследствие большей площади контакта и большего количества зубьев; технологичность изготовления (в производстве требуется меньшая номенклатура инструментов).

Список литературы

[1]. *Технология машиностроения: учебник для среднего профессионального образования* / Марголит Р.Б., Борискин О.И., Мусолин А.К., Иванайский А.В. – М: Издательство Юрайт, 2020 – 414 с.

[2]. *Скундин Г.И., Никитин В.Н. Шлицевые соединения.* – М.: Машиностроение, 1981 – 128 с.

[3]. *Детали машин и механизмов: конструирование. Учебное пособия для СПО* / Ю.Б. Михайлов, В.Г. Дмитриев, В.П. Николаев. – М.: Издательство Юрайт, 2020 – 414 с.

[4]. *Тюняев А.В. Основы конструирования деталей машин. Валы и оси.: учебно-методическое пособие* / А.В. Тюняев, В.А. Горохов, С.А. Коростелев. – СПб: Лань, 2019. – 316 с. [Электронный ресурс] URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/123466/#171> (дата обращения 10.03.2021).

Старкова Екатерина Анатольевна – студент КФ МГТУ им. Баумана.
E-mail: Rotenor-8399@mail.ru

Касумов Н.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ТОЧНОСТЬ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Точность – степень близости результата измерений к принятому опорному значению.

Точность обработки детали является главным критерием, определяющим её пригодность для работы в составе того или иного изделия. Параметр точности идентифицирует соответствие изготовленной детали требованиям конструкторской документации, а также действующих стандартов и технических условий.

Понятие точности обработки включает в себя несколько показателей:

- точность полученных размеров детали, определяемая их отклонениями от значений, указанных в конструкторской документации (т.е. от заданных чертежом);

- точность формы элементарных поверхностей детали, определяемая отклонениями реального профиля от формы профиля, заданной чертежом. Примерами таких отклонений могут служить выпуклость или вогнутость профиля, овальность, огранка, конусообразность, бочкообразность, седлообразность и т.д.

- точность взаимного расположения поверхностей детали. Этот параметр характеризует отклонение реального расположения поверхности от заданного чертежом. Различают следующие отклонения расположения: несоосность, неперпендикулярность, непараллельность, торцовое и радиальное биения, несимметричность и др.

Для достижения точной обработки всегда необходимо отчетливо представлять причины возникновения неточностей (погрешностей) обработки.

Необходимым условием для достижения точности, является выбор рациональных режимов резания.

Следовательно, для достижения наивысшей и стабильной точности изготовления деталей обработку следует вести при минимальных режимах резания.

Список литературы

[1]. Маталин А.А. Технология механической обработки – Л.: Машиностроение, 1977 – 465 с.

[2]. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания – М.: Машиностроение, 1976 – 281 с.

[3]. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент – М: Машиностроение, 1975 – 441 с.

[4]. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания, 2-ое изд. – М.: Машиностроение, 1976 – 146 с.

[5]. *Корсаков В.С.* Точность механической обработки. – М.: Машгиз, 1961 – 397 с.

[6]. *Мурашкин С.Л., Схиртладзе А.Г., Соболейчик А.М. и др.* Технология машиностроения. Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие/ Под ред. С.А. Мурашкина – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003 – 280 с.

[7]. *Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М.* Обработка металлов резанием. – Ростов на Дону: Феникс, 2008 – 411 с.

[8]. *ГОСТ Р 7.0.5-2008.* Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – М.: Изд-во стандартов, 2008 – 47 с.

[9]. *ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.* Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

[10]. *Вылегжанина А.О.* Деловые и научные презентации [Электронный ресурс] / А.О. Вылегжанина. – М.: Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 116 с. : ил., табл. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=446660>. (дата обращения 21.10.2020)

[11]. *Рекомендации по написанию и оформлению курсовой работы, выпускной квалификационной работы и магистерской диссертации* [Электронный ресурс]: учебнометодическое пособие/ Е.В. Зудина [и др.]. – Волгоград: Волгоградский государственный социально-педагогический университет, 2016. – 57 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/57785> (дата обращения 10.11.2020)

[12]. *Рыжков И.Б.* Основы научных исследований и изобретательства. [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 224 с. URL: <http://e.lanbook.com/book/30202>. (дата обращения 25.11.2020)

Касумов Николай Сергеевич – студент МК1-21М КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: nikolaykasumov020598@gmail.com.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ

При нарезании зубьев, как и при любом процессе резания металлов, в зоне резания происходит упрочнение и разупрочнение обрабатываемого металла под действием тепловых и силовых факторов. Упрочнение – повышение микротвердости и уменьшение пластичности, происходящее в результате пластической деформации. Разупрочнение – частичное возвращение материала к исходному состоянию в результате нагрева. Состояние поверхностного слоя зависит от соотношения этих двух процессов.

Помимо этого, на шероховатость влияют конструктивные и технологические параметры. К первым относятся геометрические параметры нарезаемого колеса, физические и механические свойства и тд. А ко вторым режимы резания, износ инструмента, жесткость технологической системы.

Формировании поверхностного слоя происходит в результате разрушения металла при резании, поэтому главными факторами, определяющими величину микронеровностей поверхности после обработки, являются режимы резания – скорость резания и подача.

Для изготовления зубчатых колес часто используют стали, подвергаемые химико-термической обработки, которые довольно пластичны, и склонны к наростообразованию. Нарост – слой сильно деформированного металла на передней поверхности инструмента. Он образуется из-за сильного трения, возникающего между стружкой и инструментом под действием сил резания. На силу резания в большей степени влияет подача. При большой подаче и толщине среза соизмеримой с радиусом скругления фрезы на задней поверхности возрастают силы трения, стружкообразование становится неустойчивым, силы резания – неравномерными, возникают вибрации, приводящие к частому срыву нароста и увеличению шероховатости. Коэффициент трения стружки об инструмент так же зависит от температуры в зоне резания. А температура связана со скоростью резания формулой [1]:

$$\theta = C_0 \cdot V^\alpha,$$

где V – скорость резания; C_0 – коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на температуру; α – показатель, показывающий величину влияния скорости на температуру.

При малых скоростях (примерно до 5 м/мин) температура в зоне резания невелика, коэффициент трения мал и образование нароста не происходит, а при очень высоких скоростях (больше 60 м/мин) из-за высокой температуры материал заготовки становится более пластичным и трение уменьшается. При чистовом нарезании зубьев нарост не допустим, так как сорвавшиеся частицы могут вдавливаются в обработанный материал и увеличивать микронеровности.

Помимо наростообразования, при увеличении температуры и сил резания происходит изменение микротвердости поверхности – наклеп. Это процесс упрочнения металла при пластической деформации. Металлы имеют упорядоченную структуру, но при механическом воздействии происходит ее изменение: возникновение микродефектов – дислокаций. При увеличении подачи и, соответственно, силы, дислокации увеличиваются и начинают взаимодействовать, образуя новую структуру, способную сопротивляться деформациям. Повышение температуры способствует движению дислокаций и процессу упрочнения, однако при сильном повышении и достижении температуры рекристаллизации происходит разупрочнение и возврат металла к исходному состоянию.

В процессе упрочнения металла при резании, в нем так же возникают остаточные напряжения первого и второго рода.

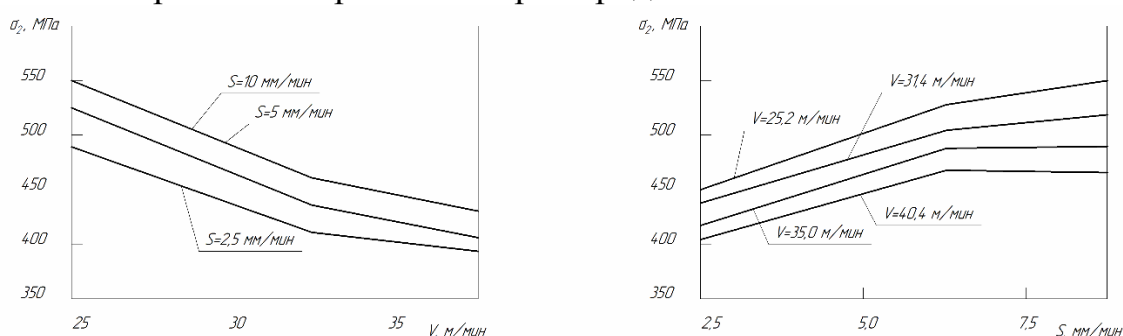


Рис. 1. Зависимость остаточных напряжений второго рода от скорости резания (слева) и от подачи (справа)

Напряжения второго рода распространяются на отдельные зерна и не оказывают большого влияния.

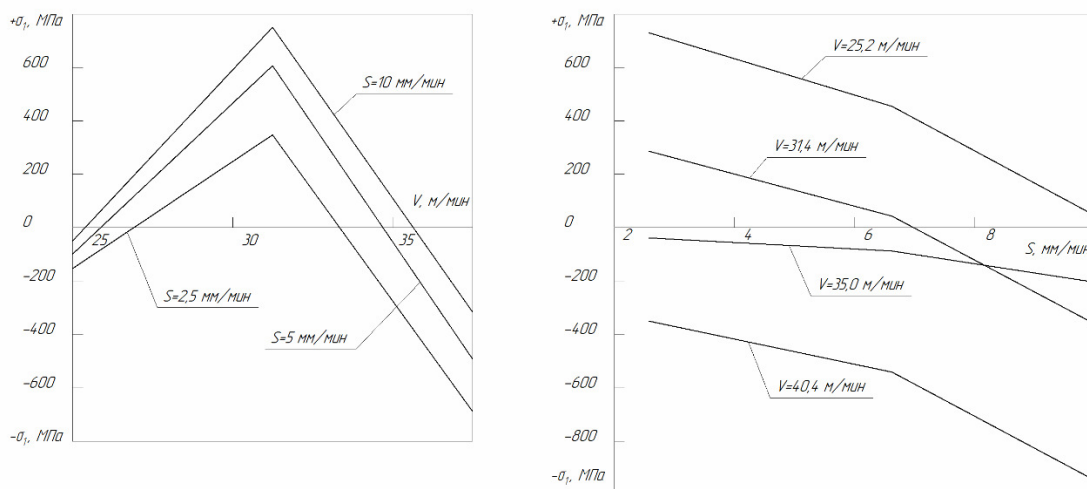


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений первого рода от скорости резания (слева) и от подачи (справа)

Напряжения первого рода могут охватывать большие области, сравнимые с размерами детали, а также иметь направление. При увеличении скорости резания напряжения первого рода сначала увеличиваются, а потом уменьшаются. Эти изменения обусловлены тем, что скорость резания оказы-

вает значительное влияние на температуру в зоне резания. При низких температурах и силах возникают сжимающие напряжения. С увеличением подачи возрастают и силы резания, что сопровождается пластической деформацией и упрочнением металла, а также ростом сжимающих напряжений. При дальнейшем повышении скорости резко увеличивается температура, удельный объем, происходит разупрочнение материала и снижение сил резания. Напряжения меняют знак и становятся растягивающими. При дальнейшем увеличении скорости резания и подачи процесс стабилизируется. Это приводит к снижению абсолютных значений остаточных напряжений. На разных участках детали напряжения могут иметь разный знак и в процессе эксплуатации может произойти их перераспределение. В результате деталь получит искажение формы. Поэтому при обработке следует сводить к минимуму величины остаточных напряжений.

Список литературы

[1]. *Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств* / В.Б. Альгин и др.; под ред. В.Б. Альгина и В.Е. Старжинского. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 406 с.

[2]. *Кане М.М., Медведев А.И.* Анализ факторов, влияющих на параметры качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их нарезании червячной фрезой // *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет*; под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2009. Вып. 24, т. 1. – С. 114-117.

[3]. *Ящерицын П.И., Еременко М.Л. Фельдштейн Е.Э.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учебн. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 512 с.

Лагутова Светлана Станиславовна – студент МК1-81Б КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lagutovass@student.bmstu.ru.

Штокал А.О., Рыков Е.В., Артемьев А.В., Шаталов В.К.,
Богачев В.А., Баженова О.П., Рожкова Т.В., Солдатова И.В.,
Демина В.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОЩАДОК ИЗНОСА КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПОРА УЗЛОВ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Широкое применение при проектировании космических аппаратов находят узлы раскрытия. Они обеспечивают минимизацию габаритов космического аппарата в транспортном положении под обтекателем ракеты-носителя, позволяют вводить в действие системы космического аппарата последовательно по мере необходимости, использовать протяжённые нежёсткие конструкции, нереализуемые в условиях наличия веса и неспособные сохранить целостность под действием вибродинамических нагрузок при выведении космического аппарата на целевую орбиту. Даже самые первые космические аппараты имели в своём составе узлы раскрытия, актуальным данный приём конструирования является и поныне, причём по мере усложнения конструкций космических аппаратов и выполняемых ими задач, требования к узлам раскрытия в ближайшей перспективе будут только ужесточаться.

Конструктивно в составе любых узлов раскрытия можно выделить:

- несущую конструкцию, воспринимающую виброударные нагрузки при выведении космического аппарата на целевую орбиту,
- элементы удержания, представленные чаще всего пирочеками, фиксирующими несущую конструкцию в транспортном положении,
- систему актуализации, обеспечивающую перевод узла раскрытия из транспортного в рабочее положение, причём актуализация может осуществляться как накопленной энергией (система пружин), так и подвижной (привод),
- систему стопорения, фиксирующую узел раскрытия в рабочем положении,
- элементы распора, выбирающие люфты и зазоры зафиксированного в транспортном положении при помощи элементов удержания узла раскрытия, а также обеспечивающие преднатяг конструкции для увеличения её собственной частоты.

Характерной особенностью работы элементов распора узлов раскрытия является наличие контактирующих поверхностей, работающих в состоянии сложного нагружения в процессе выведения космического аппарата на целевую орбиту, а также сохраняющих контакт в течение всего времени нахождения узла раскрытия в транспортном положении в условиях космического пространства.

Имеется информация [1], что металлические контактирующие поверхности в условиях космического пространства в результате относительно длительного контакта становятся склонными к адгезии (холодной сварке), что неоднократно подтверждено натурной эксплуатацией систем космических

аппаратов. Экспериментально установлено [2], что использование твёрдых смазочных покрытий на основе дисульфида молибдена типа ВНИИ НП-230 (иностранный аналог – Vespel SP3) не позволяет предотвратить контакт металлических поверхностей в виду истирания покрытия на всю глубину в процессе сложного виброударного нагружения на поверхности при транспортировке космического аппарата на целевую орбиту. Результаты исследования учёных из Европейского космического агентства (ЕКА) [3] также подтверждают данный вывод, а также указывают на то, что керамикоподобные оксидные слои, сформированные на поверхностях алюминиевых и титановых сплавов, обеспечивают надёжную защиту от адгезии при фреттинг-нагружении. При этом имеется информация [4], что диффузионная сварка керамических материалов происходит в условиях, недостижимых при эксплуатации космических аппаратов на околоземной орбите, а также во всех текущих и перспективных миссиях ближайших десятилетий.

Таким образом, можно заявить об уникальности задачи разработки и создания покрытия, устойчивого к фреттингу и виброударным нагружениям в процессе выведения космического аппарата на целевую орбиту, и при этом не подверженного диффузионной сварке и адгезии в процессе длительного нагруженного контакта в условиях космического пространства. При этом наиболее перспективными материалами для выполнения поставленной задачи представляются композиты, состоящие из пластичной металлической подложки, воспринимающей виброударное нагружение, которая покрыта тонкими керамическими слоями, препятствующими адгезии металлических поверхностей элементов распора в условиях космического пространства.

В качестве экспериментальных образцов были изготовлены пластинки из алюминиевых сплавов АМг6М (твёрдость – 65 НВ), 01570 (твёрдость – 77,6 НВ) и Д16АТ (твёрдость – 65 НВ) толщиной 3 мм. Данные алюминиевые сплавы наиболее широко применяются в аэрокосмической отрасли, технологии их обработки хорошо освоены. На поверхностях пластинок были сформированы МДО-покрытия толщинами 50, 100 и 150 мкм на каждом сплаве. Для проведения экспериментов было изготовлено приспособление, изображённое на рис. 1, предназначенное для моделирования вибродинамических нагрузок, возникающих при выведении космического аппарата на целевую орбиту. В основу конструкции приспособления положена модель типового узла раскрытия.

Экспериментальные образцы используются в описанном выше приспособлении в качестве площадок 3. Каждому экспериментальному образцу соответствует свой упор, изготовленный из стали 20Х13. Диаметр сферы упора – 18 мм. Упор устанавливается на место детали поз. 2 в приспособлении. Методика проведения испытаний приведена в работе [5].

После проведения испытаний были изучены и сфотографированы площадки износа экспериментальных образцов и соответствующих им упоров (рис. 2–4).

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 50 мкм на алюминиевом сплаве АМг6М имеет круглую форму, что говорит о низком фреттинге в про-

цессе виброн нагружения. Износ шёл в основном под влиянием микроударной нагрузки. Металлический блеск в середине площадки износа и на периферии говорит об изнашивании МДО-покрытия на всю глубину. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

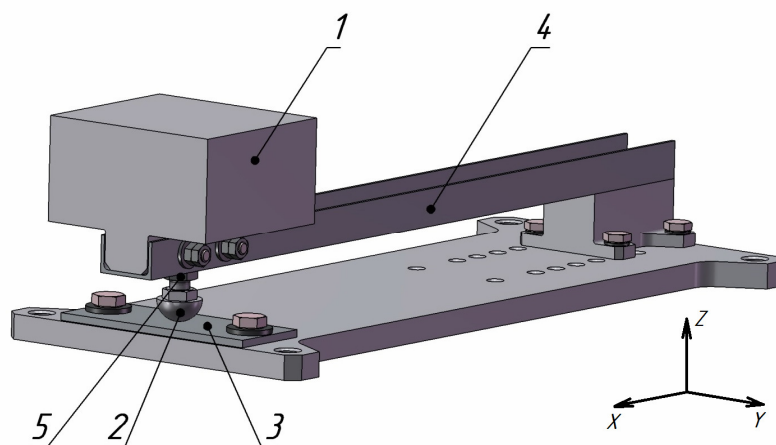


Рис. 1. Приспособление, моделирующее нагрузки на контактирующие поверхности элементов распора узлов раскрытия космических аппаратов при их транспортировке на целевые орбиты:

1 – имитатор нагрузки; 2 – упор; 3 – площадка; 4 – балка; 5 – контргайка;
X, Y, Z – оси приложения вибрационных нагрузок

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 50 мкм на алюминиевом сплаве 01570 имеет несколько вытянутую форму, что говорит о заметном фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл под влиянием и фреттинговой, и микроударной нагрузки. Металлический блеск площадки износа отсутствует, что говорит о сохранении непрерывности МДО-покрытия в пределах пятна контакта и отсутствии его скалывания и продавливания. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 50 мкм на алюминиевом сплаве Д16АТ имеет круглую форму, что говорит о низком фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл в основном под влиянием микро-ударной нагрузки. Металлический блеск на периферии площадки износа говорит о возможном скалывании и продавливании МДО-покрытия в процессе виброн нагружения. Морфология площадки износа ответного упора в целом подтверждает сделанные выводы.

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 100 мкм на алюминиевом сплаве АМг6М имеет несколько вытянутую форму, что говорит о заметном фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл под влиянием и фреттинговой, и микроударной нагрузки. Наличие отдельных участков металлического блеска на периферии площадки износа говорит о возможном скалывании и продавливании МДО-покрытия в процессе виброн нагружения. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 100 мкм на алюминиевом сплаве 01570 имеет несколько вытянутую форму, что говорит о заметном фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл под влиянием и фреттин-

говой, и микроударной нагрузки. Наличие отдельных участков металлического блеска на периферии площадки износа говорит о возможном скалывании и продавливании МДО-покрытия в процессе виброн нагружения. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

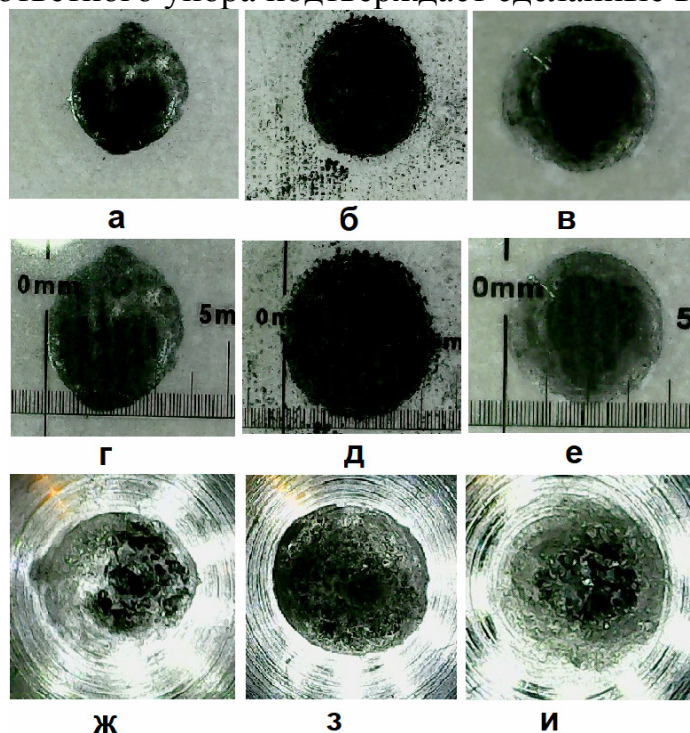


Рис. 2. Морфология площадок износа (а-в), их размеры (з-е) на МДО-покрытиях толщиной 50 мкм экспериментальных образцов из алюминиевых сплавов АМг6М, 01570, Д16АТ соответственно; морфология площадок износа на ответных упорах из стали 20Х13 (ж-и)

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 100 мкм на алюминиевом сплаве Д16АТ имеет круглую форму, что говорит о низком фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл в основном под влиянием микро-ударной нагрузки. Наличие отдельных участков металлического блеска на периферии площадки износа говорит о возможном скалывании и продавливании МДО-покрытия в процессе виброн нагружения. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 150 мкм на алюминиевом сплаве АМг6М имеет несколько вытянутую форму, что говорит о заметном фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл под влиянием и фреттинговой, и микроударной нагрузки. Металлический блеск в середине площадки износа и на периферии говорит об изнашивании МДО-покрытия на всю глубину. Существенные области без покрытия свидетельствуют об обширных его сколах. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 150 мкм на алюминиевом сплаве 01570 имеет несколько вытянутую форму, что говорит о заметном фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл под влиянием и фреттин-

говой, и микроударной нагрузки. Наличие незначительных участков металлического блеска на периферии площадки износа говорит о возможном локальном скалывании и продавливании МДО-покрытия в процессе виброн нагружения. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

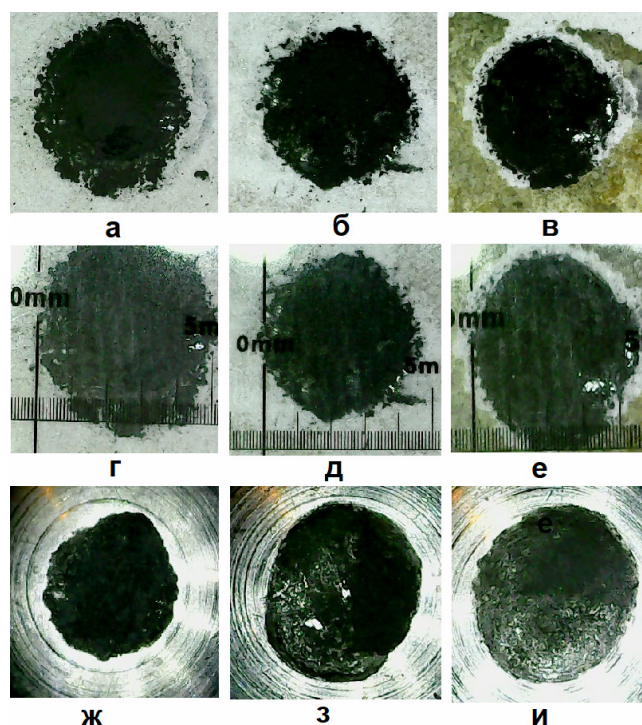


Рис. 3. Морфология площадок износа (а-в), их размеры (г-е) на МДО-покрытиях толщиной 100 мкм экспериментальных образцов из алюминиевых сплавов АМг6М, 01570, Д16АТ соответственно; морфология площадок износа на ответных упорах из стали 20Х13 (ж-и)

Площадка износа МДО-покрытия толщиной 150 мкм на алюминиевом сплаве Д16АТ имеет круглую форму, что говорит о низком фреттинге в процессе виброн нагружения. Износ шёл в основном под влиянием микро-ударной нагрузки. Металлический блеск площадки износа отсутствует, что говорит о сохранении непрерывности МДО-покрытия в пределах пятна контакта и отсутствии его скалывания и продавливания. Морфология площадки износа ответного упора подтверждает сделанные выводы.

В результате моделирования вибродинамической нагрузки на контактирующие поверхности элементов распора установлено, что толщина МДО-покрытия и твёрдость металлической подложки оказывает определяющее значение на стойкость МДО-покрытия к фреттинговым и микроударным воздействиям, а также на характер данного воздействия и вид разрушения МДО-покрытия.

При толщине МДО-покрытия 50 мкм наибольшую стойкость покрытие проявляет на металлической подложке средней твёрдости (сплав 01570). Крайние значения твёрдости приводят либо к повышенному износу покрытия вследствие его малой толщины и недостаточного содержания корундовой фа-

зы, либо к интенсивному растрескиванию покрытия вследствие его малой поперечной жёсткости.

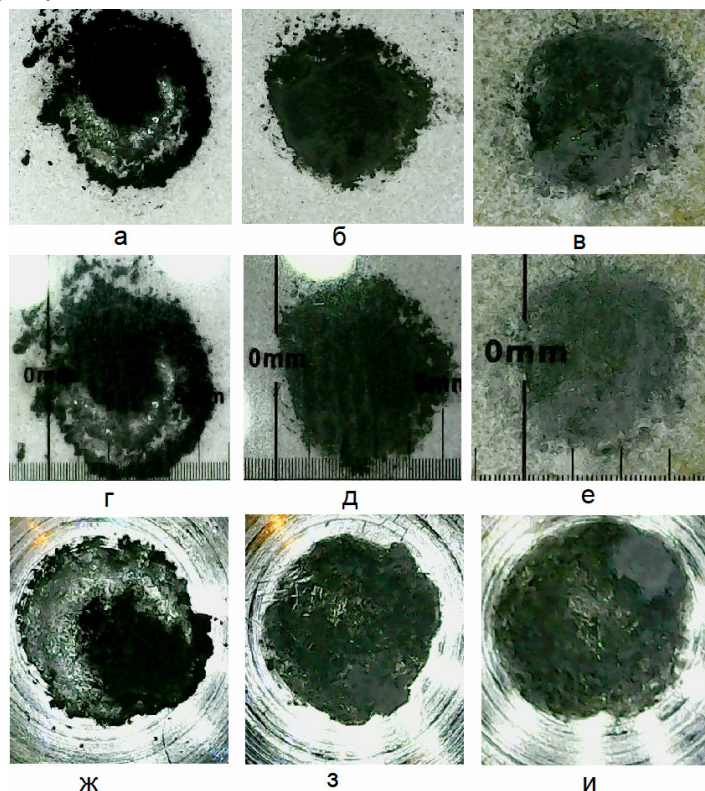


Рис. 4. Морфология площадок износа (а-в), их размеры (г-е) на МДО-покрытиях толщиной 150 мкм экспериментальных образцов из алюминиевых сплавов АМг6М, 01570, Д16АТ соответственно; морфология площадок износа на ответных упорах из стали 20Х13 (ж-и)

При толщине МДО-покрытия 100 мкм вследствие увеличения содержания корундовой фазы сквозного изнашивания в центре площадки уже не наблюдается. Участки без покрытия концентрируются на периферии, что вероятно связано с ещё недостаточной поперечной жёсткостью покрытия. Покрытия на всех металлических подложках проявили примерно одинаковую стойкость.

При толщине МДО-покрытия 150 мкм наибольшую стойкость покрытие проявляет на металлической подложке высокой твёрдости (сплав Д16АТ). Зависимость стойкости покрытия от твёрдости металлической подложки прямая. Разрушение покрытия происходит в соответствии с гипотезой, высказанной в работе [6].

Повышение фреттинговой составляющей виброударного нагружения в первую очередь связано со скалыванием и продавливанием покрытия, так как увеличивается интервал перемещения упора и снижается общая жёсткость узла раскрытия. Данное явление является негативным и подлежит устранению.

В дальнейшем для более точного выявления подходящей композиции целесообразно провести исследование состава выкрашенного материала, прочности его сцепления с контактирующими поверхностями и глубины оставшегося неизношенным покрытия.

Список литературы

[1]. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Богачёв В.А. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – № 4 (38). – С. 60–67.

[2]. Рыков Е.В., Штокал А.О., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Добросовестнов К.Б., Баженова О.П. Исследование стойкости твёрдого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена к фреттинг-износу в условиях вибрационного нагружения // Научноёмкие технологии. – 2019. – Т. 20. – № 2. – С. 40–47.

[3]. Merstallinger A., Sales M., Semerad E., Dunn B.D. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum (ESA STM-279 November 2009). – ESA Communication Production Office, 2009. – 57 p.

[4]. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2006. – 42 с.

[5]. Штокал А.О. Методика проведения экспериментов по изучению стойкости МДО-покрытий к фреттинг-износу / А.О. Штокал, Е.В. Рыков, А.В. Артемьев, К.Б. Добросовестнов, Т.А. Говорун, В.К. Шаталов, В.А. Богачёв, О.П. Баженова // Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского. Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Часть 2. – Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»), 2019. – С. 271–276.

[6]. Штокал А.О. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием / А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов, Т.А. Говорун, В.К. Шаталов, В.А. Богачёв // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – № 4 (38). – С. 60–67.

Штокал Александр Олегович – ведущий конструктор, канд. техн. наук, Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: suauthemocl@yandex.ru.

Рыков Евгений Валентинович – начальник сектора Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: rik@laspace.ru.

Артемьев Артем Валентинович – главный конструктор Филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуга. E-mail: arav@laspace.ru.

Шаталов Валерий Константинович – заведующий кафедрой МК5 «Материаловедение и химия», профессор, д-р техн. наук Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru.

Богачёв Вячеслав Алексеевич – начальник отдела АО «НПО Лавочкина». E-mail: tribolab@laspace.ru.

Баженова Ольга Петровна – начальник сектора АО «НПО Лавочкина». E-mail: bazhenova_laspace@mail.ru.

Рожкова Татьяна Владимировна – начальник металлографической лаборатории АО «НПО Лавочкина». E-mail: rojkova_t@list.ru.

Солдатова Ирина Викторовна – инженер-технолог 1 категории, канд. техн. наук АО «НПО Лавочкина». E-mail: inter-88@ya.ru.

Демина Виктория Денисовна – инженер-технолог АО «НПО Лавочкина». E-mail: vishnj10100@mail.ru.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ПОДШИПНИКИ

Любая обработка материала есть влияние на состояние обрабатываемого объекта. Влияние заключается в управлении параметрами его состояния. Управляя параметрами, мы подвергаем объект воздействию управляемых факторов, но вместе с ним всегда существует часть факторов, которые невозможно полноценно учесть при воздействии на объект. Такие факторы вызывают погрешности. Для компенсации этого недостатка в машиностроении существует понятия допуска.

Допуск определяет предельные возможные значения параметра, которого он контролирует. Выделяют допуска на размеры линейные и диаметральные, а также допуска на форму и расположения поверхностей. Тем не менее наличие допуска не гарантирует того что получаемый параметр соответствует его предельным значениям и вследствие этого возникает необходимость контроля с помощью измерений.

Измерения могут быть прямыми и косвенными. С помощью прямых измерений получают значение параметра непосредственно сравнивая с мерой величины, косвенные на основании известной зависимости между искомой величиной и величиной полученной прямым измерением.

После обработки посадочных мест подшипников нужно производить их контроль, чтобы не допускать не правильную установку подшипников, которая может привести в лучшем случае к быстрому их износу, а в худшем к поломке узла или всей машины, в которой подшипник установлен.

Рассматривая поверхности круглого сечения прежде всего контролируют диаметральный размер. Для этого в нескольких сечениях по длине посадочной поверхности в трех направления, расположенных относительно друг друга под углом 120 градусов, производят замеры, после чего вычисляют среднюю арифметическую величину полученных значений.

Диаметры шеек контролируют предельными скобами и микрометрами, а диаметры отверстий корпусов предельными пробками, индикаторными нутромерами и штихмасами.

При контроле посадочных мест в разъемных корпусах необходимо обращать внимание на возможность «закусывания» наружного кольца подшипника вследствие старения литья или дефектов механической обработки.

Особенно тщательно необходимо проверять галтели и упорные заплечики вала и корпуса, а также размеры посадочных поверхностей вблизи галтелей, так как в этих местах часто обнаруживаются ступенчатые переходы, увеличенный радиус галтели, завал заплечика, подрезка заплечика. В этих случаях подшипники не могут быть правильно допрессованы до упора в заплечики валов, что необходимо для правильного восприятия нагрузок.

Большое значение имеет правильность геометрических форм посадочных поверхностей, так как кольца подшипников являются тонкостенными деталями.

ми и при посадках с натягом деформируются, принимая форму посадочного места.

При контроле геометрической формы посадочных мест поверхностей проверяют прямолинейность валов, эксцентricность, овальность и конусность посадочных мест, торцевое биение упорных заплечиков, соосность посадочных мест в корпусах. Прямолинейность валов проверяют в центрах на токарных станках или в специальных люнетах при помощи индикатора или миниметра.

Эксцентricность посадочных мест по отношению к оси вала проверяют по отклонению стрелки индикатора при одном обороте зажатого в центрах вала. Если стрелка отклонилась от нуля и возвратилась в исходное положение, то это указывает на эксцентricность посадочной поверхности. Если при вращении вала на один оборот стрелка индикатора дважды отклоняется от нуля, то посадочная поверхность имеет овальность. Овальность можно выявить также при трехкратных измерениях диаметра посадочной поверхности в одном сечении мерительными инструментами.

Конусность посадочной поверхности вала или корпуса определяется как разность диаметров в крайних сечениях посадочного места.

Соосность посадочных мест для подшипников качения в общем корпусе, как правило, обеспечивается технологией их обработки, то есть расстачиванием с одного установов. Соосность посадочных мест для подшипников качения в отдельно стоящих корпусах контролируют при помощи калиброванного вала, контрольной линейки, уровня и щупа.

Измерительное средство выбирают в зависимости от точности изготовления изделий и придерживаются следующего порядка действий.

При помощи чертежа определяют номинальные размеры и предельные отклонения элемента. Далее находят величину допустимой погрешности измерения. Для этого используют специальную стандартизованную таблицу.

Выбирают средство измерения, которые обеспечивают допустимую погрешность. Сопоставляют величины допустимой погрешности измерения и допуска на измеряемый размер, ставя вопрос о удовлетворительной производительности средства измерения для конкретного производства.

Зачастую допустимая погрешность измерений составляет 20% для грубых и 35% допуска размера. Установленные стандартом погрешности являются наибольшими, которые можно допускать при измерении, они включают случайные и систематические погрешности.

Для контроля поля допуска отверстий и валов распространены безшкальные измерительные средства, такие как скобы и пробки.

Посадочные поверхности подшипников участвуют в процессе сборки изделия. Это означает, что данные области изделия будут сопрягаться с ответной поверхностью другой детали. Из этого возникает потребности в соблюдении правил сборки и рационального подбора посадки. На данном этапе в зависимости от назначенной посадки могут отличаться и методы сборки и соответственно методы контроля собранного узла.

Список литературы

[1]. *Асанов В.Б.* Нормирование точности и технические измерения: проектирование калибров / В.Б. Асанов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 186 с.

[2]. *Бастраков В.М.* Метрология : учебное пособие / В.М. Бастраков ; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2016. – 288 с.

[3]. *Завистовский В.Э.* Допуски, посадки и технические измерения : учебное пособие : [12+] / В.Э. Завистовский, С.Э. Завистовский. – 2-е изд., испр. – Минск : РИПО, 2016. – 278 с.

Антипин Владислав Александрович –студент МК1-82Б, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladantipin.moy@gmail.com.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАЛАДКИ СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

В современном мире машиностроение является одной из передовой отраслью и должна развиваться и не стоять на месте. Каждый этап работы нуждается в своевременной оптимизации для уменьшения затрат и увеличения прибыли. Процесс наладки станков не исключение. Оптимизация рассматриваемого процесса необходима для уменьшения времени на настройку; уменьшение количества подналадочных работ, износа приспособлений и режущих инструментов; улучшения качества обрабатываемой поверхности, увеличение партийности деталей и уменьшение влияния человека, в частности наладчика или оператора [1].

Один из способов оптимизации процесса наладки на предприятиях это применение группового метода обработки заготовок, который влечет за собой создание групповой схемы наладки и настройки токарных станков. При данном способе время, затрачиваемое на переналадку с одной детали на другую значительно меньше, чем при наладки по отдельным технологическим процессам. Это связано с тем, что в групповой метод обработки включены все технологические элементы комплексной детали, которая включает в себя все элементы деталей, внести оператору только недостающий инструмент или дописать программу обработки нужной поверхности. Из проведенных опытов можно сделать вывод, что время наладки станка при методе групповой обработки сокращается в 2–6 раз по сравнению с временем наладки традиционным методом [2].

Следующий метод оптимизации – это проектирование групповых приспособлений.

Метод предусматривает создание конструкции приспособления, которое позволит обрабатывать детали и поверхности различной конфигурации без переналаживания или оно осуществлялось частично, без значительных потерь по времени. Также для исключения влияния квалификации наладчика, сокращения потери времени на наладку и потери деталей на наладочный брак, было открыт новый метод взаимозаменяемой наладки. Основное преимущество метода в том, что обеспечивается такое же положение режущих кромок резцов установленных на станок и обеспечивает их правильное положение относительно оси шпинделя станка. Блочные взаимозаменяемы наладки дорогой тип оборудования, требующий трудную регулировку режущих инструментов. Зато применение данного метода позволяет уменьшить погрешность настройки станка, сократить время простоя оборудования при переналаживании на другое изделие, тем самым повышая производительность [3].

Существует еще один новый и интересный метод как один из способов оптимизации такой как, цифровая наладка. Цифровая наладка оборудования заключается в ее наладке в программном обеспечении, где задаются различные воздействия, и осуществляется симуляция работы. Таким образом, можно

увидеть различные проблемы и устранить их еще до выхода на реальное оборудование [4]. Основными преимуществами цифровой наладки являются: отсутствие столкновений станка, бережливая эксплуатация оборудования; снижение трудоемкости разработки управляющих программ, минимум ручных расчетов, проверок, страховок, симуляция покажет сразу все возможные проблемы; снижение сроков наладки, наладка оборудования с первого раза; обработка детали с первого раза, не нужны тестовые прогоны; минимальное время простоя оборудования из-за его наладки; повышение гибкости; повышение эффективности производства. С помощью цифровых двойников могут осуществляться виртуальные наладки самых разных видов оборудования [5].

В заключение можно отметить, что существуют еще методы оптимизации и инженерами, технологами, конструкторами создаются и внедряются новые способы, позволяющие уменьшить влияния человека, времени, затрат, но при этом выиграть в качестве, эксплуатационных свойствах и объемах выпускаемой продукции.

Список литературы

[1]. *Шандров Б.В.* Технические средства автоматизации: учебник для студ.высш. учеб.заведений / Б.В. Шандров, А.Д. Цудаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 368 с.

[2]. *Зубарев Ю.М.* Технология автоматизированного машиностроения. Проектирование и разработка технологических процессов : учебное пособие для вузов / Ю.М. Зубарев, А. В. Приемышев, В. Г. Юрьев. – 2-е изд., стер. – СПб: Лань, 2021. – 312 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/156390> (дата обращения: 26.03.2021).

[3]. *Грубый С.В.* Оптимизация механической обработки : учебник / С.В. Грубый. – СПб: Лань, 2019. – 140 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/116366> (дата обращения: 26.03.2021).

[4]. *Лучкин В.К.* Проектирование и программирование обработки на токарных станках с ЧПУ : учебное пособие / В.К. Лучкин, В.А. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2015. – 83 с. : ил.,табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=444957> (дата обращения: 26.03.2021).

[5]. *Филонов И.П.* Инновации в технологии машиностроения : учебное пособие / И. П. Филонов, И. Л. Баршай. – Минск : Вышэйшая школа, 2009. – 110 с. – ISBN 978-985-06-1684-5. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/20075.html> (дата обращения: 26.03.2021).

Платонов Владислав Вадимович – студент МК1-21М КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: vladplatonovchills@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Введение. Процесс оптимизации лежит в основе любой инженерной деятельности, поскольку от инженера требуется проектирование новых, более эффективных и менее дорогостоящих технических систем и разработка методов повышения качества функционирования уже существующих систем. Эффективность оптимизационных методов, позволяющих осуществить выбор наилучшего варианта без проверки всех возможных вариантов, связана с широким использованием достижений математики, путем реализации итеративных вычислительных схем на базе вычислительной техники, которые строят на строго обоснованных алгоритмах [1].

Под оптимизацией процесса резания понимают поиск такого варианта управления процессом резания, при котором будет достигнуто экстремальное значение критерия, который характеризует качество и стабильность.

Выбор критерия оптимизации и задание целевой функции. Критерий оптимизации – характерный показатель решения задачи, по значению которого оценивается оптимальность найденного решения, то есть максимальное удовлетворение поставленным требованиям. В качестве критерия оптимизации возьмем основное время обработки t_0 , которое должно быть наименьшим. В рамках данной работы задача оптимизации будет рассмотрена с позиции получения наибольшей производительности процесса резания при обработке конического отверстия на токарно-винторезном станке с ЧПУ модели 16К20Ф3.

Задание системы ограничений. При постановке задачи оптимизации следует учитывать все основные переменные, которые влияют на функционирование операции механической обработки и её качество. К независимым переменным можно отнести мощность резания N , крутящий момент $M_{кр.}$, износ инструмента за время, равное периоду стойкости (T). Для создания системы из приведенных выше ограничивающих факторов необходимо каждый из них выразить в виде математического соотношения, в которое будут входить изменяемые параметры (подача S_0 и V).

Применительно к исходным данным рассматриваемой задачи [2]:

$$N = \frac{9.81 \cdot 300 \cdot 1^1 \cdot S^{0.75} \cdot V^{-0.15} \cdot 0.29}{1000} = 0.85 \cdot S^{0.75} \cdot V^{-0.15}$$

Мощность, развиваемая шпинделем станка:

$$P_{ст.} = 7500 \cdot 0.89 = 6675 \text{ (Вт)}.$$

Ограничение имеет вид:

$$0.85 \cdot S^{0.75} \cdot V^{-0.15} < 6675$$

Крутящий момент от максимальной силы резания на шпинделе передней бабки [3]:

$$M_{кк} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 1000} = \frac{9.81 \cdot 300 \cdot 1^1 \cdot S^{0.75} \cdot V^{-0.15} \cdot 0.29 \cdot 270.7}{2 \cdot 1000} = 115 \cdot S^{0.75} \cdot V^{-0.15}.$$

Решение задачи оптимизации. При решении задачи оптимизации нельзя забывать, что возможные значения подач и скорость резания ограничены кинематикой станка. Это ограничивает возможный диапазон изменения переменных и накладывает еще два ограничения: $S_{min} < S_0 < S_{max}$ и $n_{min} < n < n_{max}$. Подставив значения из паспорта станка, и перейдя от чисел оборотов к скорости резания, получим ограничения такого вида [4]:

$$0,8 < S_0 < 5,0 \text{ и } 25,12 < V < 155,7.$$

Система ограничений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} 0,75 \cdot x - 0,15y < 1,76 \\ 0,75 \cdot x - 0,15y < 0,63 \\ 0,11y < -1,82 \\ x + 0,09 < 0,78 \\ y - 1,4 < 0,79 \end{cases}$$

Целевая функция после подобной замены будет иметь вид: $f = x + y$.

В таком виде решение задачи значительно упрощается. Данная задача может быть решена методами линейного программирования (графическим методом).

Для нахождения оптимальных значений переменных x и y графическим способом необходимо построить многоугольник (см. рис. 1), сторонами которого будут отрезки прямых, которые представляют собой одно из ограничений системы. Каждая такая прямая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений, внутри которого любая точка будет удовлетворять всем неравенствам системы. Для нахождения экстремума функции f строится вектор максимизации M под углом 45° , перпендикулярный самой функции.

В точке В, где прямая касается многоугольника решений, значений целевой функции будет наименьшим, а в точке А – наибольшим [5].

Значения, соответствующие точке В: $x_{опт.} = 0,55$, $y_{опт.} = 2,19$. Проведя обратную замену ($V = 10^{y_{опт.}}$ и $S_0 = 10^{-x_{опт.}}$), получим следующие значения скорости и подачи: $V = 10^{y_{опт.}} = 10^{2,19} = 154,8 \left(\frac{м}{мин}\right)$ и $S_0 = 10^{-x_{опт.}} = 10^{-0,55} = 0,27 \left(\frac{мм}{об}\right)$.

Анализ полученных результатов. Оптимизация режимов резания производилась с целью сократить основное время получистовой обработки конического отверстия. Найдем отношение основных времен:

$$\frac{t_{01}}{t_{21}} = \frac{S_{02} \cdot V_2}{S_{01} \cdot V_1} = \frac{0,27 \cdot 154,8}{0,3 \cdot 125} = \frac{41,796}{37,5} = 1,15,$$

то есть основное время операции сократилось на 15%, что дает значительное повышение производительности.

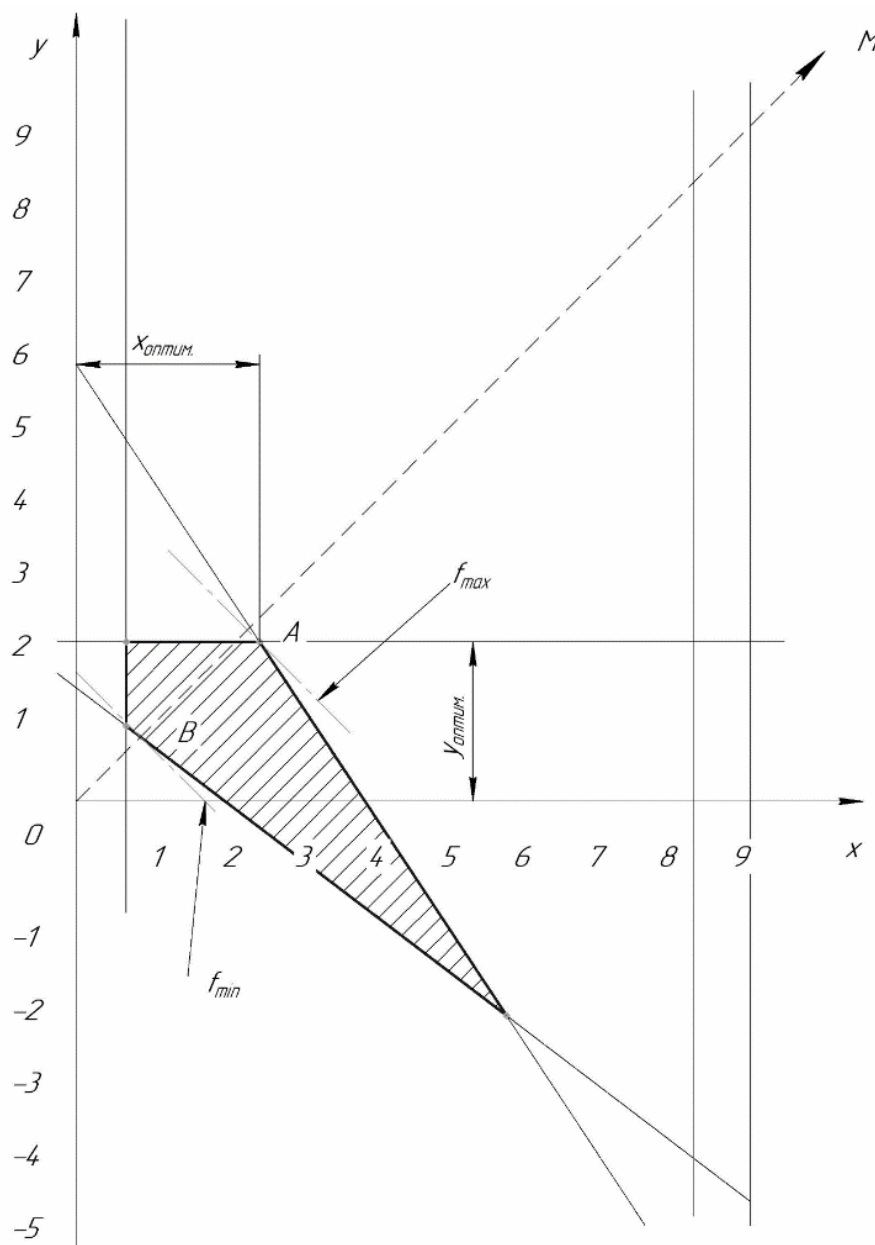


Рис.1. Графическое решение оптимизационной задачи

Заключение. В рамках данной работы было рассмотрено решение задачи оптимизации режимов резания при растачивании конического отверстия. Оптимизационным критерием при решении служило основное время обработки, которое должно быть наименьшим. При решении задачи был допущен ряд упрощений и выбран только один критерий оптимизации.

В реальных производственных условиях задача поиска оптимальных вариантов режимов резания значительно усложняется, а, следовательно, усложняется и объем решения, и его сложность.

Список литературы

[1]. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2013. – 567 с – URL: https://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=37005. (дата обращения: 14.10.2020).

[2]. *Гузеев В.И., Бутаева В.А.* Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: учебник для вузов / В.И. Гузеев, В.А. Батуева – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с – URL: [https:// lib-bkm.ru/12944](https://lib-bkm.ru/12944). (дата обращения: 17.10.2020).

[3]. *Малышев Е.Н.* Автоматизация технологических процессов: методические указания – Калуга: КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 30с. – URL: <https://e-learning.bmstu.ru/kaluga/mod/folder/view.php?id=38758>. (дата обращения: 4.10.2020).

[4]. *Зубарев Ю.М., Косаревский С.В.* Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учебное пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский – 3-е изд., стер. – СПб : Лань, 2017. – 160 с. – ISBN 978-5-8114-1757-5. (дата обращения: 6.11.2020).

[5]. *Ковшов А.Н.* Технология машиностроения: учебник для вузов / А.Н. Ковшов – 3-е изд., стер. – СПб : Лань, 2015. – 230 с. – ISBN 978-5-8114-0833-7. (дата обращения: 6.11.2020).

Пулин Павел Алексеевич – студент МК1-82Б КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга 248000, Россия. E-mail: pulin.99@inbox.ru

Научный руководитель: Вяткин Андрей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТЕ В УСЛОВИЯХ АО «КНИИТМУ»

Основными задачами организации и проведения технического контроля точности оборудования при эксплуатации и ремонте являются: сохранение оборудования в рабочем, технически исправном состоянии, обеспечивающем получение годных деталей, которые соответствуют предъявляемым к ним требованиям по точности, а также сокращение времени и затрат на обслуживание и проверки на точность. Очевидно, что доля затрат на обслуживание основных производственных фондов, переносимая, на себестоимость продукции, является крайне важным фактором, влияющим на стоимость производимых деталей и услуг, а значит и на конкурентоспособность предприятия в целом.

В связи с этим существует необходимость разработки новых научно обоснованных подходов и методик, позволяющих осуществлять разработку более эффективных методов организации и проведения технического контроля точности оборудования при эксплуатации и ремонте.

В процессе изучения организации контроля и ремонта в условиях АО «КНИИТМУ» выяснилось, что на предприятии во время ремонтных работ по восстановлению изношенных элементов фрезерных станков, а именно шпинделей, валиков, винтов продольной подачи применяется шлифование. Однако данный способ приводит к достаточно быстрым возвратам оборудования на ремонт, тем самым можно сделать вывод о том, что шлифование не обеспечивает требуемой долговечности рабочих поверхностей. В связи, с чем предлагается внедрить метод раскатного упрочнения, что позволит увеличить срок эксплуатации отремонтированных таким методом изделий на 40%.

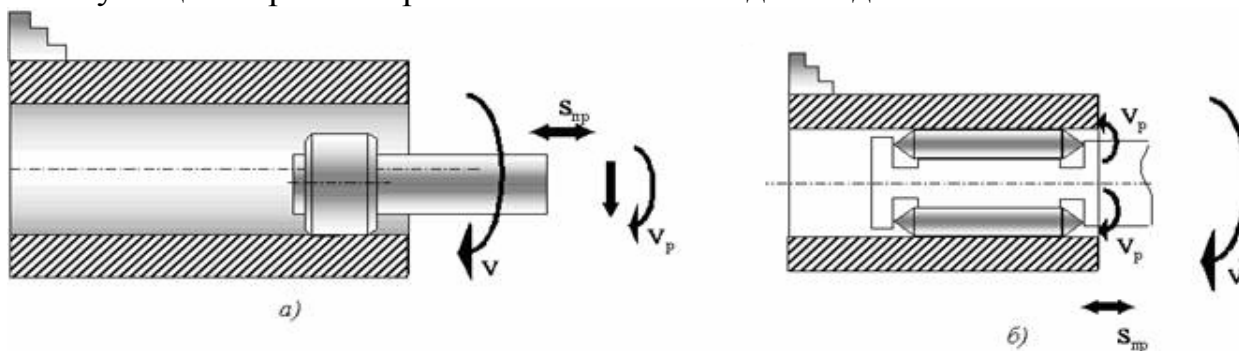


Рис. 1. Применяемые при раскате инструменты:
а) раскатка на консольной оправке; б) раскатник

Сущность раскатного упрочнения. Упрочняющее раскатывание – это процесс обработки внутренней поверхности изделия давлением. Сущность процесса заключается в подведении к вращающейся заготовке ролика-раскатки закрепленного на консольной оправке или его более совершенной версии – раскатника. Раскатник отличается лишь большим числом роликов,

которые соответственно позволяют обрабатывать поверхность несколькими роликами одновременно [1].

На сегодняшний день одним из самых прогрессивных инструментов для раскатывания внутренних цилиндрических и конических отверстий является гидростатический инструмент. Принцип его работы заключается в деформировании внутренней поверхности изделия шариком изготовленным из твёрдосплавной стали. Шарик прижимается к обрабатываемой поверхности изделия с помощью давления масла, в то же самое время он может относительно свободно вращаться, тем самым выпуская небольшие порции масла на обрабатываемую поверхность смазывая её, что, несомненно, влияет на качество поверхности в лучшую сторону и увеличивает износостойкость самого шарика.



Рис. 2. Гидростатический шарик

Поскольку давление масла подаваемого на шарик является постоянным, это позволяет компенсировать различные дефекты поверхности, полученные на предыдущих этапах обработки либо из-за естественного износа в процессе работы изделия. Давление можно регулировать и тем самым влиять на шероховатость [2].

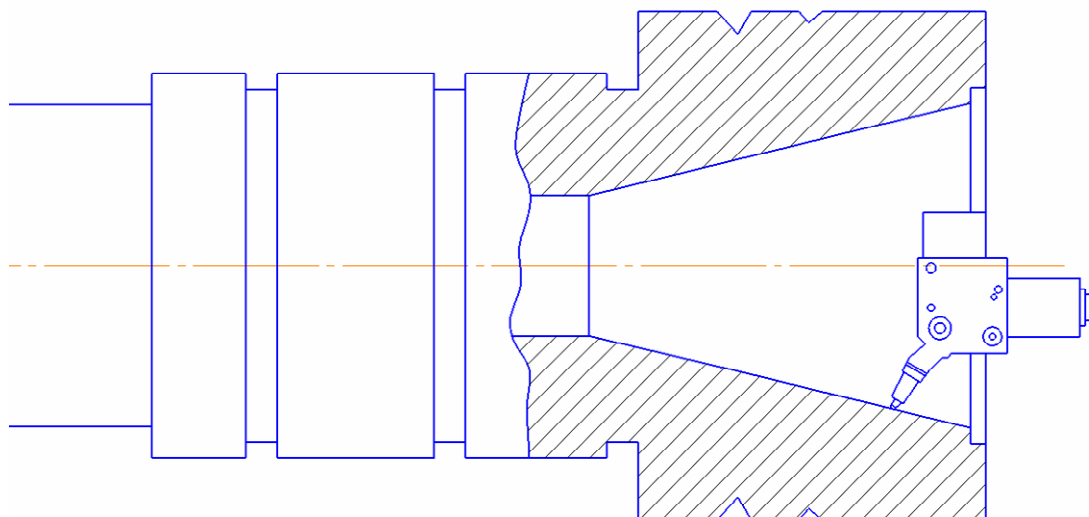


Рис. 3. Пример раскатывания конической поверхности шпинделя фрезерного станка 6Р81

Подводя итог можно сказать, что раскатное упрочнение внутренних цилиндрических и конических поверхностей имеет хорошие перспективы с точки зрения восстановления изношенных поверхностей и позволяет увеличить срок службы изделия.

Список литературы

[1]. Зубарев Ю.М. Процессы обработки и инструмент для формообразования поверхностей деталей : учебник для спо / Ю. М. Зубарев, В. П. Максименко. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 152 с.

[2]. Блюменштейн В.Ю. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ В ТРАНСПОРТНОМ КОМПЛЕКСЕ / В.Ю. Блюменштейн // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 8. – С. 16-24.

Даниил Эдуардович Мартынов – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. АО «КНИИТМУ». E-mail: Danyuchius@yandex.ru

Марочкин В.В.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Параметры шероховатости поверхности – одни из наиболее главных показателей свойств и качества изделий, функционирующих в условиях трения соприкасающихся деталей с высоким износом. Шероховатость считается наиболее главной эксплуатационной характеристикой механизмов и деталей, работающих в постоянном зацеплении, двигателей внутреннего сгорания. От шероховатости в прямой степени зависит коэффициент трения, износостойкость, а также коррозионная стойкость, и другие механические характеристики деталей. С целью более точного и быстрого определения шероховатости поверхности создано несколько видов устройств и приборов [1].

Первым прибором для измерения шероховатости возник – профилометр – это устройство, специализированное на определении структуры поверхности, в том числе вершин и впадин. Полученные данные после измерения описываются кривой линией – профилограммой. Анализируя такой параметр, применяется показатель шероховатости поверхности, выражаемый в микрометрах (мкм). Универсальный измеритель содержит специальную шкалу, на базе которой отсчитываются значения, переданные показатели с прибора. Описываемый прибор нашел применение для измерений различных неровностей и структуры поверхности деталей в специализированных метрологических центрах, лабораториях, центрах экспертизы, научно-исследовательских институтах, в том числе широко используется на приборостроительных, машиностроительных и других предприятиях.

Как таковой профилометр имеет контактный принцип действия и содержит в своей конструкции индуктивный датчик (измерительный щуп) с алмазной иглой и опорой на измеряемую площадь. Игла находится в подвижном состоянии и осуществляет передвижения перпендикулярно относительно неподвижной измеряемой поверхности детали. Особый датчик генерирует и формирует импульсы, проходящие сквозь электронный усилитель. Вместе с этим создаваемые механические колебания измерительного щупа модифицируются в цифровой сигнал. Обработывая даже небольшое количество таких сигналов, прибор предоставляет вычисления усредненного значения параметра шероховатости, т.е. дает количественную характеристику структуры измеряемой поверхности из расчета на определенную длину [2].

На базе первого измерительного устройства был спроектирован профилограф – это прибор, соответствующий профилометру, который в свою очередь является предметом, контролируемым параметрами шероховатости поверхности. Тем не менее, отличается тем, что имеет свой вывод результатов измерений. Конечные результаты обрабатываются при помощи графоаналитического метода.

Профилограф имеет в своей конструкции такие блоки: *измерительный, преобразовательный и записывающий*.

Первый блок, являющийся основным - называется *измерительным*, потому, как только в нем преобразуется сигнал, дающий в последствии представления о профиле шероховатости поверхности. Согласно данным появляющегося сигнала и строится, в дальнейшем, кривая, характеризующая микрорельеф. Этот блок состоит, чаще всего, из иглы, привода иглы и измерительного столика.

Второй блок – *электронно-преобразовательный*, в нем сигнал из первого блока непосредственно усиливается и преобразуется с помощью специальных электронных преобразователей.

Третий блок - *записывающий*, на который попадает переработанный сигнал со второго блока. Этот сигнал, через записывающее устройство, аналогового или электронного, преобразуется в профилограмму в увеличенном масштабе. При чем, в роли материала для записывания профилограммы может выступать металлическая бумага, светочувствительная бумага или специальная пленка.

Из этого следует, что принцип действия профилографа, практически не отличается от принципа действия профилометра. Разницей лишь является то, что здесь отображение результатов выводится не на экран в виде числовых значений, а графически.

Профилограф – профилометр – приборы такого типа предназначаются для записи измеренных параметров микрорельефа поверхности на бумажный носитель (к примеру, электротермическую бумагу), и одновременного наблюдения, в режиме реального времени, за результатами проводимых измерений при помощи отображающего устройства - цифрового или аналогового [3].

Особенности работы профилографа - профилометра аналогичны принципам действия приборов, описанных выше. Подобным образом, он работает путем ощупывания контролируемой поверхности изделия алмазной иглой с малым радиусом закругления и преобразовании колебаний от иглы в электрический сигнал, а также последующего наблюдения и записи результатов [4].

Большинство устройств для измерения шероховатости сертифицированы Госстандартом РФ, внесённого в Государственный реестр средств измерений, а также соответствует международным требованиям (ISO 8503).

Список литературы

[1] *Клаассен К.* Основы измерений. Датчики и электронные приборы : учебное пособие / К. Клаассен ; перевод Е. В. Воронов, А. Л. Ларин. – 4-е изд. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 351 с. – ISBN 978-5-91559-125-6. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/103498.html>

[2] *Бикулов А.М.* Методы и средства измерений : учебное пособие / А.М. Бикулов. – Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации,

2005. – 133 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=135721>

[3] *Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов. - Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. – 132 с. – ISBN 5-93088-065-4. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/44250.html>

[4] *Дивин А.Г.* Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие : в 5 частях / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2014. – Ч. 4. Методы и средства измерения состава и свойств веществ. – 104 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277932>

Марочкин Владислав Вадимович – студент МК1-21М, магистрант КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: marochkin_vlad@mail.ru.

Яшкин К.В.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

За последние годы номенклатура сочетаний разнородных металлов, используемых в машиностроительном производстве, резко возросла и продолжает расширяться. Любые машины, их узлы и агрегаты состоят из множества различных отдельных деталей. Все эти детали определенным образом взаимодействуют между собой, составляя единый функционирующий механизм. Это взаимодействие, определяет виды соединения деталей [1].

Применяемые в машиностроении соединения по конструктивным признакам и условиям эксплуатации разделяют на две основные группы: подвижные и неподвижные.

Подвижные соединения образуют кинематические пары (вал и подшипник, винт в гайке и т. д.).

Неподвижные (или глухие) соединения – это такие, в которых собранные детали всегда имеют неизменное положение, а, следовательно, не могут перемещаться одна относительно другой.

Подвижные и неподвижные соединения в зависимости от возможности их разборки (демонтажа) разделяют на разъемные и неразъемные [4,6]. Настоящая работа выполнена в рамках обзорного исследования некоторых наиболее распространенных технологий создания неподвижных неразъемных соединений.

К наиболее распространенным и известным технологиям соединений разнородных материалов является **сварка**, которую по виду применяемой энергии, может быть электрической (все виды дуговой сварки, электрошлаковая и др.), химической (газовая) и механической (трением, холодная). Распространенными в машиностроении способами сварки давлением являются контактная, ультразвуковая, диффузионная, газопрессовая, термитная, холодная, сварка трением, взрывом и др. Диффузионную сварку применяют главным образом для соединения материалов, которые обычными методами сварки соединить трудно или невозможно (например, сталь с ниобием, титаном, чугуном, вольфрамом, металлокерамикой; золото с бронзой; металлы со стеклом, графитом). При сварке происходит взаимная диффузия атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии, нагретых до температуры ниже температуры плавления металлов. В большинстве случаев диффузионную сварку выполняют в вакууме. Сварка взрывом относится к сварке, протекающей в твердом состоянии и соединения формируются за счет высокой скорости соударения заготовок при иницировании заряда взрывчатого вещества, что позволяет получать прочные соединения между разнородными материалами, которые в большинстве случаев не могут быть сварены традиционными методами сварки, в том числе сваркой плавлением. Сваркой взрывом соединяют разнородные металлы (например,

медь со сталью, никель со сталью, медь с алюминием, титан с ниобием и другие трудно поддающиеся обычной сварке металлы). Сваренную взрывом заготовку можно прокатать в листовой биметалл [2,5]. Сварка трением с перемешиванием в том числе занимает определенную нишу в современных технологиях соединения разнородных материалов. Сущность процесса заключается в следующем: для сварки используют инструмент в форме стержня, состоящий из двух основных частей, а именно: заплечика или бурта (утолщенная часть) и наконечника (выступающая часть). Размеры этих конструктивных элементов выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей. СТП применяют в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых и магниевых, никелевых и титановых сплавов, а также сталей [9]. Снижение теплового воздействия на металл при СТП способствует уменьшению уровня остаточных пластических деформаций укорочения и растягивающих напряжений в соединениях, что вызывает меньшее коробление сварных конструкций и повышает их стойкость к разрушению. Сварные соединения, полученные трением с перемешиванием, имеют более высокие показатели сопротивления разрушению при внецентренном растяжении образцов, чем полученные неплавящимся электродом, а иногда и превышающие соответствующие значения для основного металла [8-12].

Паяные соединения. Пайка представляет процесс образования неразъемного соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, их сманивания припоем, затеканием припоя в зазор и последующей его кристаллизации. Получение качественных паяных швов во многом зависит от флюсов - химических веществ, способствующих лучшему растеканию жидкого припоя и очищению поверхностей деталей от жировых и окисных пленок. С помощью пайки можно соединять разнородные металлы, а также металлы со стеклом, керамикой, графитом и другими неметаллическими материалами. Преимуществами пайки являются: обеспечение токопроводности паяных соединений, отсутствие деформации деталей. К недостаткам пайки можно отнести: ограниченную механическую прочность соединений, значительную стоимость припоя, возникновение вредных испарений флюсов и припоев. Перспективно развитие технологии паяния металлов и неметаллических материалов ультразвуком. Этот метод паяния удобен для деталей из алюминиевых сплавов, так как высокочастотные колебания (20 000 Гц) разрушают окисную пленку, и паяние происходит без флюса. В приборостроении применяют высокопроизводительный метод группового паяния волной припоя. Его производительность в 20 раз больше обычного метода паяния термическим контактом [2].

Клепанные соединения. Клепанные соединения являются неразъемными соединениями. Эти соединения получают за счет остаточной деформации конструктивных элементов детали или заклепок. С помощью клепки получают соединения, деталей из разнородных и трудносвариваемых материалов: термообработанных и окончательно обработанных точных деталей, для ко-

торых недопустим нагрев; нескольких деталей в один пакет: деталей, подверженных вибрации и ударным нагрузкам. К недостаткам клепаных соединений можно отнести не технологичность конструкций в сборке; высокую трудоемкость изготовления и производственный шум; ослабление сечений деталей отверстиями: концентрацию напряжений и нарушение гладкости наружных поверхностей. Поэтому клепаные соединения обычно применяют там, где их нельзя заменить другими более эффективными способами прочного и плотного соединения [3].

Клееные соединения. Клееные соединения представляют собой неразъемные соединения, наносимые на соприкасающиеся поверхности. Синтетические клеи - это растворы высокомолекулярных органических веществ в летучих растворителях. Клеи обычно применяют в тех случаях, когда механические способы соединения неэффективны, нежелательны или невозможны. Клееные соединения получают распространение благодаря тому, что позволяют соединять детали из однородных и разнородных материалов, которые могут иметь весьма малую толщину. Склеивание не вызывает структурных изменений и остаточных напряжений в материале деталей и не приводит к увеличению массы конструкции. Клееные соединения обладают теплоизолирующими, звукопоглощающими, демпфирующими свойствами, герметичностью. К недостаткам клееных соединений относят невысокую термостойкость: ограниченную прочность соединений, особенно при действии динамических нагрузок; низкую прочность на отрыв; токсичность многих марок клеев [7].

Вальцованные соединения. Вальцевание заключается в том, что закрепление двух сопряженных деталей выполняют путем расширения охватываемой или сжатия охватывающей детали. Силовое замыкание обеспечивается остаточной деформацией деталей, изготавливаемых из пластичных материалов. Вальцованные соединения имеют много разновидностей и видов замыкающих головок. Эти соединения нередко применяют: когда нагрев соединяемых деталей нежелателен; при сборке деталей из разнородных материалов, сварка и пайка которых затруднены; при скреплении в один пакет большого числа деталей; в трубчатых конструкциях, работающих под действием ударных и вибрационных нагрузок; при высоких требованиях к надежности скрепления соединяемых деталей [3].

Соединения заформовкой и замазкой. Заформовкой получают неразъемные соединения путем погружения детали в жидкий или размягченный материал с последующим его затвердеванием в специальных литейных формах или пресс-формах. Для заформовки не требуется изготовления мест сопряжения по посадочным размерам, что позволяет получать соединения деталей сложных геометрических форм. Заформовку применяют для соединения металлических деталей с металлами, пластмассами, резиной и стеклом. Соединения заформовкой чувствительны к температурным изменениям, поэтому при выборе материалов необходимо учитывать коэффициенты термического расширения заформовываемой детали и формообразующего материала. Соединения деталей замазкой осуществляются в результате отверждения замаз-

ки, представляющей собой связующие композиции в виде тестообразной массы. Толщина связующего слоя (не менее 0,5 мм) больше, чем в клееных соединениях. Замазку на поверхности соединяемых деталей наносят с помощью шпателя или шприца, а собранные детали закрепляют в специальных приспособлениях и выдерживают в последних до полного затвердевания замазки. Плавающие замазки при нормальной температуре твердые, поэтому для заполнения зазоров в соединениях их нагревают до перехода в пластическое состояние, а после заполнения зазоров вновь охлаждают; к плавящимся замазкам относятся сургуч, канифоль, восковая и менделеевская замазки; эти замазки часто используют для стопорения мелких крепежных деталей [3].

Список литературы

- [1]. *Базров Б.М.* Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.: ил.
- [2]. *Горельшев И.Г., Кропивницкий Н.Н.* Слесарно-сборочные работы. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 319 с.
- [3]. *Замятин В.К.* Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения: Справочник. –М.: Машиностроение, 1995. – 608 с.
- [4]. *Крысин А.М., Наумов И.З.* Слесарь механосборочных работ: Учебник для подгот. рабочих на производстве. – М.: Высш. шк., 1984. – 462 с.
- [5]. *Рабков Д.М.* Сварка разнородных материалов / Д.М. Рабков, В.Р. Рябов, С.М. Гуревич. – Киев: Техника, 1975. – 208 с.
- [6]. *Технология машиностроения: учебное пособие: в 2 томах / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, И.Н. Гемба [и др.] / Под редакцией Г.Н. Мельникова.* – 3-е изд. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Т. 2: Производство машин. 551 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/106429> (дата обращения: 08.04.2021).
- [7]. *Винокурова М.Э.* Сборка регулируемых цилиндрических клеевых соединений: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 - Технология машиностроения / МГТУ им. Н.Э. Баумана., 2017. 127 с.
- [8]. *Черных И.К., Васильев Е.В., Попов П.Е.* Особенности сварки трением с перемешиванием кольцевых швов малого диаметра // ОмГТУ. 2019. №3.
- [9]. *Pat. 5460317 US.* Friction stir butt weldinu / W.M. Thomas. E.D. Nicholas, J. C. Needham et al. – Publ. 1995.
- [10]. *Arbegast IF. J.* Friction stir welding. After a decade of development . Welding J. 2006. 85. №3. P. 28-35.
- [11]. *Microstructures and room temperature mechanical properties in friction-stir-welded joints of 7075 aluminum alloys / T. Ito, Y. Motohashi. Л. Goloborodko et al. // J. of the Jap. Weld. Soc. - 2005. – 74, № 3. – P. 9-13.*

Яшкин Константин Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kostyayashkin@yandex.ru

Насевич И.Р.

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНАЛАДКИ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С СИСТЕМОЙ НУЛЕВОГО БАЗИРОВАНИЯ

Для улучшения рентабельности производства на предприятии необходимо научиться правильно использовать материальные ресурсы. Это поможет стать предприятию более конкурентоспособным на рынке и вследствие получать ощутимую прибыль. На любом машиностроительном предприятии в качестве исходного объекта являться заготовки, которые в последствии обрабатываются и вследствие получается требуемое заказчиком изделие, которое может в дальнейшем применяться, как при сборке определенной продукции, так и как готовое к продаже изделие.

На предприятиях наиболее распространенным типом производства является «Серийное производство», которое характеризуется ограниченной номенклатурой изготавливаемых изделий, выпускаемые повторяющимися партиями и большим объемом от 500 до 5000 изделий. Чтобы увеличить прибыль предприятия необходимо повысить эффективность производства и сократить время на обработку заготовок и переналадку оснастки, для этого нужно использовать новые технологии во всех стадиях производства начиная от заготовительной стадии до процесса сборки изделия [1,2].

Для предприятия для сокращения времени можно применять методы бережливого производства SMED, но они не настолько эффективны, как модернизация станка или применения специальных оснасток. Для специальных оснасток необходимы большие начальные капиталовложения, что для малых предприятий не всегда реализуемо, но является самым эффективным методом. В основе таких оснасток используется система нулевого базирования, специальные приспособления устанавливаются на специальные зажимные элементы пример которого показан на рис. 1. Для каждого станка можно подобрать универсальную оснастку, например, можно устанавливать дополнительную оснастку, многопозиционные тиски, различные базовые плиты, магнитные паллеты. На базовые плиты можно установить различные комплекты для расширения возможностей станка.

С помощью системы нулевого базирования с установкой в пневматические зажимные элементы, различных компонентов оснастки для последующей механической обработки можно сократить время переналадки на 95%. На примере среднее время простоя на станке с ЧПУ стоит 1000 руб/час, в год, если станок будет простаивать в день по 1 часу то в год это потеря для предприятия в 240 000 руб., а если использовать оснастку такого типа то доход предприятию составит 228 000 руб.

Данные приспособления и технология позволяют увеличить коэффициент загрузки оборудования посредством экономии вспомогательного времени, затрачиваемого на переналадки. Системы дают гибкость любому произ-

водству. Возможность взаимозаменяемости заготовок и процессов на разных станках, без затрат на переналадку, и использование на одном станке различных тисков, собственных приспособлений расширяет сферу применения этих систем [3].

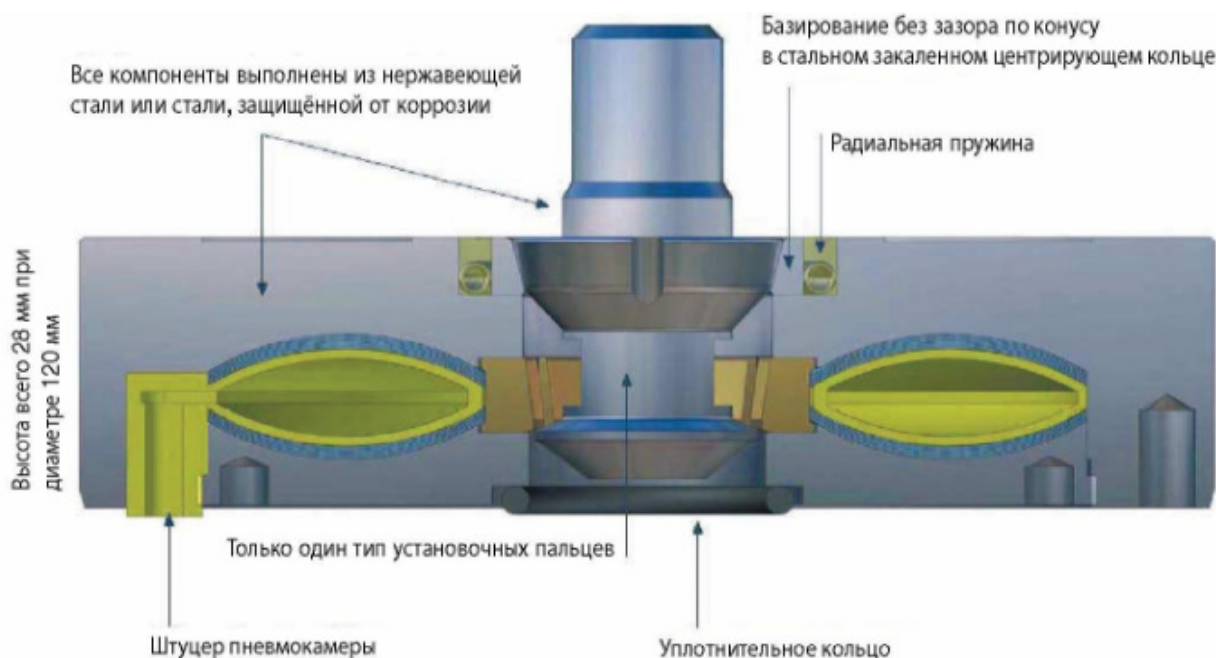


Рис. 1. Конструкция зажимного элемента

Список литературы

[1] Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства: пер. с англ. – М.: Ин-т комплексных стратегических исследований, 2006. – 312 с.

[2] Синго С. Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. – 344 с.

[3] Синго С. Быстрая переналадка. Революционная технология оптимизации производства. Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций». Перевод с английского под ред. Ю.Адлера. – М.: ЦентрОргПром, 2006. – 343 с.

Илья Русланович Насевич – студент, бакалавр, АО КЗТА. E-mail: nasevich98@mail.ru

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Фирсов И.В., Чернова Т.Г.

ВЫБОР ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

К низколегированным относятся стали с содержанием углерода от 0,2% и легирующими элементами с суммарным количеством до 2,5%, например: 09Г2, 09Г2С, ХСНД, 16ГС, 15ХСНД. Такие стали, благодаря легирующим элементам, приобретают лучшую прочность, становятся более податливыми для обработки и устойчивыми к коррозии, по сравнению с низкоуглеродистыми сталями.

Низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью. Выбор способа сварки зависит от толщины свариваемого металла, протяженности шва, его пространственного положения, требуемых свойств соединения.

В серийном производстве крупногабаритных изделий для формирования прямолинейных или кольцевых швов наиболее выгодно применять автоматическую сварку под слоем флюса [1].

В зависимости от химического состава материала изделия подбирают сварочную проволоку. Для примера рассмотрим низколегированную сталь 09Г2С, химический состав которой представлен в таблице 1. Данная сталь используется для изготовления различных деталей и элементов сварных конструкций, работающих при температурах от -70 до +425°С под давлением.

Таблица 1.

Химический состав стали 09Г2С

Легирующий элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Содержание, %	до 0.12	0.5 – 0.8	1.3 – 1.7	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.3	до 0.3	до 0.08

Для соблюдения однородности сварного шва применяют проволоку схожего химического состава, например, Св-08, Св-08А, Св-08Г2С (таблица 2).

Таблица 2.

Химический состав проволоки

Элемент, %	Св-08	Св-08А	Св-08Г2С
С не более	0,10	0,10	0,11
Mn не более	0,35-0,6	0,35-0,60	2,1
Si не более	0,03	0,03	0,95
Cr не более	0,15	0,12	0,20
Ni не более	0,30	0,25	0,25
Al не более	0,01	0,01	0,01
Cu не более	0,25	0,25	0,25

Главной задачей флюса является защита сварочной ванны от газов атмосферы, стабилизация дугового разряда, легирование металла шва, формирование поверхности шва.

В зависимости от выбранной проволоки подбирают флюс. При этом возможны две комбинации «сварочная проволока – флюс». В нашем случае, для низколегированной стали 09Г2С:

- низкоуглеродистая нелегированная проволока Св-08 (Св-08А) в сочетании с высококремнистым высокомарганцевым флюсом АН-348А, ОСЦ-45;
- низкоуглеродистая проволока, легированная марганцем Св-08Г2С в сочетании с низкомарганцевым или безмарганцевым флюсом ФЦ-22.

В первом случае легирование сварного шва происходит благодаря флюсу, во втором – благодаря сварочной проволоке.

Список литературы

[1]. *Гладков Э.А.* Автоматизация сварочных процессов [Текст]: учебник для вузов / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский.- М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.- 421 с.

[2]. <https://svarka74.ru>

[3]. *Ленивкин В. А., Киселёв Д. В., Софьяников В. А. и др.* Сварочные процессы и оборудование: Учебное пособие, 308 с.

Фирсов Игорь Владимирович – студент КФ МГТУ им. Баумана.
E-mail: lana424514@yandex.ru.

Чернова Т.Г. –

Ботников В.Е., Зыбин И.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Сварка трением с перемешиванием (СТП) широко применяется во многих странах мира для изготовления различных конструкций из алюминиевых сплавов [1–5]. Получение неразъемных соединений при СТП происходит в твердой фазе без расплавления основного металла. Это позволяет избежать образования горячих трещин в швах, снизить степень разупрочнения сварных соединений и уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах с повышением их эксплуатационных характеристик и ресурса.

Установлено, что основными параметрами процесса являются частота вращения n и продольная подача инструмента S , а также угол наклона инструмента относительно вертикали α и глубина внедрения заплечика инструмента в деталь Δ (рис.1). Угол наклона оси вращения инструмента от вертикали обычно составляет от 0 до 4° при продольной подаче инструмента углом вперед.

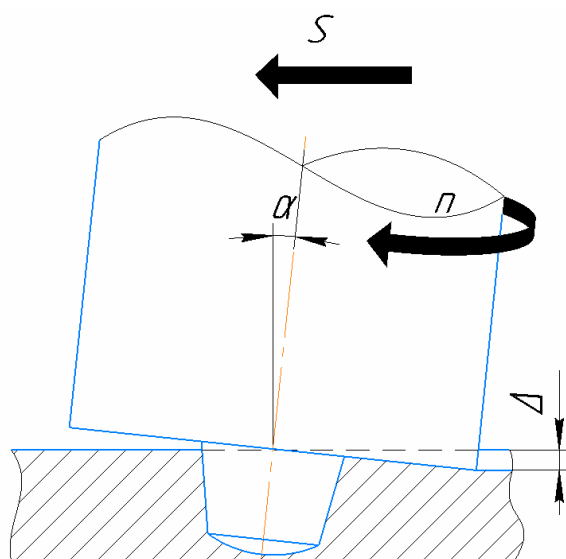


Рис. 1. Основные параметры режима СТП

Наклон позволяет формировать качественный сварной шов (без дефектов сплошности) за счет создания давления под задней кромкой заплечика, где происходит образование шва [6]. На основе литературного анализа [7-9] можно сделать вывод, что исследование возможности получения качественных сварных соединений при угле наклона инструмента относительно вертикали свыше 4° недостаточно изучено. Для исследования влияния угла наклона инструмента относительно вертикали на качество сварного соединения

(без дефектов сплошности) были проведены экспериментальные опыты с углом наклона $0-10^\circ$.

Сварка выполнялась на универсальном вертикально фрезерном станке FSS-400 алюминиевых листов из сплава АМг5 толщиной 5 мм встык. Параметры режима сварки приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Диапазоны параметров режима сварки при проведении эксперимента

Параметр	Диапазон значений
Частота вращения инструмента n , об/мин	450 – 710
Продольная подача инструмента S (скорость сварки), мм/мин	31,5 – 50
Угол наклона инструмента к вертикали α , $^\circ$	0 – 10
Глубина внедрения заплечика в деталь φ , мм	0,05 – 1,3

В ходе проведения экспериментов было установлено, что при отсутствии угла наклона относительно вертикальной оси 0° на макрошлифах соединений был обнаружен дефект в виде тоннельного эффекта (рис. 2). Это обуславливается недостаточным давлением заплечика на свариваемые детали и, как следствие, недостаточным уплотнением металла шва.

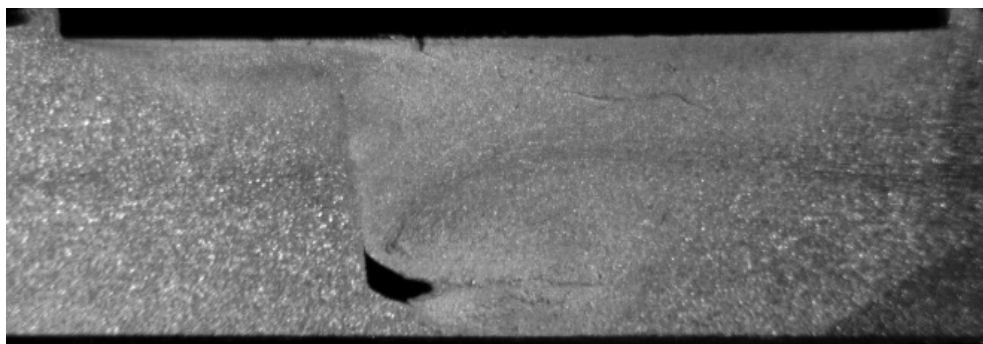


Рис. 2. Макрошлиф сварного соединения при угле наклона инструмента к вертикали 0°

При исследовании макрошлифов сварных швов, полученных при углах наклона инструмента к вертикали в диапазоне $2-10^\circ$, дефектов сплошности обнаружено не было.

Например, при сварке деталей с углом наклона инструмента к вертикальной оси, равным 10° , отсутствуют дефекты сплошности (рис. 3). Однако, вследствие большего угла наклона инструмента к вертикали отмечается большее утонение сварного шва и он характеризуется неравномерной толщиной в своем поперечном сечении, что видно из рис. 3.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что стыковая сварка деталей толщиной 5 мм из алюминиевого сплава АМг5 с углом наклона инструмента к вертикали 0° приводит к образованию дефектов.

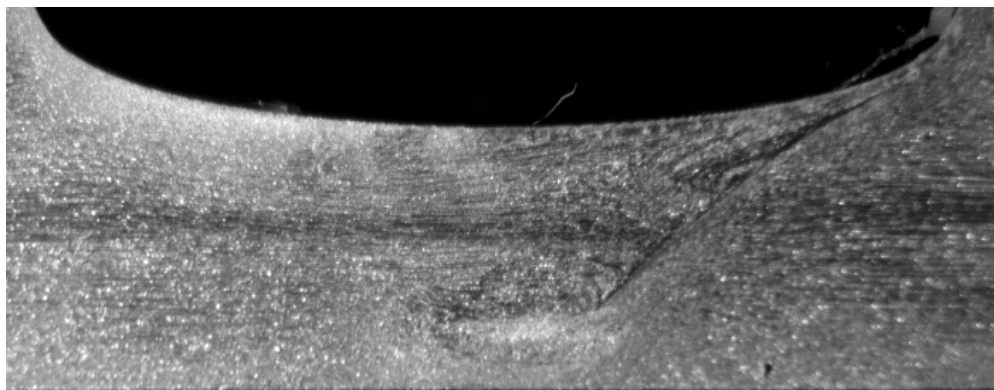


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения при угле наклона инструмента к вертикали 10°

Результаты экспериментов с углом наклона в диапазоне $2-10^\circ$ показали возможность сварки без дефектов сплошности при рассмотренных параметрах режима сварки.

Список литературы

- [1]. Norlin A. A Century of aluminium – a product of the future / A. A. Norlin // Svetsaren. – 2000. – № 2. – P. 31–33.
- [2]. Weman K. Equipment for aluminium welding / K. Weman // Svetsaren. – 2000. № 2. – P. 11–13.
- [3]. Kallee S.W. Railway manufacturers implement friction stir welding / S. W. Kallee, J. Devenport, E. D. Nicholas // Welding J. – 2002. – № 10. – P. 47–50.
- [4]. Arbegast W. Friction stir welding after a decade of development / W. Arbegast // Welding J. – P. 28–35.
- [5]. Friction stir welding flies high at NASA / J. Ding [et al.] // Welding J. – 2006. – № 3. – P. 54–59.
- [6]. Немененок Б.М., Рафальский И.В., Лущик П.Е. и др. Способы получения неразъемных соединений сплавов на основе алюминия и титана / Литье и металлургия. – 2020. – № 1. – С. 56-64.
- [7]. Ильющенко А.Ф., Радченко А.А., Шевцов А.И. и др. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием для соединения листовых материалов из алюминиевых, стальных и медных сплавов / Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Сборник докладов 11-го Международного симпозиума. В 2-х частях. – 2019. – С. 196-205.
- [8]. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е. и др. Анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием / Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2017. № 1 (30). – С. 15-21.

[9]. Черных И.К., Матузко Е.Н., Васильев Е.В. и др. Исследование влияния технологических факторов на качество шва, полученного сваркой трением с перемешиванием / Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2017. – № 1. – С. 70-76.

Ботников Вячеслав Евгеньевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: newstalker0@yandex.ru

Зыбин Игорь Николаевич – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: igor.zybin@mail.ru

Антохин М.С., Труханов К.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИВАРКИ ЛЮКОВ К ОБЕЧАЙКЕ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

Стальные емкости и сосуды давления имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. К данным изделиям применяются строгие требования по надежности. Для повышения качества и снижения себестоимости их производства широко внедряются производительные автоматизированные способы сварки. При этом можно выделить две основные группы сварочных операций:

- сварка кольцевых швов корпуса сосуда
- приварка люков и штуцеров к корпусу (рис. 1).

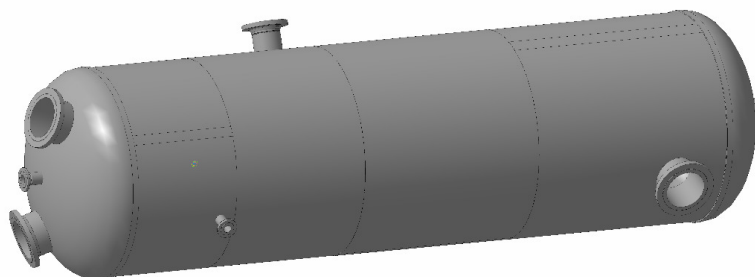


Рис. 1. Основные элементы сосуда давления

Для облегчения процесса сборки габаритных люков и штуцеров предлагается приспособление, конструкция которого представлена на рис. 2.

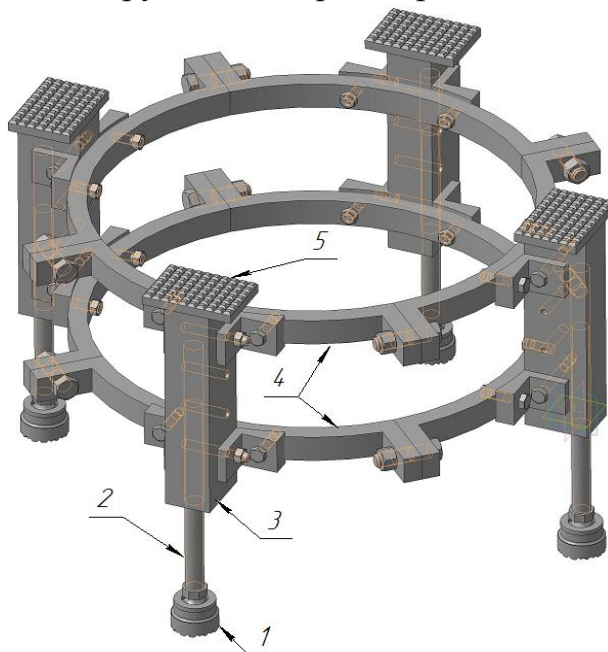


Рис. 2. Приспособление для вварки люков в обечайку:
1 – нижняя пятка опоры; 2 – шпилька; 3 – корпус опоры; 4 – скобы;
5 - верхняя пятка опоры

Основными элементами данного приспособления являются регулируемые опоры (поз. 1-3, 5), на которые устанавливается фланец люка для его позиционирования. Скобы (поз. 4) служат для фиксации опор и выбираются в зависимости от диаметра ввариваемого элемента.

Основную нагрузку в данном приспособлении принимает на себя опоры. Для выбора их конструкции, обеспечивающих необходимый уровень прочности, и снижения массы приспособления было выполнено компьютерное моделирование в САД-пакете КОМПАС 3Д. Были рассмотрены три варианта конструкции корпуса опоры, изготавливаемые из стандартного стального проката: круглая труба, круг и квадрат (рис. 3). Сравнение прочности конструкции проводилось для опор с одинаковой массой. Параметры рассматриваемых конструкций, представлены в табл. 1.

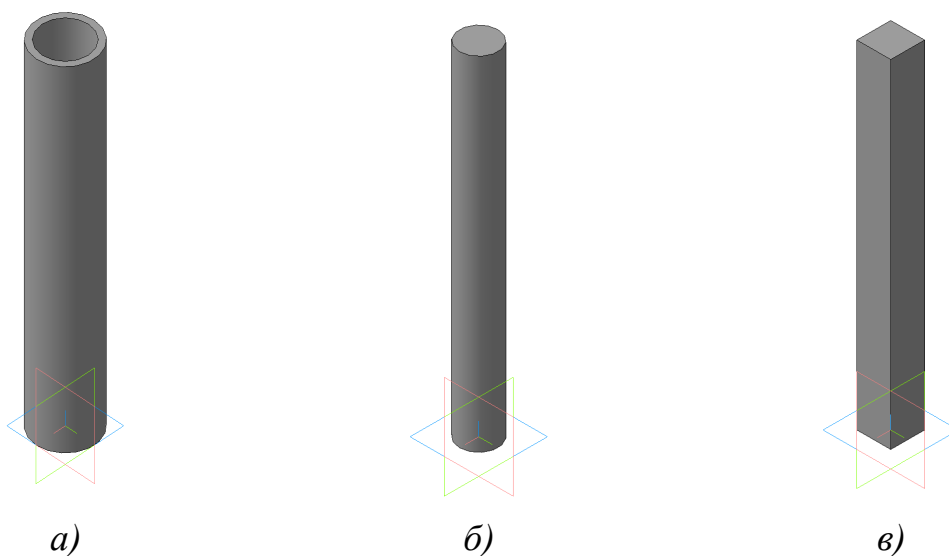


Рис. 3. Варианты корпуса опоры

Таблица 1.

Параметры опор

Геометрические параметры сечения корпуса опоры, мм			Площадь поперечного сечения корпуса, мм ²
Труба	Круг	Квадрат	
Ø42x4,0	25	22	484
Ø50x5,0	28	25	625
Ø60x3,5	30	27	729
Ø76x3,5	32	28	784
Ø76x4,0	34	30	900

Моделирование выполнялось для одной опоры под действием нагрузки 1000 Н. Величина нагрузки бала определена исходя из размеров и массы привариваемых люков. На рис. 4 представлены примеры распределения напряжений для рассматриваемых конструкций.

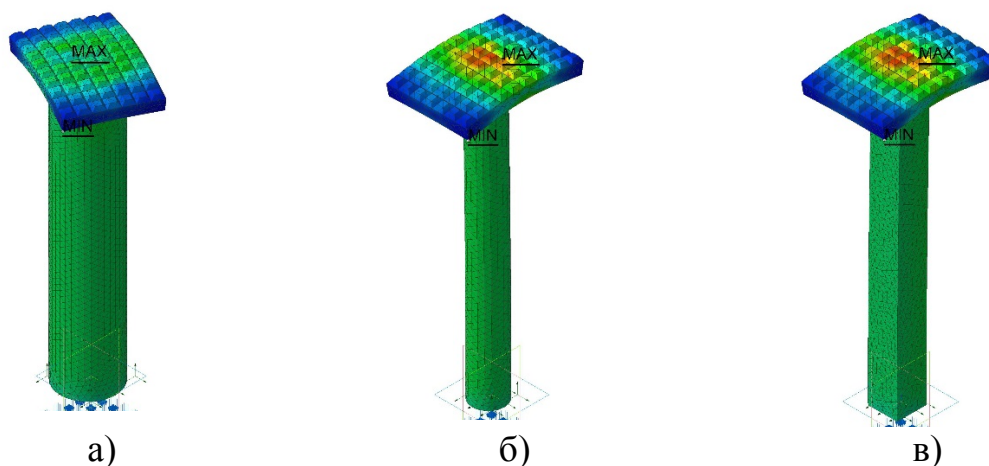


Рис. 4. Поля напряжений

Результаты моделирования представлены в табл. 2–4.

Таблица 2.

Коэффициенты запаса предела текучести

Площадь поперечного сечения, мм ²	Коэффициент запас предела текучести		
	Труба	Круг	Квадрат
484	22,57	52,93	49,63
625	70,15	53,27	61,53
729	75,67	68,19	64,50
784	108,00	68,46	68,10
900	123,56	74,29	74,13

Таблица 3.

Коэффициенты запаса предела прочности

Площадь поперечного сечения, мм ²	Коэффициент запас предела прочности		
	Труба	Круг	Квадрат
484	39,38	92,35	86,59
625	122,4	92,94	107,34
729	132	118,96	111,5
784	188,86	119,4	118,8
900	215,57	129,6	129,3

Полученные данные использовались для построения аппроксимирующих математических моделей. На рис. 5 показан пример линейной аппроксимации полученной зависимости коэффициента запаса текучести от площади сечения корпуса, выполненного из трубы.

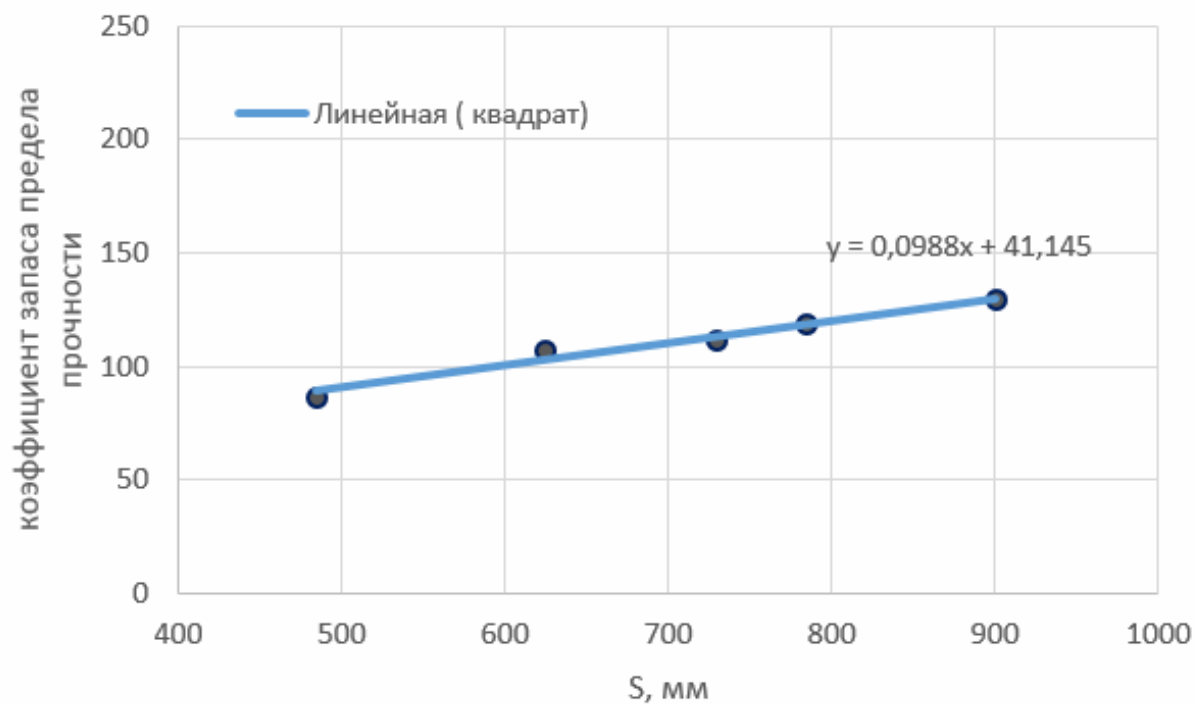


Рис. 5. Пример линейной аппроксимации результатов моделирования

На рисунках 6 и 7 показаны полученные графические зависимости аппроксимации результатов моделирования, в таблице 4 - полученные линейные модели.

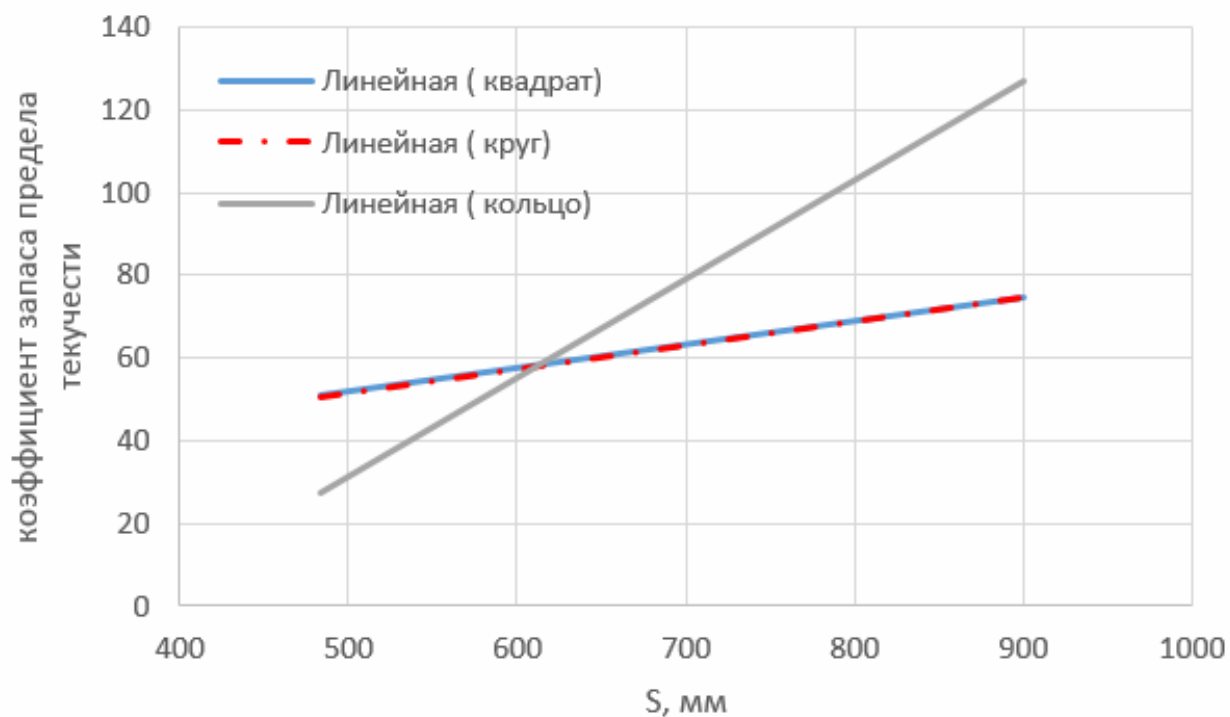


Рис. 6. Зависимость коэффициента запаса предела текучести

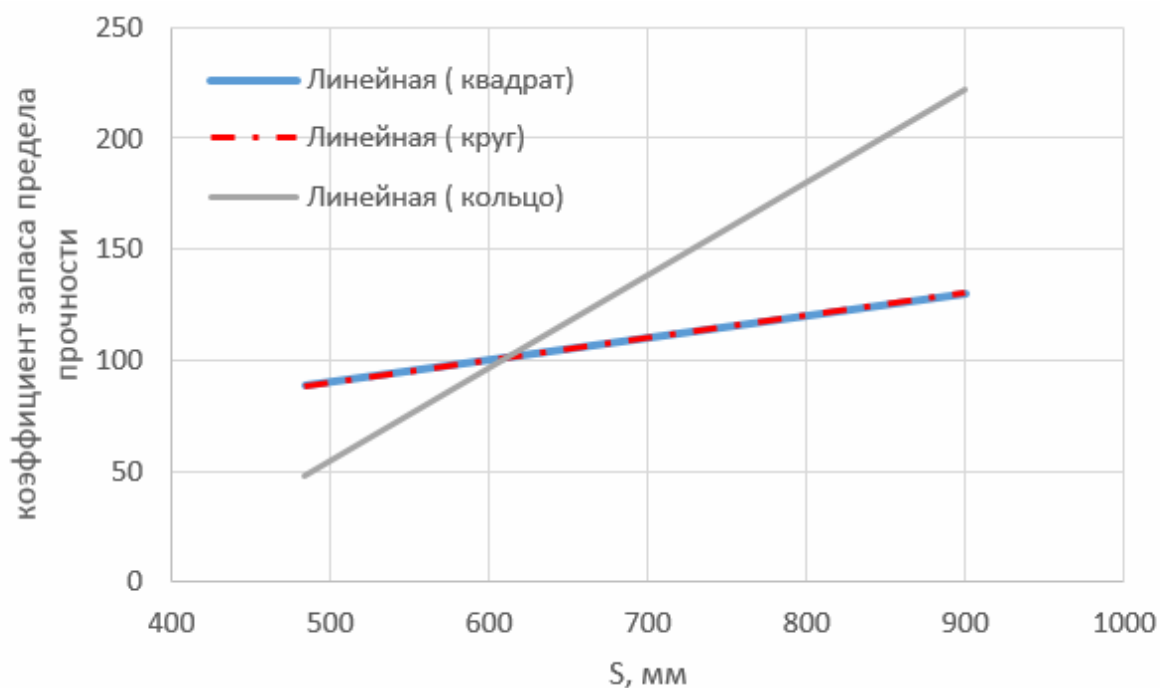


Рис. 7. Зависимость коэффициента запаса предела прочности

Таблица 4.

Математические модели

Форма поперечного сечения	Коэффициент запаса предела текучести	Коэффициент запаса предела прочности
Кольцо	$0,4194 \cdot S - 155,59$	$0,2402 \cdot S - 89,098$
Круг	$0,1004 \cdot S + 39,936$	$0,0576 \cdot S + 22,869$
Квадрат	$0,0988 \cdot S + 41,145$	$0,0568 \cdot S + 23,577$

По результатам анализа для изготовления корпуса опоры была выбрана труба $\varnothing 50 \times 5,0$, обеспечивающая необходимый уровень прочности при меньшей массе конструкции.

Список литературы

- [1]. Зубарев Ю.М. Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении : учебник / Ю.М. Зубарев. – СПб: Лань, 2021. – 320 с.
- [2]. Хайдарова А.А. Практикум по конструированию сварочных приспособлений : учебное пособие / А.А. Хайдарова, С.Ф. Гнусов. – Томск : ТПУ, 2014. – 63 с.
- [3]. Кудрявцев Е.М. КОМПАС-3DV10. Максимально полное руководство : руководство : в 2 томах / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, [б. г.]. – Т. 1 – 2008 – 1184 с.

Антохин Михаил Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: antokhin.mc@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ШНУРОВОГО МАТЕРИАЛА ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИЗНОШЕННЫХ ЗУБЬЕВ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Введение. Восстановленные детали обходятся дешевле, чем покупка новых. Один из способов восстановления зуба ковша экскаватора, это применение дуговой наплавки с использованием износостойкого шнуrowого материала.

В качестве ГШМ применяли материалы российского производства (ООО «СП Техникорд») марки HR-2Sp, в качестве наполнителя применяется порошок марки ПР-НХ17СР4. Применение такого присадочного материала обеспечивает получение в наплавленном металле композиционной структуры системы Ni–Cr–B–Si+WC–W₂C. Такая структура защитного материала хорошо противостоит износу.

ГШМ состоит из эластичной полимерной оболочки, внутри которого находится металлический порошок или в составе порошка находится композиционный сердечник. Связующие компоненты и оболочка сублимируют в процессе нагрева при температуре 400 °С без отложения на подложку [1, 2].

В горнодобывающей промышленности преобладает в основном абразивный износ. Абразивный износ возникает от воздействия мелких твердых частиц, попадающих в зазоры между трущимися деталями, образуют на поверхности деталей микро-риски (царапины), в процессе работы горного оборудования они увеличиваются - это приводит к разрушению детали.

Практика показывает, что снижение температуры от + 20°С до – 10°С приводит к увеличению скорости изнашивания в 1,5...2 раза, а при дальнейшем снижении температуры до – 40°С она увеличивается в 2,5...3 раза [3].

Описание изделия. Экскаваторы Р&Н 2800 ХРС грузоподъемностью около 80 тонн и номинальным объемом ковша 33,6 м³ эксплуатируются в тяжелых условиях горнодобывающих предприятий [4]. Эксплуатация экскаваторов в зимних условиях, работа в песчаных грунтах, приводят к постоянным ударным нагрузкам, где происходит интенсивный износ деталей, которые должны быть заменены или восстановлены.

Наиболее нагруженной деталью, которая периодически требует замены, является ось (соединяя ковш и стрелу экскаватора) и зуб. Дуговую наплавку можно использовать как при механизированном, так и при автоматизированном процессе, использование ГШМ аналогично использованию сварочной проволоки в полуавтоматической или автоматической сварке. Восстановление зубьев карьерных экскаваторов производится большей частью лишь после поломки, потери или, когда они изнашиваются на столько, что становится невозможной эксплуатация экскаватора [5, 6].

Эксперимент. Зуб является основным режущим грунт инструментом, в процессе работы которого изменяется угол заострения зуба, другими словами он просто тупится. Нагрузка на стенки зуба увеличивается, это приводит к уменьшению рабочей длины.

При изношенных зубьях сопротивление к копанию возрастает примерно до 230%. При полном износе зубьев их угол заострения увеличивается в 2...2,5 раза, а рабочая длина сокращается в 3...4 раза [7].

Одной из важнейших характеристик, определяющих интенсивность износа деталей во времени, является твёрдость материала [8].

Карьерные экскаваторы в основном работают в песчаных грунтах. Характер износа зуба, работающего в условиях абразивного изнашивания показан на рис. 1. На рис. 1 теоретически показан процесс износа зуба в зависимости от капания экскаватором скального грунта.

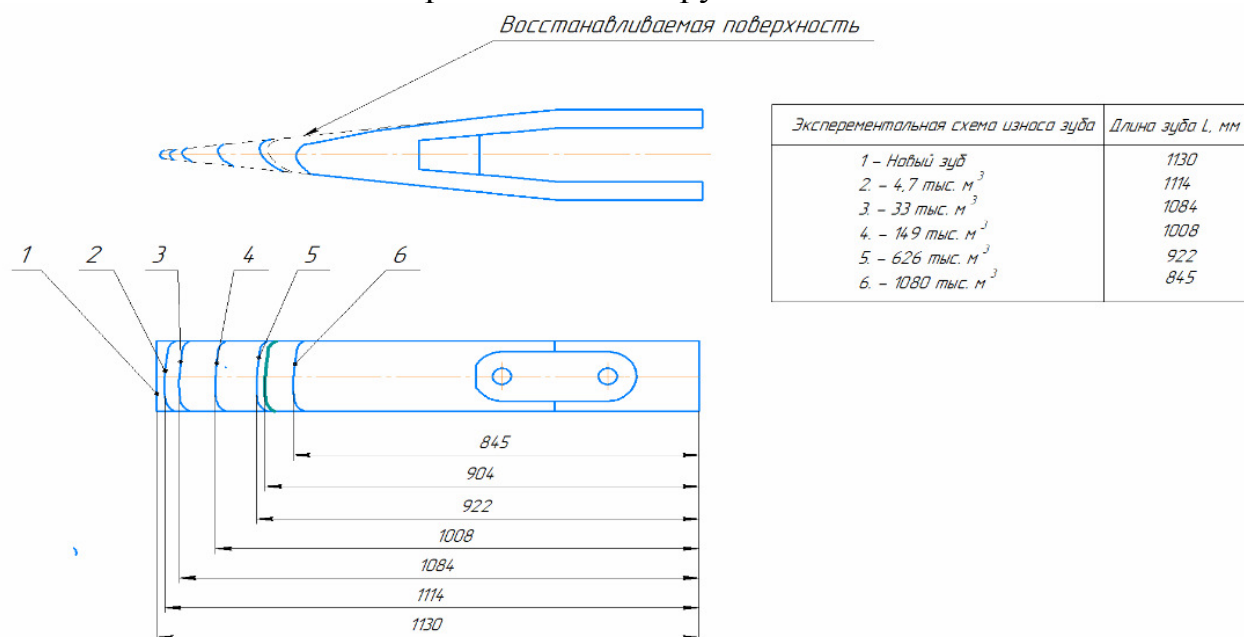


Рис. 1. Схема износа зуба

Теоретически ресурс восстановленного зуба должен быть не менее 80% от ресурса нового, при этом минимальная длина пригодная под восстановление ограничена $L \approx 904$ мм (в данном примере), при более сильном износе восстанавливать зуб не целесообразно.

Восстановление зуба предлагаю использовать автоматизированный сварочный комплекс, показанный на рис. 2.

На рис. 2 показан сварочный позиционер поз. 3, на котором установлен трехкулачковый патрон. Сварочный позиционер для наплавки зуба должен обеспечивать маршевую скорость вращаемой конструкции при различных углах ее наклона, а также данная установка может использоваться для наплавки тел вращения (например, осей). Сварочная автоматическая головка поз. 1, установлена на сварочный портал поз. 2. Сварочный автомат выполняет сварку неплавящимся электродом в среде защитных газов.

Использование данной установки позволяет повысить точность и качество сварки, увеличенная производительность и скорость сварки, улучшение условий труда (оператору не нужно стоять в непосредственной близости от дуги), а также универсальность и быстрая перестройка оборудования.

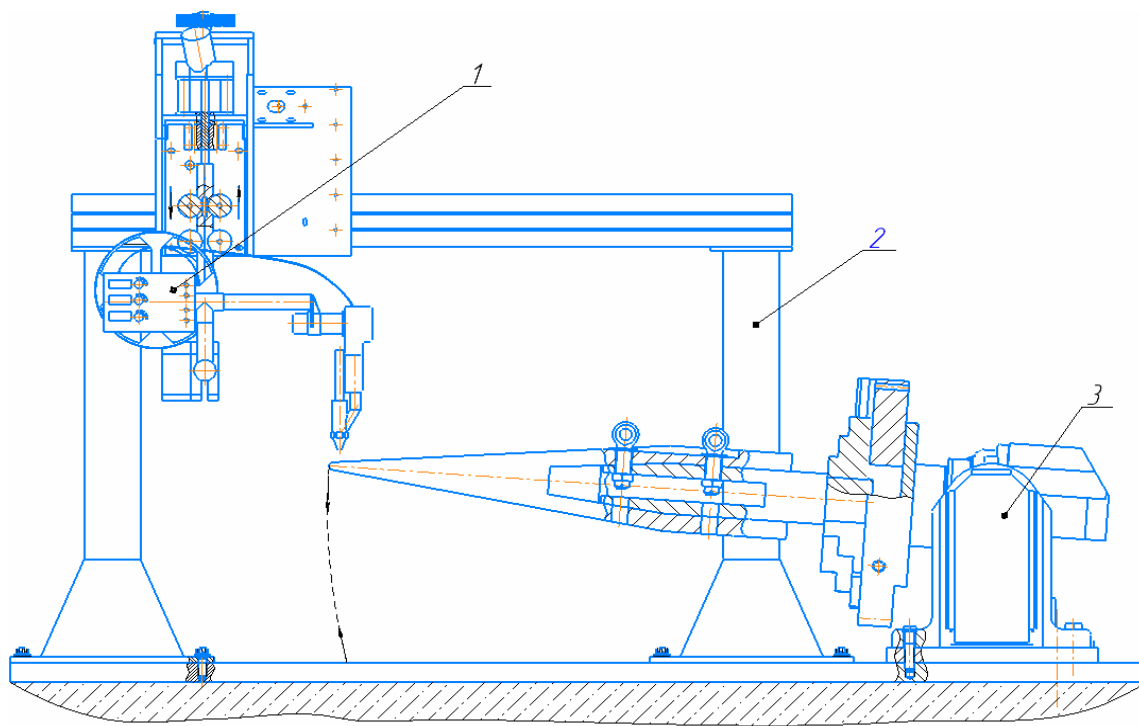


Рис. 2. Установка по наплавке зуба

Недостатком такой схемы наплавки, является наличие дополнительного оборудования. Данное оборудование необходимо для закрепления зуба в специальный зажим, для последующего закрепления его в трехкулачковый патрон. Специальное приспособление показано на рис. 3.

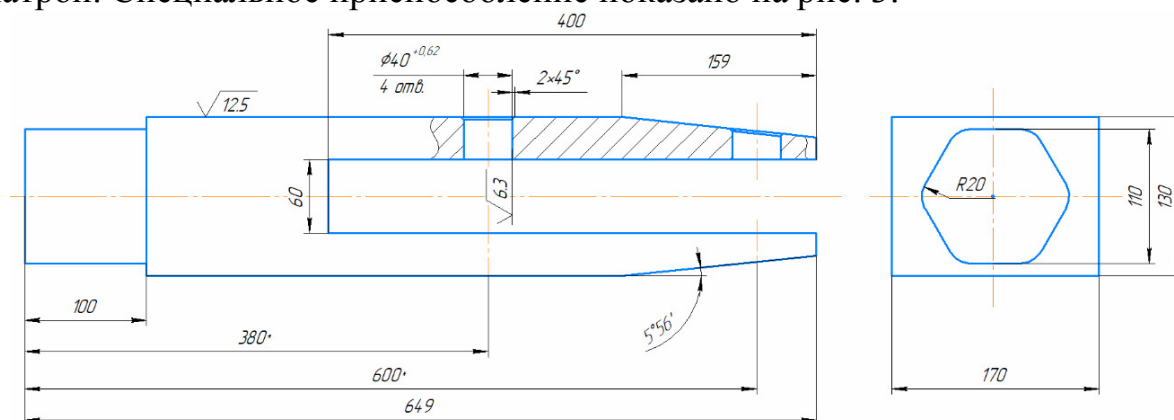


Рис. 3. Приспособление для закрепления зуба

Сущность предлагаемого способа заключается в восстановлении геометрических размеров зуба на специальном автоматизированном сварочном приспособлении с использованием ГШМ. Способ наплавки: аргодуговая сварка неплавящимся электродом в среде защитных газов.

Теоретически твердость наплавленного зуба будет составлять 50-55 HRC, в структуре образуется остаточный аустенит, который при эксплуатации позволяет реализовать энергопоглощающий процесс деформированного мартенситного превращения, что приведет к увеличению износостойкости.

Выводы. Применение ГШМ в автоматизированном процессе один из способов по восстановлению деталей, работающих в условиях абразивного износа. Детали карьерных экскаваторов, подверженные износу, крупногабаритные и восстановление таких деталей невозможно без применения специальных сварочных, и вспомогательных механизмов.

В данной работе была показана принципиальная возможность аргонодуговой наплавки износостойких покрытий из композиционных материалов системы Ni–Cr–B–Si+WC–W₂C, обеспечивающей сохранение армирующих частиц на специализированном автоматическом оборудовании.

Список литературы

[1]. *Затока А.Е.* Гибкие шнуровые материалы для газопламенного напыления и наплавки покрытий // Химическая техника – № 11 – 2003. – С. 15–17.

[2]. *Затока А.Е.* Газотермическое напыление и наплавка с использованием гибких шнуровых материалов. / Сб.тр. 6-й Межд. конф. «Пленки и покрытия – 2001» / Под ред. В.С Клубникаина.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 23–32.

[3]. *Баловнев В.И.* Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. – № 2. – С. 12-15.

[4]. *Князьков В.Л.* Механические свойства и химический состав, слоистой структуры детали «ось» соединения подъемной проушины ковша и коромысла экскаватора R&N 2800ХРС // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №1 141. С. 141-142.

[5]. *Тарасов В. Н.* Обоснование таблиц удельной энергоемкости процесса копания грунтов ковшом экскаватора обратная лопата // Строительные и дорожные машины. 2017. № 1. С. 7-11.

[6]. *Баловнев В. И.* Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12-15.

[7]. *Зорин В.А.* Надежность машин // Издательство «ОрелГТУ», 2003. – 548 с.

[8]. *Комбалов В.С.* Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / Машиностроение, 2007. – 384 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/743>

Артеменко Сергей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: artemon-24@yandex.ru

Орлик Антон Геннадьевич – доцент, преподаватель кафедры «Материаловедение и химия» КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

Орлик Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доцент., КФ МГТУ им. Баумана, г. Калуга, Россия. E-mail: g.v.orlik@yandex.ru

СЕКЦИЯ 3.

**ФИЗИКА
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОСХЕМА ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

В данной работе описано разработанное фотоприемное устройство, предназначенное для регистрации импульсного оптического излучения в диапазоне длин волн $\lambda = (0.8 \div 0.92)$ мкм и работе в составе оптоэлектронного устройства. Разработанная микросхема фотоприемного устройства позволяет преобразовывать входной оптический сигнал в электрический и усиливать его за счет операционного усилителя, интегрированного в полупроводниковый кристалл кремния вместе с фотодиодом.

Схема электрическая принципиальная микросхемы представлена на рис. 1.

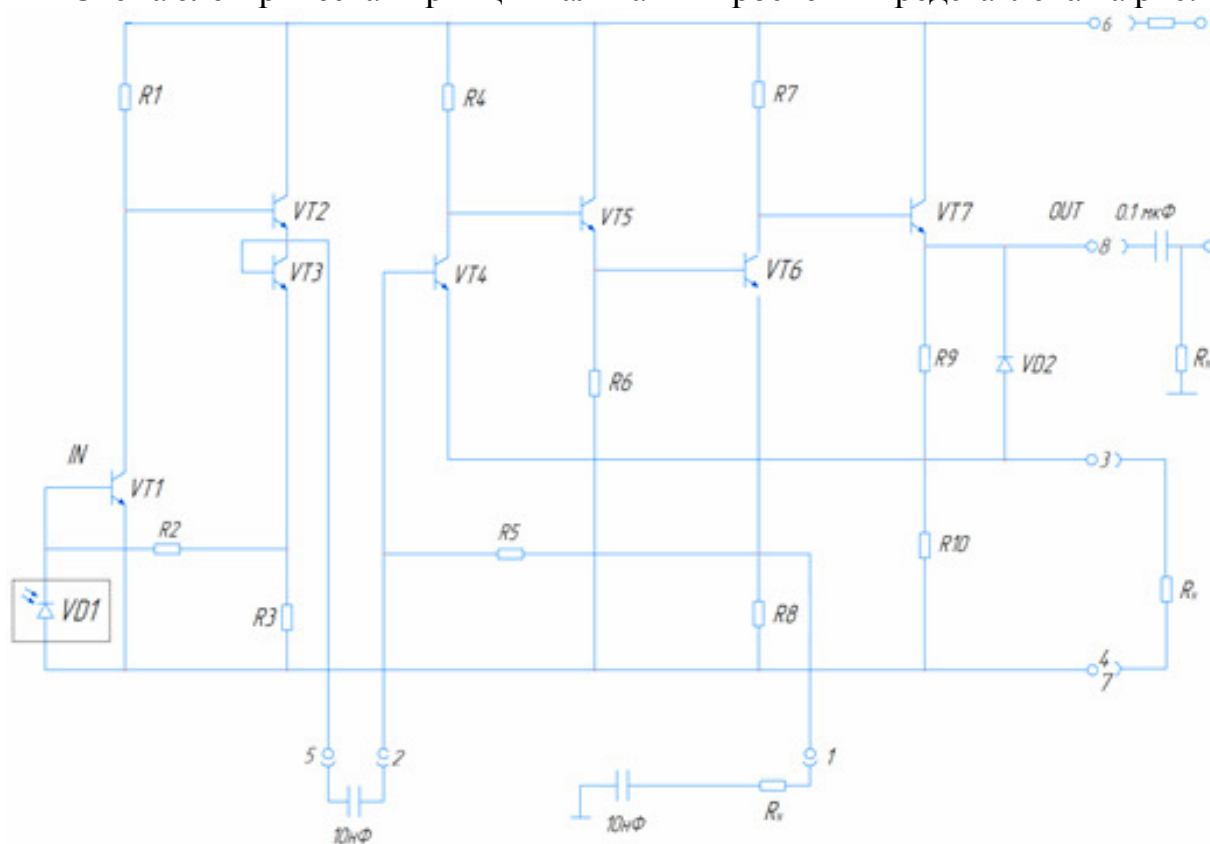


Рис.1. Электрическая принципиальная схема микросхемы фотоприемного устройства

Технология изготовления микросхемы максимально адаптирована под технологию изготовления серийных биполярных кремниевых микросхем. Первый каскад схемы электрической принципиальной представляет собой преобразователь с выходом 5. Источником импульсного тока является фотодиод 'VD1'. При поступлении тока на базу транзистора 'VT1', транзистор открывается, тем самым происходит падение напряжения на базе транзисторе 'VT2'. В момент одиночного импульса 'VT2' находится в закрытом состоянии, а

в момент спада импульса VT2 находится в открытом состоянии. На выводе 5 можно отследить амплитуду выходного напряжения.

Второй каскад схемы представляет собой усилительную часть входного сигнала с входом 2. Конденсатор номиналом 10 нФ работает на импульсной амплитуде напряжения порядка 600 мВ. При напряжении на базе более 0,7 В транзистор VT4 открывается. Транзисторы VT5, VT6, VT7 открываются последовательно за VT4. Конструкции и топологии транзисторов, а также номиналы резисторов выбирались таким образом, чтобы усилитель обеспечивал требуемый коэффициент усиления. Вывод 3 предназначен для подключения отрицательной обратной связи через низкоомное сопротивление. Которое в свою очередь может увеличивать усиление на выходе 8 в десятки раз.

В качестве фотоприемного устройства использовался кремниевый фотодиод VD1 подключенный на вход операционного усилителя. Операционный усилитель относится к классу стандартных усилителей и имеет обратную связь через конденсатор номиналом 10 нФ.

Схемы подключения для микросхемы разработана при помощи методик измерения операционных усилителей и компараторов напряжения.

Схема включения модуля фотоприемного изображена на рис. 2.

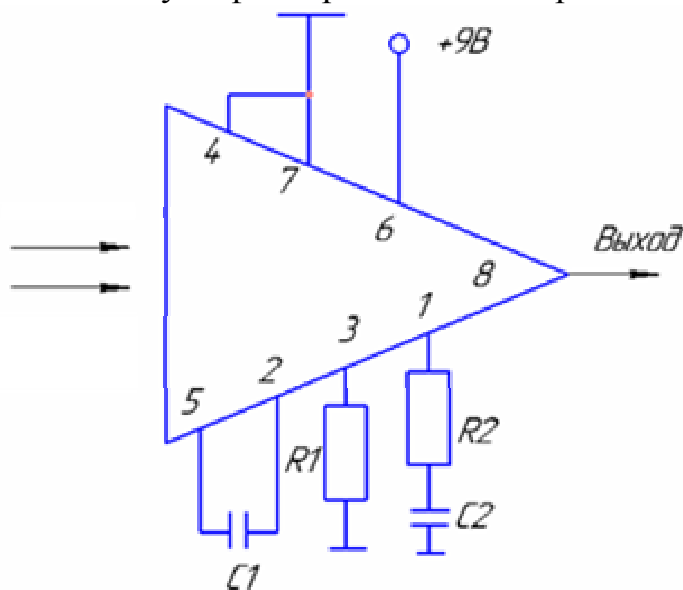


Рис. 2. Схема включения модуля фотоприемного устройства:
C1 – конденсатор разделительный 0.01 мкФ; C2 – конденсатор корректирующий 0.01 мкф; R1 – резистор обратной связи 0 ... 1 кОм;
R2 – резистор корректирующий 510 Ом \pm 10 %

Величина сопротивления резистора R1 выбирается в зависимости от необходимой вольтовой чувствительности. Величины сопротивлений резистора R2 и емкости конденсатора C2 равное 510 Ом и 0,01 мкФ соответственно необходимы только для достижения максимальной вольтовой чувствительности. В общем случае их применение не обязательно.

Назначения выводов в схеме включения модуля фотоприемного устройства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение вывода	Назначение вывода
1	Коррекция
2	Вход усилителя
3	Вывод обратной связи
4	Общий
5	Выход преобразователя
6	Плюса напряжения питания (+)
7	Корпус
8	Выход усилителя

Допустимое значение статического потенциала 200 В, III степень жесткости по ОСТ11 073.062 – 84 - Δ.

Электрическая схема включения модуля изображена на рис. 3.

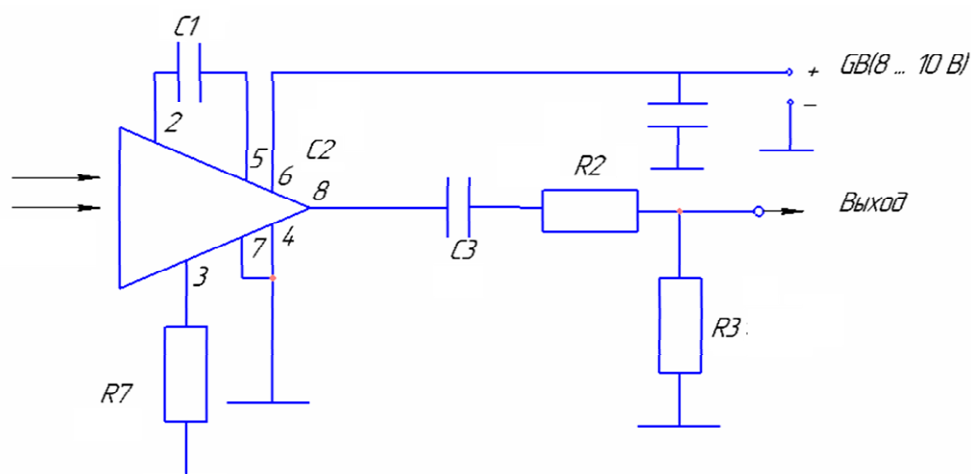


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная включения разработанной микросхемы

Таблица 2.

Символ	Параметр, единица измерения	Норма	
		не менее	не более
$P_{пор}$	Пороговая импульсная чувствительность, Вт	-	$3 \cdot 10^{-8}$
S_U	Импульсная вольтовая интегральная чувствительность, В/Вт	$2 \cdot 10^6$	-
I_{CC}	Ток потребления, Ма	-	6.0
T_C	Длительность импульса выходного напряжения по уровню 0,5 мкс	-	0.5
T	Длительность импульса входного 115 (номинал) 16 оптического излучения по уровню 0,5 нс	115 (номинал)	
γ	Гамма – процентный срок сохраняемости приемника при $y = 95\%$	13	-

Изображенные на схеме включения рис. 3 конденсаторы должны быть керамического типа КМ. Монтаж модуля должен производиться проводниками минимальной длины и исключать появление замкнутых контуров в цепи общего провода. Модуль должен быть защищен от воздействия внешних электромагнитных полей и оптических засветок.

Основные электрические параметры представлены в табл. 2.

Таким образом, в данной работе разработана микросхема фотоприемного устройства, в которой кремнёвый фотодиод и схема обработки фото сигнала реализованы в одном кремниевом кристалле. Технология изготовления микросхемы максимально адаптирована под технологию изготовления серийных биполярных кремниевых микросхем. Разработанная микросхема фотоприемного устройства предназначена для регистрации импульсного оптического излучения в диапазоне длин волн $\lambda = (0.8 \div 0.92)$ мкм.

Гришина Алина Игоревна (Grishina A.I.) – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; grishinaai@student.bmstu.ru

Андреев Владимир Викторович (Andreev V.V.) – д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; andreev@bmstu-kaluga.ru

Корнев С.А., Андреев В.В.

ЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ RISC-V ПРОЦЕССОРНОГО ЯДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CADENCE GENUS

Всё чаще в современной электронике для решения различных задач применяются заказные интегральные схемы (ASIC) и системы на кристалле, включающие в себя процессорные ядра, используемые для управления различными функциональными блоками микросхемы.

Для процессорного ядра входящего в микросхему специального назначения в зависимости от выполняемой схемой задачи, на первое место могут выходить требования к его высокой производительности, или же к минимизации занимаемой на кристалле площади и энергопотребления [1]. Также немаловажен факт удобства разработки: минусом многих процессорных ядер является отсутствие средств разработки для них. Ещё одним фактором, влияющим на выбор процессорного ядра, являются лицензионные отчисления и стоимость готовых ядер. К примеру, для создания ARM процессора необходимо заплатить авансовый сбор, а также выплачивать роялти с продаж.

В связи с названными выше причинами, в настоящее время набирает популярность использование архитектуры набора команд RISC-V.

RISC-V – это свободная и открытая архитектура команд разработанная в Калифорнийском университете в Беркли при участии Дэвида Паттерсона. Она доступна для свободного и бесплатного использования, в том числе для коммерческого применения. Кроме того, плюсом архитектуры является модульность и гибкость: базовый набор содержит малое подмножество команд, реализующих операции ветвления, безусловных переходов, взаимодействия с памятью, арифметических и логических операций, а также ряд служебных инструкций.

Базовое подмножество команд (RV32I, RV64I и RV128I) использует следующий набор регистров: специальный регистр x0 (zero), 31 целочисленный регистр общего назначения (x1 – x31), регистр счётчика команд (PC), а также множество регистров CSR (Control and Status Registers), которое может быть адресовано до 4096 CSR [2].

Также для встраиваемых приложений может использоваться вариант архитектуры RV32E (Embedded) с сокращённым набором регистров общего назначения: их количество сокращено с 32 до 16.

В расширения базового набора инструкций входят операции умножения и деления, операции над числами с плавающей запятой, атомарные операции, а также поддержка сжатых инструкций.

Такая архитектура позволяет разработчику процессора гибко настраивать параметры процессора, выбирая лишь необходимые расширения набора команд и достичь заданных качественных характеристик процессора (производительность, площадь, энергопотребление и т.д.). Также, что немаловажно, для данной архитектуры есть большой выбор инструментов для разработки

программного обеспечения, а RISC-V Foundation работает в тесном партнёрстве с The Linux Foundation [3].

Описанные выше преимущества RISC-V обусловили её выбор в качестве архитектуры для разрабатываемого soft-процессора (микропроцессорное ядро, которое может быть полностью создано с использованием только логического синтеза) нацеленного на применение в микросхемах специального назначения. В качестве базового набора инструкций был выбран 32-битный набор базовых команд RV32I, а также реализована поддержка сжатых 16-битных инструкций (C Extension), что позволяет экономить память, затрачиваемую на хранение прошивки процессора. Также были добавлены команды умножения и деления целых чисел (M Extension), команды доступа к CSR регистрам (Zicsr) и выполнения привилегированных инструкций.

Soft-процессор имеет конвейер состоящий из пяти стадий, что позволяет достигнуть разумного компромисса между максимальной рабочей частотой и количеством полупроводниковых элементов [3, 4].

Ядро имеет два уровня привилегий: M и U – машинный (Machine) и пользовательский (User/Application) соответственно. Уровни привилегий используются для обеспечения защиты между различными компонентами программного обеспечения. Любые попытки выполнения операций, не разрешенных текущим режимом привилегий, вызовут исключение [2].

Данные уровни привилегий позволяют использовать ядро для построения защищенных систем с операционными системами реального времени. Для логического синтеза процессорного ядра, было использовано ПО Cadence Genus, позволяющее производить синтез схемы с привязкой к выбранной полупроводниковой технологии и её оптимизацию.

Логический синтез используется для перевода HDL описания схемы в список цепей (netlist) с цифровыми библиотечными логическими элементами, предоставляемыми используемой технологией [5]. В качестве полупроводниковой технологии для проведения синтеза была выбрана КМОП технология с тремя металлами и технологическими нормами 0.6 мкм.

Характеристики полученной в ходе синтеза схемы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементы использованные при синтезе схемы и занимаемая площадь

Название блока	Количество триггеров	Общее кол-во элементов	Площадь, мкм ²
Блок получения инструкции	159	1276	508 773
Блок декодирования инструкции	1 219	6 111	2 679 521
Блок выполнения операции	479	4 298	1 725 366
Блок обращения к памяти и CSR регистрам	98	861	350 842
Прочие блоки	280	3 237	1 278 604
Итого:	2 235	15 783	6 543 106

По результатам синтеза и временного анализа было выяснено, что схема способна работать на тактовой частоте до 80 МГц и занимает площадь в 6 543 106 мкм² (значение может увеличиться примерно на 10-30% в процессе создания топологии микросхемы). Большое количество элементов блока декодирования инструкции объясняется расположением в нём регистрового файла (32 регистра по 32 бита каждый). В категорию «Прочие блоки» попали CSR регистры, блок управления конвейером и др.

В дальнейшем планируется оптимизация конструкции по площади, например замена регистрового файла на триггерах (flip-flop), на аналогичную конструкцию, использующую защёлки (latch). После оптимизации будет проведено размещение компонентов процессора на кристалле, трассировка связей и дальнейшее тестирование модели микросхемы перед отправкой в производство.

Список литературы

[1] Neil H.E. Weste. David Money Harris. CMOS VLSI Design. A Circuits and Systems Perspective. Fourth Edition. - Addison-Wesley, 2015.

[2] The RISC-V instruction set architecture (ISA) specifications. Available at: <https://riscv.org/technical/specifications/>, accessed 05.04.2021

[3] В. А. Фролов, В. А. Галактионов, В. В. Санжаров, Исследование технологии RISC-V // Труды ИСП РАН, 2020, том 32, выпуск 2, 81–98.

[4] Miyazaki, Hiromu & Kanamori, Takuto & Islam, Ashraful & Kise, Kenji. (2020). RVCOREP: An Optimized RISC-V Soft Processor of Five-Stage Pipelining. IEICE Transactions on Information and Systems. E103.D. 2494-2503. 10.1587/transinf.2020PAP0015.

[5] Tan, T.S., Rosdi, B.A. Verilog HDL Simulator Technology: A Survey. J Electron Test 30, 255–269 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10836-014-5449-5>

Корнев Сергей Александрович (Kornev S.A.) – студент ИУК1-11М, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; s.kornev.tov@gmail.com

Андреев Владимир Викторович (Andreev V.V.) – д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; vladimir_andreev@bmstu.ru

Дмитриев А.А.

МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНА В ОПТИЧЕСКИХ ДИФФУЗНЫХ ДАТЧИКАХ

Фотоэлектрические датчики широко применяются для бесконтактного обнаружения объектов в системах автоматизации и контроля. Датчики могут подвергаться воздействиям, которые снижают их надежность, в частности приводят к ложным регистрациям. Особенно опасны следующие факторы: вибрация, промышленный шум, запылённость, большое расстояние до контролируемого объекта [1, 2]. Эти факторы приводят к уменьшению отношения сигнал/шум (SNR) на входе устройства обработки оптического сигнала. Актуальным является развитие методов выделения сигналов, обусловленных отражением от контролируемого объекта, на фоне помех. Для снижения уровня помех в устройствах обработки в настоящее время используют цифровые сигнальные процессоры, согласованные фильтры, системы подавления фона. Вместе с тем известные методы подавления помех не охватывают весь круг эксплуатационных условий, в которых могут оказаться оптические датчики. Целью данной работы является разработка и исследование метода подавления фона, предназначенного для оптических датчиков диффузного типа.

Ложная регистрация произойдет в том случае, когда сигнал, связанный с обнаруживаемым объектом, сопровождается сопоставимым по величине сигналом, поступающим от другого объекта. Данная возможность реализуется в ситуации, когда коэффициент отражения от контролируемого объекта существенно меньше, чем коэффициент отражения от фоновой поверхности. В настоящей работе предложена конструкция датчика, которая не позволяет попадать в оптический приемник излучению, отраженного от удаленной фоновой поверхности. Вместе с тем излучение от близко расположенных объектов достигает фотоприемника, и именно оно формирует регистрирующий выходной сигнал.

Функция селекции расстояний до объекта и подавления фона реализована путем выбора углов отражения в некотором фиксированном интервале. Соответствующая конструкция датчика показано на рис. 1. В качестве фоточувствительного элемента могут быть использованы [3]:

- два фотодиода;
- устройство PSD (Position Sensing Detector) – детектор положения на базе сегментного фотодиода;
- датчики изображений: матрицы и линейки с КМОП или ПЗС структурой.

Изложенный метод был опробован на макете диффузного датчика, предназначенного для обнаружения объектов с коэффициентом отражения 6%, фоном для которых была поверхность с коэффициентом отражения 90%. Испытания показали высокую эффективность метода.

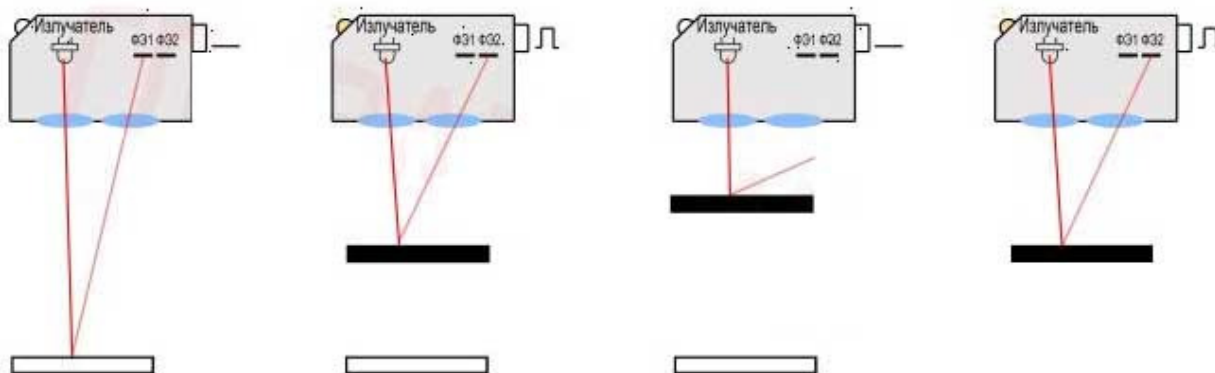


Рис. 1. Принцип работы датчиков с подавлением фона: фоточувствительный элемент реагирует на отражающий объект, находящийся только на определенном расстоянии

Стоит отметить и некоторые недостатки предложенного метода:

- усложнение и удорожание конструкции по сравнению с датчиками, оснащаемыми одним фотоприемником;
- увеличение габаритов;
- сложность обработки сигналов.

Вместе с тем для решения проблемы подавления фона можно использовать и другие подходы, например хороших результатов следует ожидать от метода синхронного детектирования [4]. В этом случае нет необходимости в усложнении оптической системы и связанной с ней конструкции датчика.

Список литературы

- [1] Сидоров А.И. Сенсорная фотоника. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2019. – 96 с.
- [2] Шаранов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С. Датчики: справочное пособие. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
- [3] Лысенко О. Фотоэлектрические датчики компании Sick AG //Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – М.:ИД. «Электроника». – С. 8–10.
- [4] Домбровский А.Н., Решетняк С.А. О стохастической фильтрации сигналов в нелинейных электрических системах //Радиотехника и электроника. – 2009. – Т.54, № 11. – С. 1369–1371.

Дмитриев Алексей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Lexaf18.97@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ RISC-V ПРОЦЕССОРА

При разработке процессорных ядер необходимо ввести метрику для оценки производительности, которая будет наиболее объективной в контексте предполагаемой сферы применения.

Для оценки производительности процессоров могут быть использованы различные метрики: количество операций в секунду (IPS и производные от него kIPS, MIPS и тд.), показатели теста Dhrystone (DMIPS), Whetstone и другие.

Из названных выше показателей, наиболее часто используется показатель DMIPS, вводимый тестом Dhrystone и разработанный в 1980-х годах. Данный тест имеет компактный размер, легко портируется на различные архитектуры, прост для понимания, бесплатен и предоставляет единое число, описывающее производительность [1]. Тем не менее современные компиляторы могут производить значительные оптимизации этого теста, из-за чего он уже плохо подходит для оценки производительности оборудования.

Чтобы исправить эти недостатки был разработан тест CoreMark, который использует значения, недоступные на момент компиляции, что предотвращает оптимизации и предварительный расчёт значений. Также, весь код, время исполнения которого измеряется, не содержит каких-либо вызовов к системным библиотекам.

Для оценки производительности CoreMark использует операции характерные для микроконтроллеров и встраиваемых систем. Так, он использует операции над матрицами (умножение на константу, вектор и другие матрицы), вычисление 16 битного CRC кода и операции с конечными автоматами [2].

Так как разрабатываемое процессорное ядро ориентированно на применение в составе микроконтроллеров и микросхем специального назначения (ASIC), то для анализа его производительности был выбран тест CoreMark, так как он может дать наиболее объективную оценку производительности для микроконтроллеров и встраиваемых систем.

Разрабатываемый процессор построен на архитектуре RISC-V и имеет базовый набор 32 битных команд (RV32I), реализованные в железе операции целочисленного умножения и деления (Расширение M), а также поддержку сжатых 16 битных команд (Расширение C) [3].

Для моделирования его работы и оценки производительности, была собрана система (рис. 1), состоящая из процессора, контроллера доступа к памяти (Арбитр), порта ввода-вывода (GPIO), универсального асинхронного приёмопередатчика (UART), блока часов реального времени (RTC), а также блоков оперативной (RAM) и постоянной памяти (FLASH).

При моделировании (рис. 2) использовался запуск теста CoreMark с 150 итерациями. Для хранения данных программы было выделено 2000 байт памяти, а для получения информации о времени начала и окончания тестирова-

ния использовался блок RTC. Вывод информации о результатах тестирования производительности процессорного ядра осуществлялся с помощью блока UART. Частота тактирования процессора составляла 10 МГц.

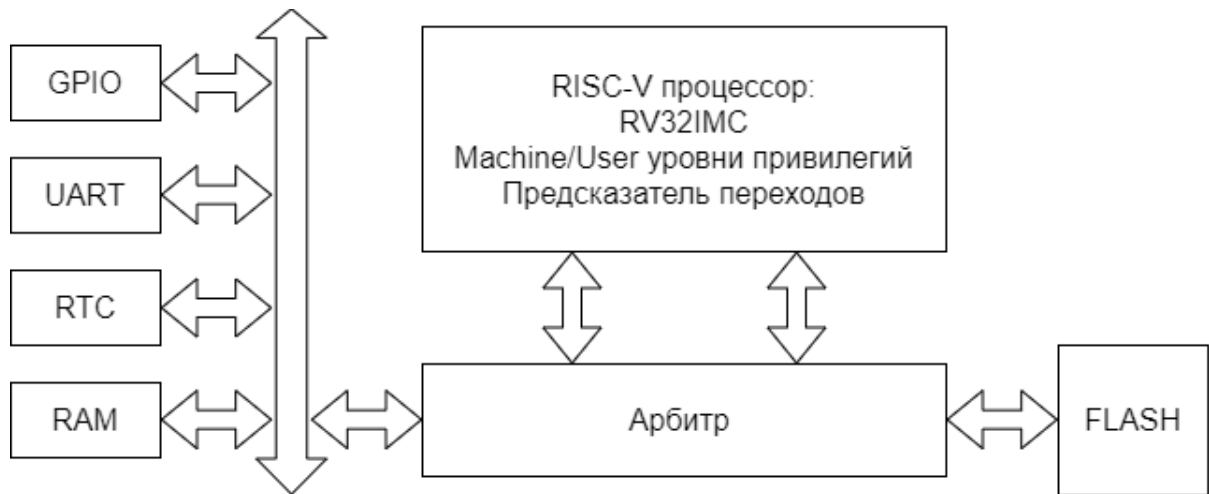


Рис. 1. Структурная схема системы для моделирования процессорного ядра

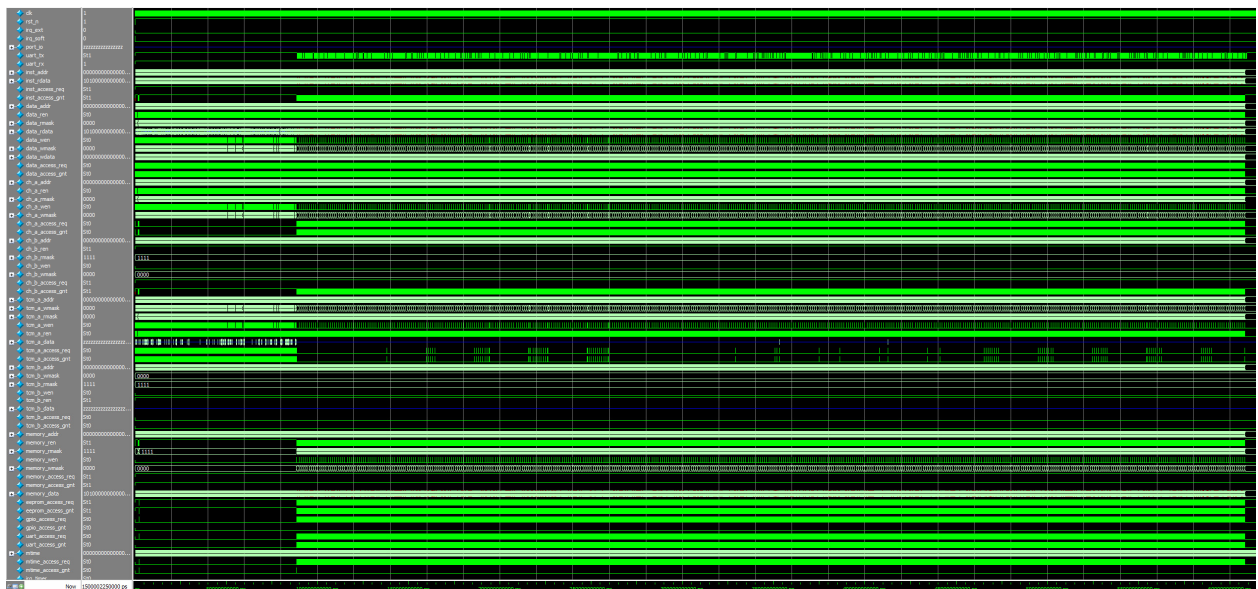


Рис. 2. Процесс моделирования процессора в ModelSim

В ходе проведения RTL моделирования системы, содержащей RISC-V процессор, в ПО ModelSim, были получены результаты оценки производительности разработанного процессора. В табл. 1 представлены полученные результаты, а также версия компилятора и флаги компиляции, использовавшиеся при создании прошивки.

В процессе моделирования было измерено значение выполняемых инструкций в секунду (MIPS - количество миллионов инструкций в секунду) составляющее 4,186 MIPS, а также нормированное по тактовой частоте процессора значение: 0,419 MIPS / МГц.

Для сравнения полученных результатов с другими процессорами и микроконтроллерами, были использованы данные с сайта бенчмарка CoreMark [4], а также данные RISC-V процессора Ibex RISC-V Core [5] и [6].

Таблица 2

Параметры компиляции и результаты тестирования

Компилятор и флаги компилятора	Время выполнения, с	Количество итераций	CoreMark	CoreMark / МГц
GCC10.2.0 -o3	12,94	150	11,59	1,16

В качестве параметра для сравнения было взято количество итераций CoreMark в секунду, нормированное по тактовой частоте (CoreMark / МГц). Полученная диаграмма представлена на рис. 3.

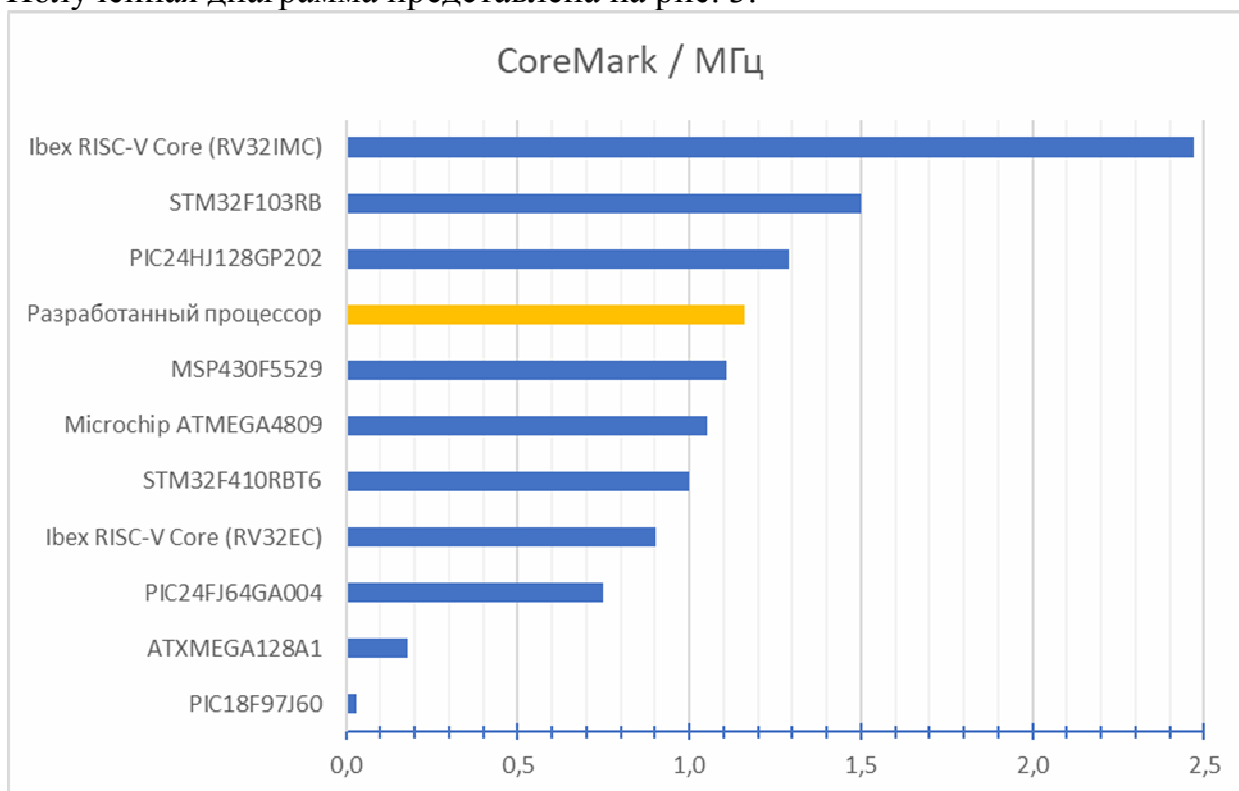


Рис. 3. Сравнительная характеристика различных процессоров и микроконтроллеров по параметру CoreMark / МГц

Как видно из представленных данных, разработанное процессорное ядро по параметру производительности CoreMark / МГц, сравнимо с микропроцессорами MSP430F5529 (Texas Instruments) и PIC24HJ128GP202 (Microchip Technology).

Для улучшения производительности процессора, можно произвести изменение различных функциональных блоков: ускорить проведение операций умножения и деления, использовать динамический предсказатель переходов и другие методы.

Тем не менее, это может привести к увеличению энергопотребления и площади, занимаемой процессором на кристалле. Поэтому любые улучшения производительности, должны быть тщательно проанализированы в контексте их влияния на другие параметры конструкции.

Список литературы

[1] R.P. Weicker, “Dhrystone: A Synthetic Systems Programming Benchmark,” Commun. ACM, vol.27, no.10, pp.1013–1030, Oct. 1984. <http://doi.acm.org/10.1145/358274.358283>

[2] Setup scripts and files needed to compile CoreMark on RISC-V. Available at: <https://github.com/eembc/coremark/> , accessed 05.04.2021

[3] The RISC-V instruction set architecture (ISA) specifications. Available at: <https://riscv.org/technical/specifications/> , accessed 05.04.2021

[4] CoreMark – EEMBC Embedded Microprocessor Benchmark Scores. Available at: <https://www.eembc.org/coremark/scores.php> , accessed 05.04.2021

[5] Ibex RISC-V Core. Available at: <https://github.com/lowRISC/ibex> , accessed 05.04.2021

[6] Miyazaki, Hiromu & Kanamori, Takuto & Islam, Ashraful & Kise, Kenji. (2020). RVCoreP: An Optimized RISC-V Soft Processor of Five-Stage Pipelining. IEICE Transactions on Information and Systems. E103.D. 2494-2503. 10.1587/transinf.2020PAP0015.

Корнев Сергей Александрович (Kornev S.A.) – студент ИУК1-11М, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: s.kornev.tov@gmail.com

Андреев Владимир Викторович (Andreev V.V.) – д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

Кондратов Д.А., Драч В.Е.

ОРИЕНТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИК ДАТЧИКА

Долгое время проблема ориентации летательных аппаратов решалась только с применением механических гироскопов – громоздких, тяжелых, трудоемких в изготовлении и настройке устройств. Зачастую обеспечиваемое такими устройствами время выбега оказывается недостаточным для продолжительного полета.

Развитие MEMS-технологии предоставило альтернативу в виде MEMS-гироскопов. Их достоинства – сверхмалые габариты и вес, неограниченное время работы, отсутствие необходимости в настройке, простое подключение к системе управления. Однако MEMS-гироскопы в течение своей работы накапливают ошибку, которую необходимо периодически сбрасывать при помощи другого устройства.

Сброс такой ошибки ориентации требует получения информации об ориентации летательного аппарата способом, отличным от механического: магнитным, оптическим, или термометрическим.

В первом случае датчик работает по магнитному полю Земли, не обладая при этом достаточной точностью, и не представляет интереса в рассматриваемой задаче.

Во втором случае используется анализ изображения с камеры, закрепленной на летательном аппарате, в ходе которого определяется наклон линии горизонта. Такой способ позволяет ориентировать летательный аппарат с высокой точностью, однако требует мощной вычислительной системы, способной обрабатывать алгоритм в реальном времени. Такой способ лучше всего подходит для летательных аппаратов, управляемых с земли, где обработка может проводиться на наземной станции по данным, полученным по каналу телеметрии (если позволяет его пропускная способность). В случае полностью автономного летательного аппарата размещение вычислительной системы возможно только на борту.

В третьем случае используется температурный контраст между направлениями надир и зенит, который возможно определить при помощи бесконтактных температурных датчиков, таких, как термпары или пироприемники [1].

Расположив два таких датчика по поперечной оси летательного аппарата, так, чтобы в поле зрения датчиков попадали как небо, так и земля, как показано на рис. 1, можно получить сигнал отклонения от горизонта, взяв разность выходных сигналов датчиков. Такая схема позволяет получать высокую точность при малых отклонениях, что и требуется для данной задачи.

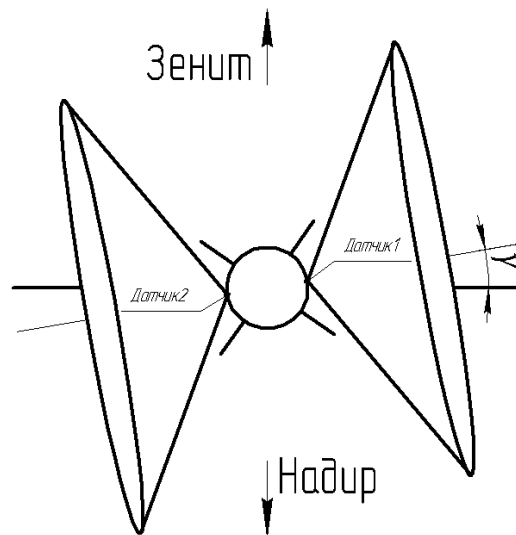


Рис. 1. Расположение датчиков на корпусе летательного аппарата

Структурная схема устройства приведена на рис. 2.

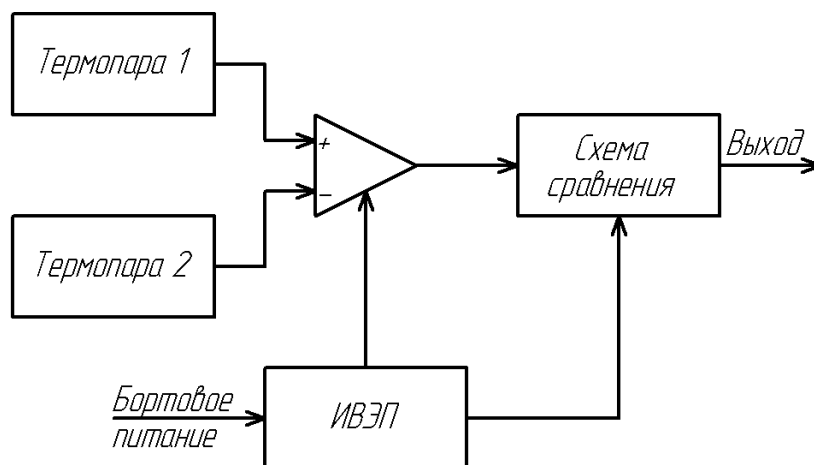


Рис. 2. Структурная схема датчика крена, работающего по тепловому контрасту

Принцип работы описываемого датчика крена основан на том факте, что в ИК диапазоне температура неба всегда меньше температуры поверхности Земли. Эта разница наиболее заметна в диапазоне 3..50мкм, где влияние излучения Солнца пренебрежительно мало, и может быть использована для определения отклонения системы координат аппарата от горизонта [2].

Рассмотрим геометрию датчика, как представлено на рис. 3. Термопара с заданной апертурой закреплена на борту аппарата, находящимся в центре единичной сферы. Экватор сферы представляет собой горизонт Земли, и БПЛА может отклоняться в любом направлении относительно сферы. Биссектриса поля зрения термопары образует с плоскостью горизонта угол γ_0 , представляющий собой комбинацию углов крена и тангажа аппарата:

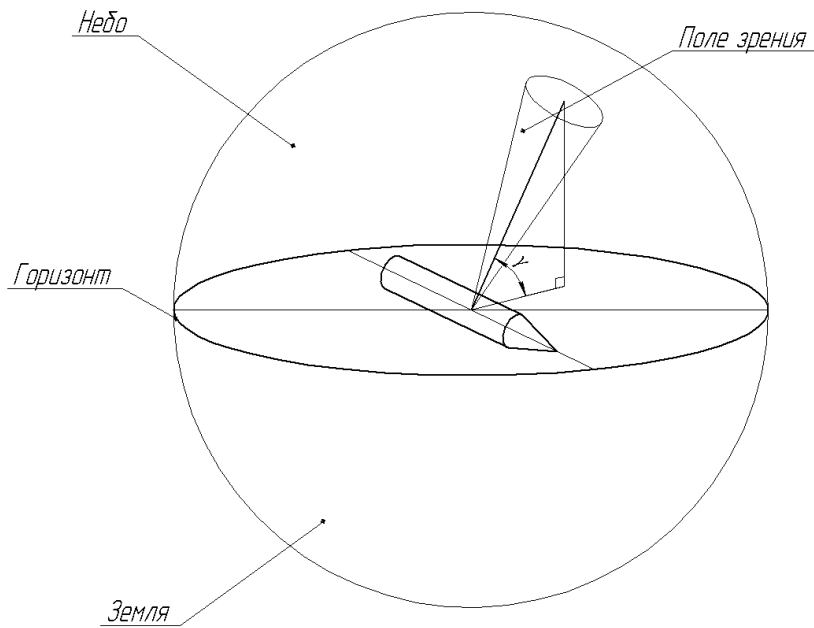


Рис. 3. Геометрия системы

Тепловой режим планеты, создаваемый поглощаемой солнечной энергией, характеризуется температурами порядка 200..300К. При таких температурах Земля излучает в спектральном диапазоне 3..50мкм с максимумом энергии в диапазоне 9..14мкм (такую длину волны имеют фотоны, излучаемые абсолютно черным телом с температурой $-65..+100$). Величина излученной энергии колеблется в пределах $0.2..0.5\text{ кал/см}^2$ и зависит от географического и вертикального распределения температуры, облаков и атмосферных газов (водяной пар, углекислый газ, озон и др.), поглощающих и излучающих длинноволновую радиацию.[3]

Поглощение инфракрасного излучения атмосферными газами представлено на рис. 4. Стоит отметить, что данная диаграмма справедлива для высот не более 3 км, на больших высотах, ввиду изменения концентраций поглощающих газов, картина меняется.

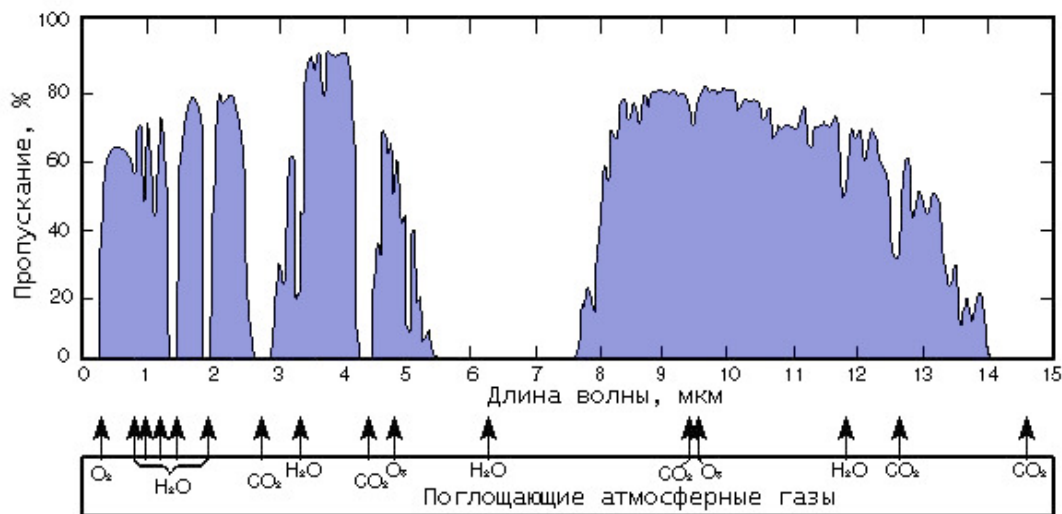


Рис. 4. Распределение пропускания атмосферными газами

Как видно из приведенной диграммы, диапазон 8..14мкм является окном, в котором обеспечивается наибольшая прозрачность атмосферы. Кроме того, удобство данного диапазона заключается в том, что на него приходится максимум излучения Земли, как отмечалось выше.

Входное оптическое окно для такой полосы пропускания, в случае использования термопары без встроенного фильтра, должно быть выполнено либо из кремния, либо из германия, поскольку остальные материалы ИК фильтров, такие как селенид цинка, пропускают излучение Солнца. Также, стоит отметить, что большинство таких материалов невозможно использовать при температурах выше 95.[4]

Список литературы

- [1] Р. Хадсон. Инфракрасные системы. Москва, изд. "Мир", 1972
- [2] Gregory Egan and Bernard Taylor. Characterisation of infrared sensors for absolute unmanned aerial vehicle attitude determination. Technical report, Monash University, Melbourne, Australia, 2007.
- [3] Jonathan Rogers and Mark Costello. A low-cost orientation estimator for smart projectiles using magnetometers and thermopiles. Journal of The Institute of Navigation, 59(1):9-24, 2012.
- [4] Jonathan Rogers, Mark Costello, and David Hepner. Roll orientation estimator for smart projectiles using thermopile sensors, Journal of Guidance, and Dynamics, 34(3): 688-697, 2011.

Кондратов Даниил Алексеевич (Kondratov D.A.) – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; АО «Восход» – КРЛЗ. E-mail: ivansusanin295@gmail.com

Драч Владимир Евгеньевич (Drach V. E.) – к.т.н., доцент, кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана; drach@kaluga.org

Дмитриев А.А., Шахтарин Д.С.

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Оптико-электронные системы (ОЭС) ИК диапазона успешно используются для обнаружения и определения координат источников или отражателей оптических излучений [1-4]. Эффективность таких систем существенно зависит от ряда факторов, связанных с условиями эксплуатации. Например, ОЭС может находиться вне помещения и не иметь защиты от попадания на фотоприемник солнечного света. Проблема минимизации влияния фонового излучения на характеристики фотоэлектрических детекторов является актуальной, и именно способ её решения часто определяет конструкцию всей ОЭС.

Характеристики медленно меняющегося шумового фона могут быть измерены путем кратковременного перекрытия канала, поставляющего сигнал от контролируемого объекта. Параметры фона затем можно учесть как статическую ошибку суммарного сигнала (рис.1)

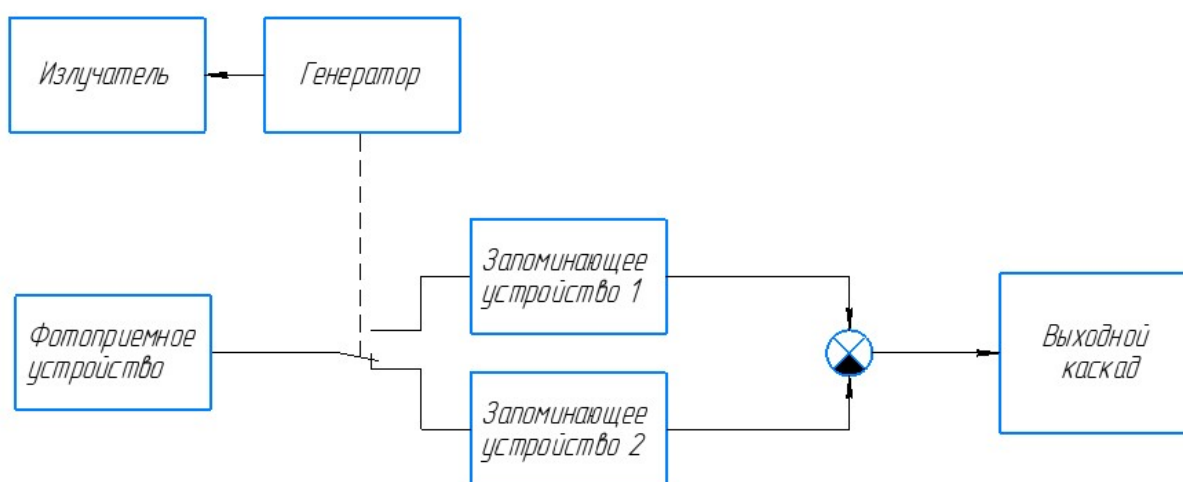


Рис. 1. Структурная схема фотоэлектрического датчика с возможностью учета статического фона

Такая схема хорошо справляется с постоянной фоновой засветкой, но практически не убирает другие виды помех и шумов.

Цель данной работы состояла в исследовании метода подавления фонового сигнала, основанного на использовании синхронного детектирования в ОЭС. Такой метод не требует усложнения оптической части системы и вместе с тем увеличивает вероятность обнаружения объекта.

Синхронным детектированием называется амплитудное детектирование ВЧ или НЧ колебаний, основанное на перемножении напряжений, поступающих от источника сигнала и от источника опорного напряжения. Далее с

помощью низкочастотного фильтра выделяется постоянная составляющая. Значение этой постоянной составляющей будет максимальным тогда, когда перемножаемые напряжения имеют одинаковые частоты и фазы. Схема метода представлена на рис. 2.

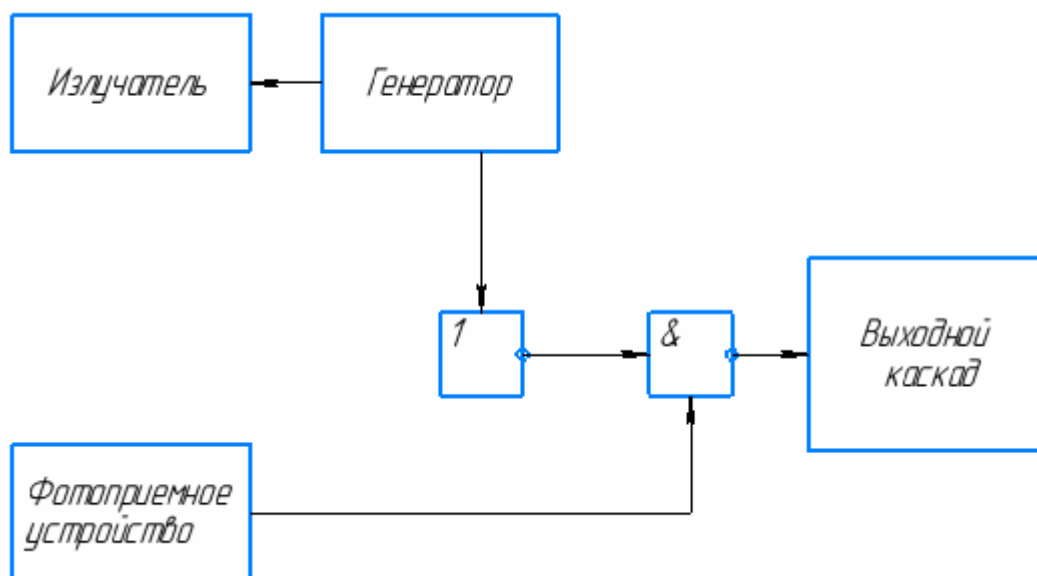


Рис. 2. Структурная схема датчика с синхронным детектором

Генератор прямоугольных импульсов используется для модулирования ИК-потока, освещающего контролируемый объект (излучатель), и одновременно является источником опорного напряжения. В качестве синхронного детектора использован логический элемент «И-НЕ». В такой схеме детектирования сигнал, связанный с фоновой засветкой, при перемножении с опорным сигналом не имеет постоянной составляющей. Также постоянная составляющая отсутствует у всех сигналов, не совпадающих с опорным напряжением по частоте или имеющих случайную фазу. Датчик срабатывает только при поступлении сигнала, модулированного генератором, и этим поставщиком является контролируемый объект. Таким образом, метод синхронного детектирования позволяет избавиться как от фоновой засветки, так и от случайных шумов и периодических электромагнитных наводок.

Качество выходного сигнала можно улучшить, применив синусоидальную модуляцию. Однако в этом случае возрастает сложность схемы перемножения сигналов. Оптимальным схемотехническим решением является синхронное детектирование с использованием периодической последовательности прямоугольных импульсов.

Список литературы

[1] Домбровский А.Н., Решетняк С.А. О стохастической фильтрации сигналов в нелинейных электрических системах //Радиотехника и электроника. – 2009. – Т.54, № 11. – С. 1369–1371.

[2] Лысенко О. Фотоэлектрические датчики компании Sick AG //Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – М.:ИД. «Электроника». – С. 8–10.

[3] *Сидоров А.И.* Сенсорная фотоника. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2019. – 96 с.

[4] *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т.2.: Москва «Мир», 1983. – 216 с.

Дмитриев Алексей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Lexaf18.97@yandex.ru

Шахтарин Денис Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: denshifu@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ТРЁХФАЗНОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО МОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА БЕЗ СЕРДЕЧНИКОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Аннотация

В работе предложена конструкция плоского аксиального синхронного мотора на постоянных магнитах. Рассмотрено применение разработанного двигателя в системах жизнеобеспечения. Проведено компьютерное моделирование конструкции электродвигателя, а также сконструирован макетный образец. Проведены испытания предложенного двигателя с полезной нагрузкой.

Ключевые слова

Электродвигатель, аксиальный, плоский, синхронный, бесколлекторный, электродвигатель, магниты.

Введение

В различных системах жизнеобеспечения, таких как вентиляция и системы очистки воды широко используются синхронные бесколлекторные моторы [1]. Зачастую такие системы должны обладать герметичными свойствами. Однако, в конструкциях данных установок в силу накладываемых ограничений, приходится использовать электродвигатели, компоновка которых не является оптимальной для герметичных изделий.

Практическая ценность

В работе предлагается упрощённая аксиальная конструкция электродвигателя на постоянных магнитах [3]. Статор состоит из девяти катушек, соединённых в звезду, трёх датчиков холла и подшипника, запрессованного на внешней части (рис. 1). Ротор представляет собой сборку из шести постоянных магнитов и запрессованного подшипника (рис. 2).

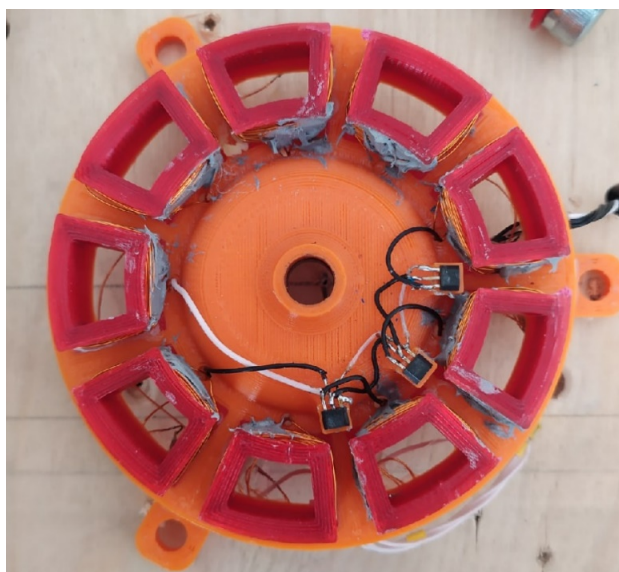


Рис. 1. Статор

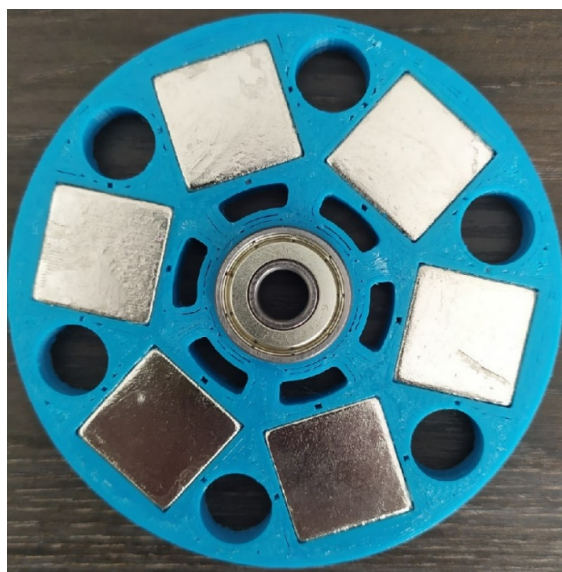


Рис. 2. Ротор

Крепление ротора на статоре осуществляется при помощи двух шайб, болта и гайки. Также на роторе установлена полезная нагрузка. В качестве полезной нагрузки в работе использовался пропеллер (рис. 3) или крыльчатка турбины (рис. 4).

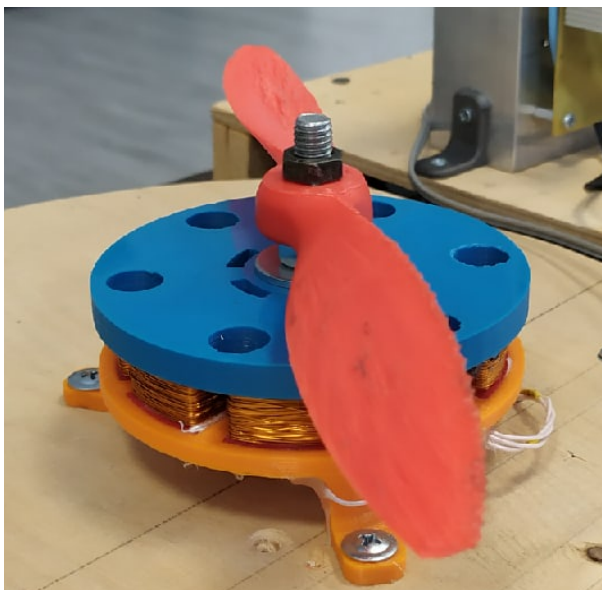


Рис. 3. Мотор с пропеллером

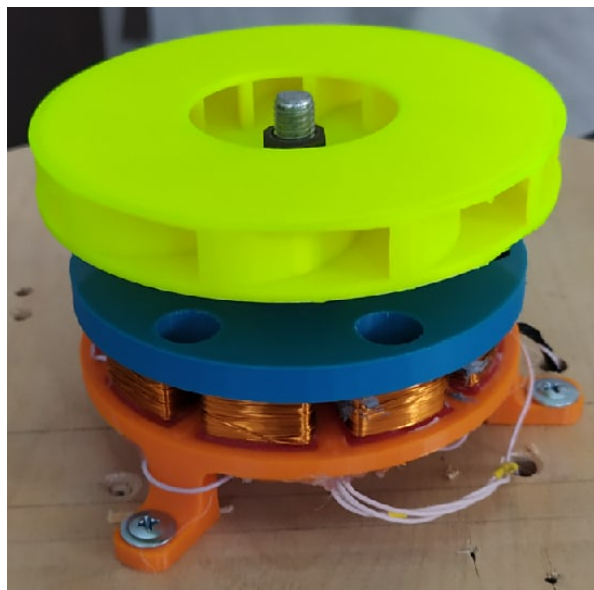


Рис. 4. Мотор с крыльчаткой

Необходимо отметить, что полезная нагрузка может быть частью самого ротора. Например, крыльчатку турбины можно изготовить прямо на роторе, а каналы для центробежной сепарации фрезеровать на наружной поверхности. Такая конструкция отличается простотой и экономичностью.

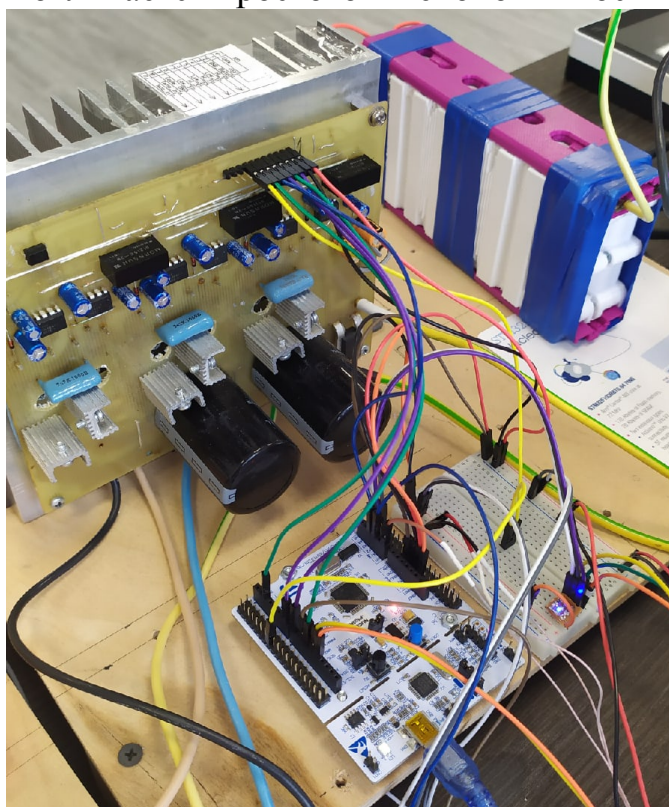


Рис. 5. Драйвер электродвигателя

Для увеличения экономичности катушки статора изготовлены без сердечников. Так в них не наводятся вихревые токи и уменьшается вес конструкции. С целью полной герметизации возможны следующие изменения:

1. Замена стального болта на фторопластовый;
2. Замена стальных подшипников на керамические.

Для проведения испытаний была сконструирована экспериментальная установка [5], состоящая из электродвигателя, аккумулятора, микроконтроллера, датчиков тока и драйвера электродвигателя (рис. 5). С помощью установки был исследован процесс пуска электродвигателя [4], снабжённого нагрузкой (рис. 4).

В результате проведённых испытаний [2] были получены диаграммы фазных токов и тока потребления в момент пуска и последующего увеличения скорости вращения электродвигателя (рис. 6, 7).

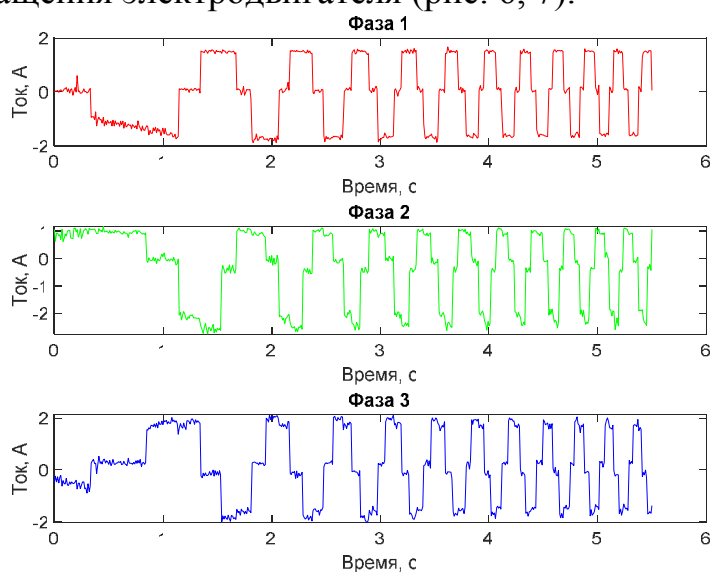


Рис. 6. Диаграмма токов в фазах

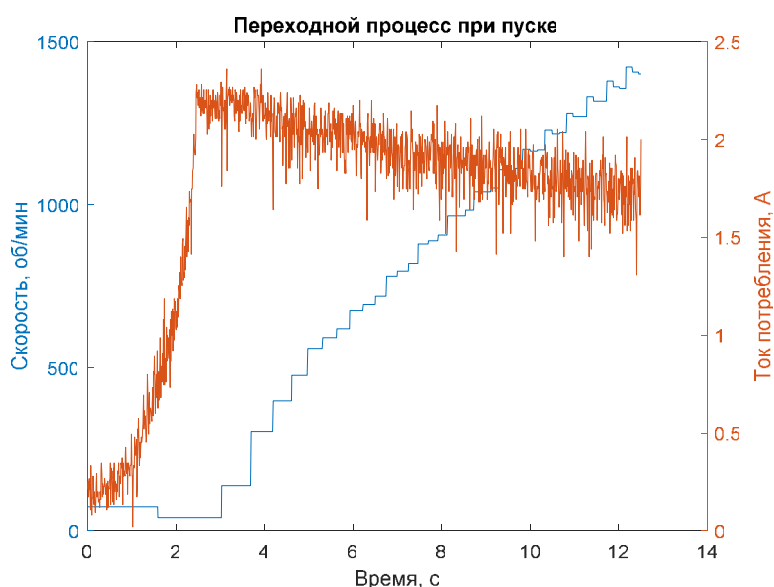


Рис. 7. Общий ток потребления и скорость вращения ротора

Выводы

В работе предложена конструкция аксиального трёхфазного бесколлекторного синхронного мотора. Для её апробации был спроектирован макетный образец, с помощью которого были получены и проанализированы осциллограммы фазных токов и тока потребления в момент пуска и последующего увеличения скорости вращения электродвигателя.

Список литературы

[1]. *Мещеряков В.Н.* Синхронные машины : учебное пособие / В.Н. Мещеряков, Д. И. Шишлин. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. – 105 с. – ISBN 978-5-88247-606-8. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/22934.html> – Режим доступа: для авторизир. Пользователей

[2]. *Мокий М.С.* Методология научных исследований [Текст]: учебник / М.С. Мокий, А.Л. Никифоров, В.С. Мокий. - М.: Юрайт, 2015. - 255 с.

[3]. *Орлов М.А.* Азбука ТРИЗ. Основы изобретательского мышления [Текст]: учебник / М.А.Орлов.–М.: СОЛОН-Пресс, 2016.–208с.:ил.

[4]. *Шкляр М.Ф.* Основы научных исследований [Электронный ресурс]: учебное пособие. –М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2017. – 208 с.: URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=450782>

[5]. *Шпиганович А.Н.* Испытания пускорегулирующей, защитной аппаратуры и схем управления электродвигателями : методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт электрооборудования» / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. – 16 с. – ISBN 2227-8397. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/22957.html> – Режим доступа: для авторизир. пользователей

Власовский Алексей Игоревич – магистрант, бакалавр АО ОКБ "МЭЛ". E-mail: tfzmystery6@gmail.com

Мануйлов Александр Владимирович – начальник ОКТ АО ОКБ "МЭЛ". E-mail: a.v.manuylov@gmail.com

Масюк Владимир Михайлович – инженер-конструктор, канд. физ.-мат. наук АО ОКБ "МЭЛ". E-mail: masyuk77@gmail.com

Андреев Дмитрий Владимирович – доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru

Пазенко И.А., Андреев Д.В.

РАЗРАБОТКА ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДАХ

Для эффективного противодействия лазерным системам наведения, целеуказания, дальнометрирования возникает необходимость разработки и модернизации станций обнаружения излучений. Основным элементом подобных систем, во многом определяющим их технические характеристики и возможности, а также полностью формирующие рабочий диапазон длин волн, является фотоприемное устройство (ФПУ). ФПУ принимает оптическое излучение, преобразует его в электрический сигнал, осуществляет усиление и, при необходимости, преобразование формы, а затем передает сигнал на следующее за ним пороговое устройство. При этом создание подобных ФПУ связано со множеством технических сложностей, вызванных как априорной неопределенностью параметров поступающих сигналов, так и требованиями к обеспечению высоких технических характеристик во всем рабочем диапазоне длин волн. При создании такого рода оптико-электронных устройств приходится решать противоречивые задачи. Для получения высоких показателей чувствительности ФПУ должно обладать минимальным уровнем собственных шумов и при этом работать с короткими импульсными сигналами, длительность которых может меняться более чем на порядок, в условиях сложной помеховой и фоновой обстановки. Учитывая объект установки, зачастую требуется максимальное снижение массы и энергопотребления при сохранении количества каналов и высокой обнаружительной способности.

Целью данной работы является разработка приемника импульсов лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазона на основе кремниевых фотодиодов.

ФПУ состоит из 4-х одинаковых фотоприемных каналов. В качестве приемников излучения в каждом канале последовательно включены фотодиоды. Подобная схема включения позволяет формировать в одном канале полезные сигналы положительной и отрицательной полярности (так называемый «№+» и «№-») в зависимости от засвечиваемого фотодиода. Также последовательное включение фотодиодов позволяет частично компенсировать фоновые токи, возникающие от внешних источников помех (например, фоновая солнечная засветка) и расширить динамический диапазон работы устройства. Принципиальная схема ФПУ изображена на рис.1.

Для исключения влияния на работу прибора фоновых токов, как постоянных, так и модулированных низкой частотой, служит устройство компенсации фоновой засветки [2]. Данная схема позволяет компенсировать фоновые токи и поддерживать постоянный уровень смещения на фотодиодах. Для снижения шумового вклада от устройства компенсации оно выполнено на базе операционного усилителя 744УД1, обладающего низким уровнем собст-

венных шумов и высоким входным сопротивлением, что позволяет исключить его влияние на работу дальнейшей схемы.

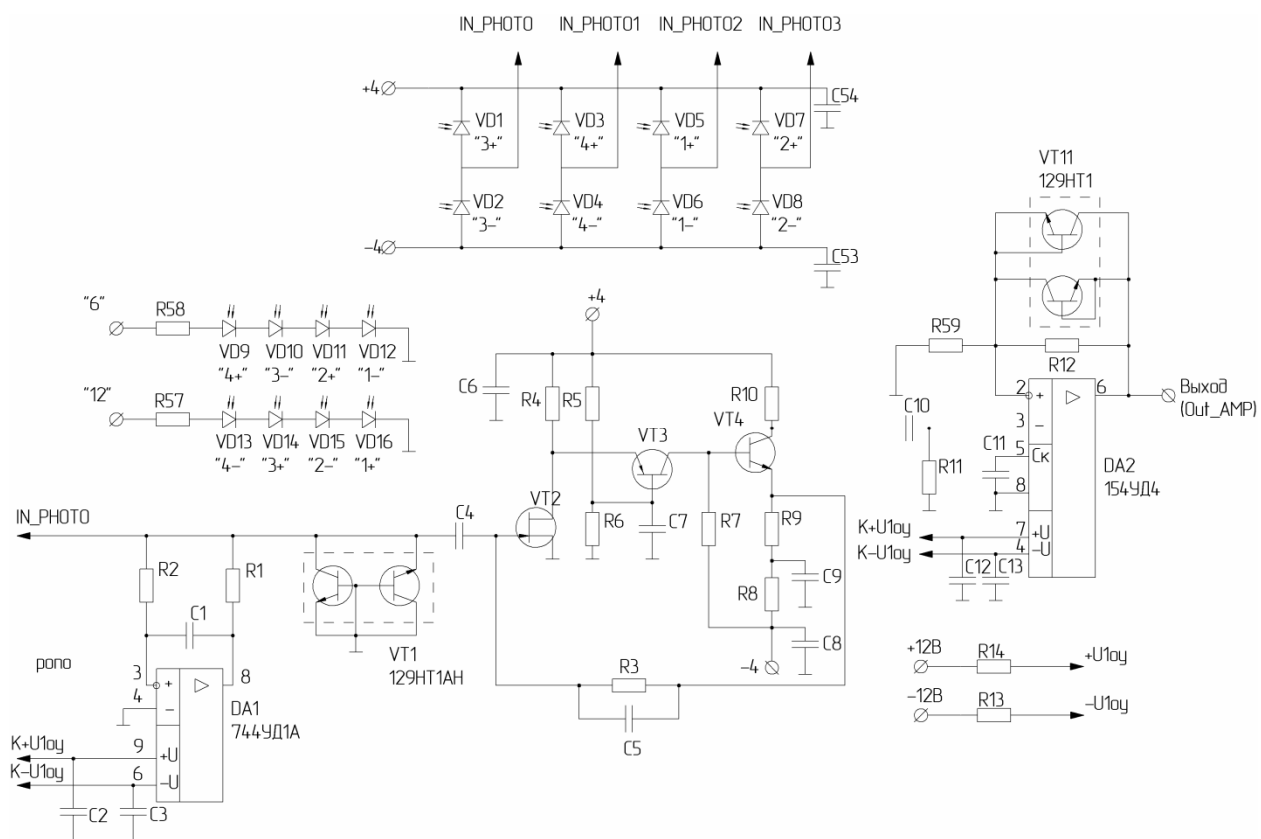


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная ФПУ

Принимаемый импульсный оптический сигнал преобразуется фотодиодом в импульс тока, который поступает на вход малошумящего усилителя-преобразователя ток-напряжение. Здесь происходит усиление сигнала по току и преобразование в импульс напряжения. Данный каскад представляет собой усилитель с параллельной отрицательной обратной связью по току. Преимуществом такого решения является низкое входное сопротивление, высокое быстродействие. Применение в качестве входного GaAs полевого транзистора позволяет снизить шум каскада. [2]

Для увеличения отношения сигнал/шум принятые импульсы проходят через фильтр, совмещенный с усилительными секциями.

Предварительно усиленный сигнал поступает на усилитель напряжения, выполненный на базе широкополосного операционного усилителя. Данный каскад дополнительно усиливает сигнал приводя чувствительность к требуемой.

В результате проектирования получены следующие параметры:

- Питание $\pm 4\text{В}$ и $\pm 12\text{В}$;
- По цепи $+4\text{В}$ не более 150мА
- По цепи -4В не более 50В ;
- По цепям $\pm 12\text{В}$ не более 50мА .
- Амплитуда выходного сигнала не превышает по модулю 4В .

- Длительность выходного сигнала не менее 90нс.
- Время затухания переходного процесса до уровня 20мВ не более 30мкс.

– Выходное сопротивление ФПУ не превышает 200 Ом.

Результаты моделирования схемы представлены на рисунках 3-6:

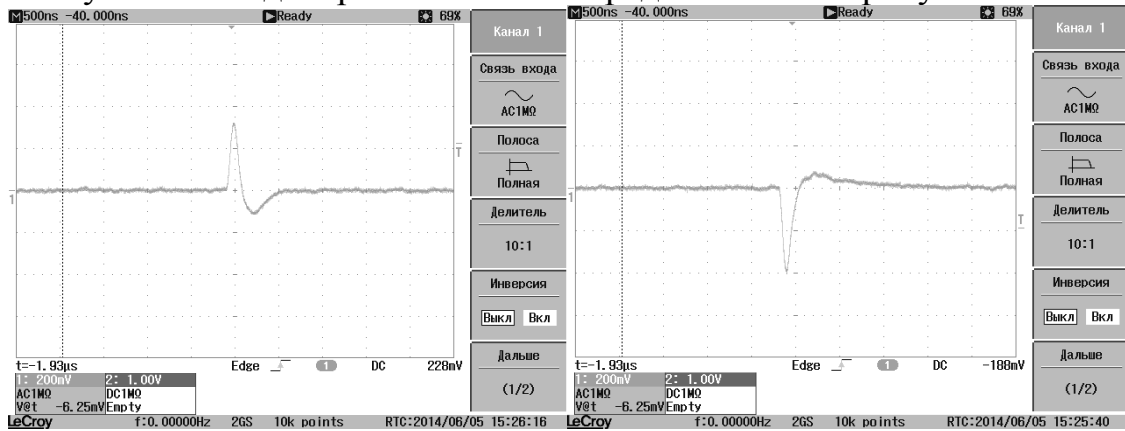


Рис. 3. Сигнал на выходе 1-го канала

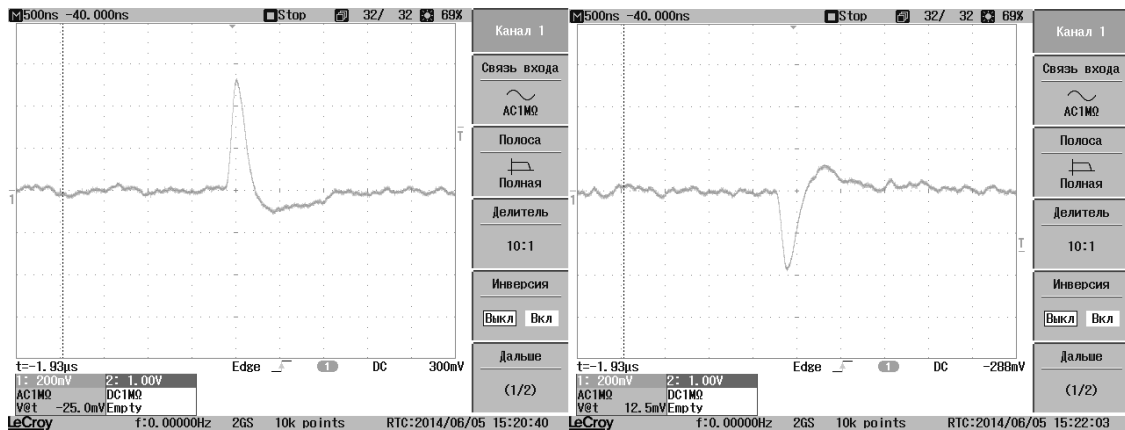


Рис. 4. Сигнал на выходе 2-го канала

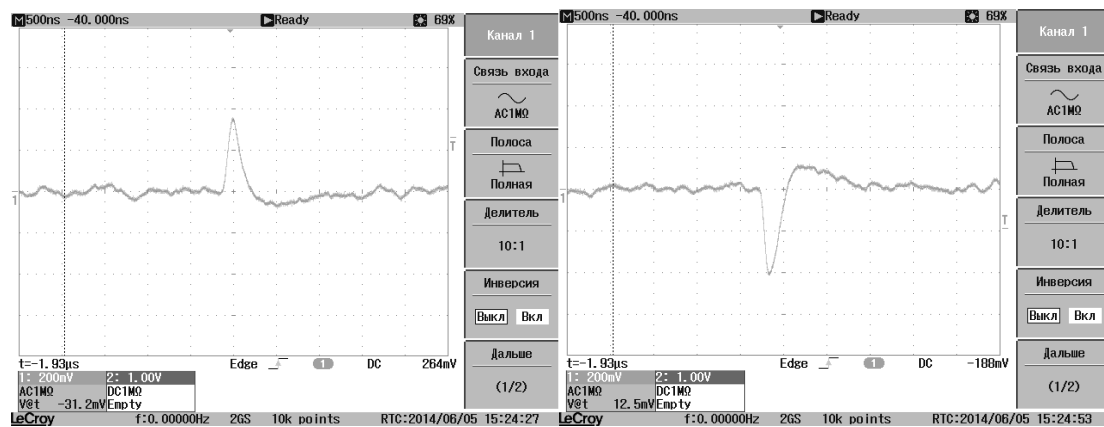


Рис. 5. Сигнал на выходе 3-го канала

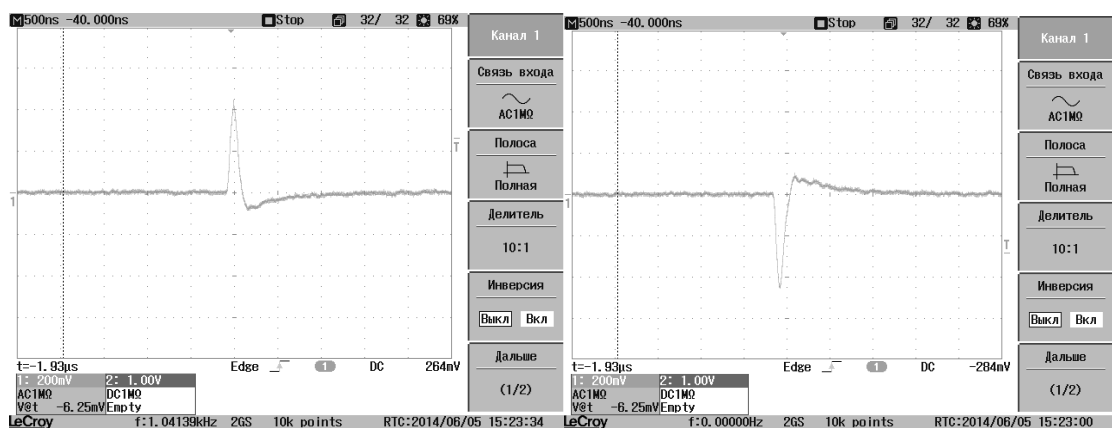


Рис. 6. Сигнал на выходе 4-го канала

Данные тока потребления по цепям питания при отражены в табл. 1:

Таблица 1.

Ток потребления по цепям питания.

+4В	120мА	+12В	20мА
-4В	20мА	-12В	20мА

В результате выполненной работы было проведено проектирование схемы фотоприемного устройства на основе кремниевых фотодиодов, а также последующее моделирование полученной схемы в САПР.

Список литературы

[1]. Шалимова К.В. Физика полупроводников : учебник / К. В. Шалимова. – 4-е изд., стер. – СПб: Лань, 2021. – 384 с. – ISBN 978-5-8114-0922-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/167840> (дата обращения: 08.04.2021).

[2]. Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников : учебное пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 336 с. – ISBN 978-5-9221-1005-1. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/2371> (дата обращения: 08.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

Пазенко Иван Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: pazenkoivan@yandex.ru

Андреев Дмитрий Владимирович – доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru

ТРАНЗИСТОРЫ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА

В данной работе рассматривается конструкция биполярных транзисторов, разработанных для использования в интегральной микросхеме магистрального приемника. Микросхема предназначена для приема цифровой информации с линии связи. Работоспособность микросхемы обеспечивается в диапазоне изменения

- напряжения питания от 4,5 до 5,5 В,
- входного напряжения низкого уровня от 0 до 1,2 В,
- входного напряжения высокого уровня от 2,7 до 4,5 В,
- при выходном токе для состояния низкого уровня на выходе от 0 до 8,0 мА
- выходном токе для состояния высокого уровня на выходе от 0 до минус 0,4 мА.

Микросхема выполнена по биполярной технологии на вертикальных п-р-п транзисторах и п-р-п транзисторах с диодом Шоттки. Разработанные транзисторы имеют небольшое отношение глубины к площади эмиттера, высоколегированный эмиттер, высокое удельное поверхностное сопротивление базы. Наличие скрытого слоя (низкоомного коллектора) в предлагаемых транзисторах позволяет им работать при высоких плотностях коллекторного тока, что необходимо для обеспечения параметров разработанной микросхемы.

Структура биполярных п-р-п транзисторов в разработанной микросхеме представлена на рис. 1, а параметры полупроводникового кристалла приведены в табл. 1.

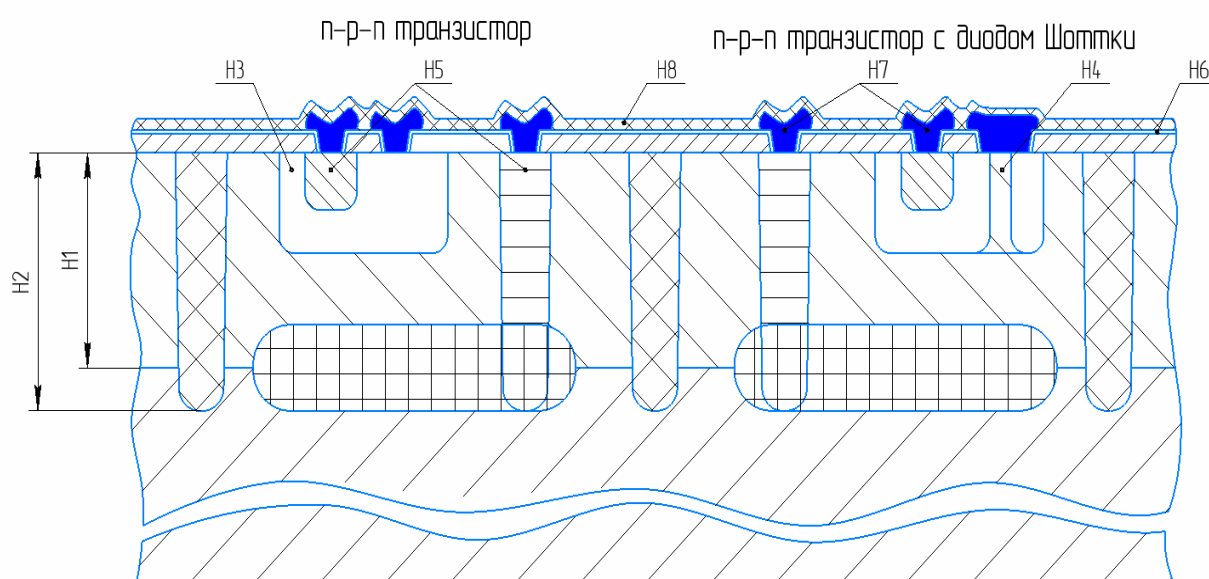


Рис. 1. Структура биполярных п-р-п транзисторов

Параметры диффузионных областей и пленочных элементов биполярных п-р-п транзисторов в кристалле интегральной микросхемы

Наименование элементов структуры	Условное обозначение	Тип проводимости	Толщина окисных слоев, мкм	Сопротивление слоя, Ом/кв	Глубина диффузии, мкм
Области разделения, легированные бором	H2	P+	0,7±0,1	6±4	6,5
Области базы, легированные бором	H3	p	0,5±0,1	180±10	-
Окна в базе для диода Шотки	H4	-	-	-	-
Области эмиттера, легированные фосфором	H5	n+	0,3±0,1	5-7	2,05±0,2
Области коллектора, легированные фосфором	>H2	n+	-	3-7	6,5
Области нитрида кремния	H6	-	-	-	0,05±0,01
Области контактных окон	-	-	-	-	-
Контактные площадки и проводники из алюминия	H7	-	-	0,005	1,2±0,1
Области защитного окисла	H8	-	-	-	0,8±2

Примечание: H1-обозначение толщины эпитаксиального слоя

Биполярные п–р–п транзисторы, как правило, формируются в кремниевом эпитаксиальном слое с относительно высоким удельным сопротивлением [1].

H2 – легирование бором служит для совмещения разделительной диффузии с областью р⁺ – скрытого слоя сопротивлением 160 – 500 Ом/кв, а также обеспечивает снижение сопротивления коллектора п-р-п вертикального транзистора). Области базы и эмиттера выполняются с помощью последовательных операций диффузии.

Назначение эпитаксиального слоя – формирование слаболегированной коллекторной области, необходимой для обеспечения высоких значений пробивных напряжений коллектор–база [2].

Одновременно для снижения сопротивления коллектора в подложке формируется скрытый слой сильнолегированного кремния n⁺ – типа (как

правило, легированием сурьмой). Включение в транзисторную структуру скрытого слоя снижает сопротивление коллектора с нескольких кОм до нескольких сотен Ом. Для еще большего снижения сопротивления коллектора диффузией примеси n^+ – типа (фосфор) формируется, так называемая область глубокого коллектора, достигающая n^+ – скрытого слоя. Это позволяет снизить последовательное сопротивление коллектора до 10 Ом. Область разделительной диффузии также должна соединиться с областью p^+ – скрытого слоя сопротивлением 200 – 500 Ом/ , формируемой в подложке легированном бором, (это также обеспечивает снижение сопротивления коллектора n - p - n вертикального транзистора). Области базы и эмиттера выполняются с помощью последовательных операций диффузии.

Изготовление биполярной ИМС осуществляют в следующей последовательности:

- формирование партии пластин монокристаллического кремния марки КДБ10 ориентации $\langle 111 \rangle$ с удельным сопротивлением 10 Ом \times см (на данном этапе на пластины лазерным маркировщиком наносят номер партии и номер пластины);

- химическая обработка пластин, термическое окисление, фотолитография « n^+ – скрытый слой», травление окисла, ионное легирование сурьмой, термообработка, удаление слоя SiO_2 химическим травлением, термическое окисление;

- фотолитография « p^+ – скрытый слой», ионное легирование бором, отжиг p^+ скрытого слоя в окислительной среде;

- удаление слоя SiO_2 химическим травлением, наращивание эпитаксиального слоя n типа;

- термическое окисление, фотолитография «Глубокий коллектор», травление SiO_2 до Si , диффузия фосфора (загонка), разгонка фосфора в окислительной среде;

- фотолитография «Разделение», травление SiO_2 до Si , диффузия бора(загонка), разгонка бора в окислительной среде, контроль качества разделения измерением ВАХ;

- фотолитография «База», травление SiO_2 до Si , ионное легирование бором и разгонка бора в окислительной среде, контроль ВАХ;

- фотолитография «Эмиттер», диффузия фосфора (загонка), разгонка фосфора в окислительной среде, контроль ВАХ;

- осаждение слоя ПКК, ионное легирование фосфором, отжиг, фотолитография «Резистор», плазмохимическое травление (ПХТ) слоя ПКК;

- окисление, фотолитография «Дополнительные контакты», травление SiO_2 до Si (вскрытие окон к диффузионным областям и под конденсатор), осаждение слоя Si_3N_4 ;

- фотолитография «Контакты», ПХТ слоя Si_3N_4 ;

- напыление плёнки сплава Al с Si , выполняется фотолитография «Металл», травление металла.

На заключительных стадиях изготовления осуществляют контроль вольт–амперной характеристики (ВАХ) тестовых элементов схемы и функциональный контроль изготовленных кристаллов ИМС.

Таким образом в данной работе были разработаны два типа биполярных вертикальных n-p-n транзисторов – без и с диодом Шоттки. Разработанные транзисторы имеют небольшое отношение глубины к площади эмиттера, высоколегированный эмиттер, высокое удельное поверхностное сопротивление базы. Наличие скрытого слоя (низкоомного коллектора) в предлагаемых транзисторах позволяет им работать при высоких плотностях коллекторного тока, что необходимо для обеспечения параметров разработанной микросхемы.

Список литературы

[1] *Свистова Т.В.* Основы микроэлектроники: учеб. пособие [Электронный ресурс]. - Электрон. текстовые и граф. данные (2,6 Мб) / Т.В. Свистова. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017

[2] *Хоровиц п., Хилл У.* Искусство схемотехники: Пер. с англ. - Изд. 2-е. - М.: Издательство БИНОМ 2014. - 704 с.

Голубков Константин Геннадьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: klgkostian@yandex.ru

Андреев Владимир Викторович – профессор, д-р техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

СЕКЦИЯ 4.

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ГИДРОМАШИНЫ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ БАНДАЖА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНИ

Повышение эффективности работы любой турбины во многом определяется улучшением аэродинамики ее проточной части. Для этого применяются различные методы профилирования лопаточного аппарата турбины и профилирование меридиональных обводов проточной части [1]. Вид и форма бандажей рабочих решеток во многом определяет плавность меридионального обвода, аэродинамические потери и потери от утечек. Также конструкция бандажа определяет вибрационную прочность и напряжения в рабочих лопатках [2]. В статье [3] авторами были рассмотрены несколько вариантов конструкции бандажей и проведен их прочностной и вибрационный анализ.

В данной работе исследовались аэродинамические характеристики ступени турбины с интегральным бандажом двух конструкций: цилиндрической и конической формы. Модели ступени турбины с такими вариантами бандажей и одинаковыми профилями лопаточного аппарата были построены и исследованы в среде ANSYS.

В программном модуле CFX проведено моделирование течения в ступени при заданных параметрах пара (P_0 , T_0) на входе в ступень и давлении (P_2) на выходе. Получены данные по пространственному распределению давлений и скоростей в решетках. Линии тока в межлопаточных каналах при различных типах бандажа представлены на рис. 1.

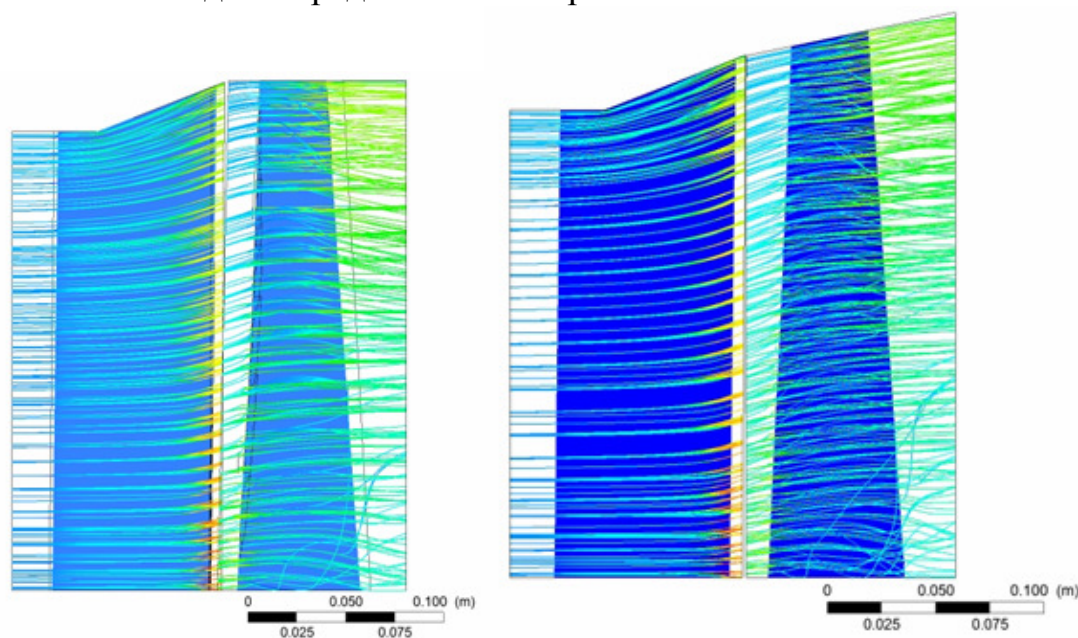


Рис. 1. Линии тока в ступени турбины при различных типах интегрального бандажа

При моделировании также определены интегральные характеристики ступени турбины. Основные характеристики ступени при рассмотренных вариантах бандажа рабочей решетки сведены в табл. 1.

Полученные характеристики сравнивались с результатами расчетов, полученных по классической методике [1, 4] с одномерной моделью ступени. Одномерный расчет показал завышенный на 1,9% внутренний КПД ступени, так как такой расчет не в полной мере учитывает дополнительные потери, связанные с обтеканием бандажа.

Таблица 1.

Основные характеристики ступени

Параметр	Вариант 1 (цилиндрический бандаж)	Вариант 2 (конический бандаж)
Расход пара, кг/с	79,24	79,53
Энтальпия пара на входе в СА, кДж/кг	2666	2666
Использованный теплоперепад ступени, кДж/кг	63	65
Мощность ступени, МВт	4,95	5,08
КПД ступени	0,86	0,88

Моделирование показало, что конструкция бандажа существенно влияет на характеристики ступени. Условия обтекания периферийного меридионального обвода при переходе от цилиндрического к коническому бандажу улучшились. Применение конического бандажа в рабочей решетке, вместо цилиндрического, приводит к увеличению КПД ступени примерно на 2,1%, при этом ее мощность возросла на 130 кВт.

Из полученных результатов моделирования видно, что применение конического интегрального бандажа может быть рекомендовано при проектировании высокоэффективных ступеней турбины.

Список литературы

- [1] Щегляев А.В. «Паровые турбины», т. 1, т. 2, 1993.
- [2] Киселев Р.С. Анализ влияния конструкции бандажа на прочностные и вибрационные характеристики пакета лопаток ЧНД турбины / Р.С. Киселев, А.А. Жинов. // Региональная научно-техническая конференция 2020.
- [3] Жирицкий Г.С. «Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин» М.: 1968г, 517с.
- [4] Жинов А.А. «Комплекс программ для расчета осевой паровой турбины по среднему диаметру», 1997.

Роман Сергеевич Киселев – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antropogen1997@yandex.ru

Жинов Андрей Александрович – к.т.н., заведующий кафедрой «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: azhinov@bmstu.ru

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВОГО НАГНЕТАТЕЛЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

В промышленности широко применяются вихревые насосы и компрессоры с рабочим процессом, основанным на вихревом взаимодействии жидкости в рабочем колесе и боковом кольцевом канале [1]. Объектом исследования является вихревая гидромашина, имеющая ротор в виде цилиндрического барабана, на внешней поверхности которого выполнены глухие отверстия, и неподвижная винтовая решетка на периферии [2]. Такая машина может использоваться в качестве насоса, компрессора или нагрузочного устройства.

На рис. 1 представлена схема вихревой гидромашины с цилиндрическим ротором.

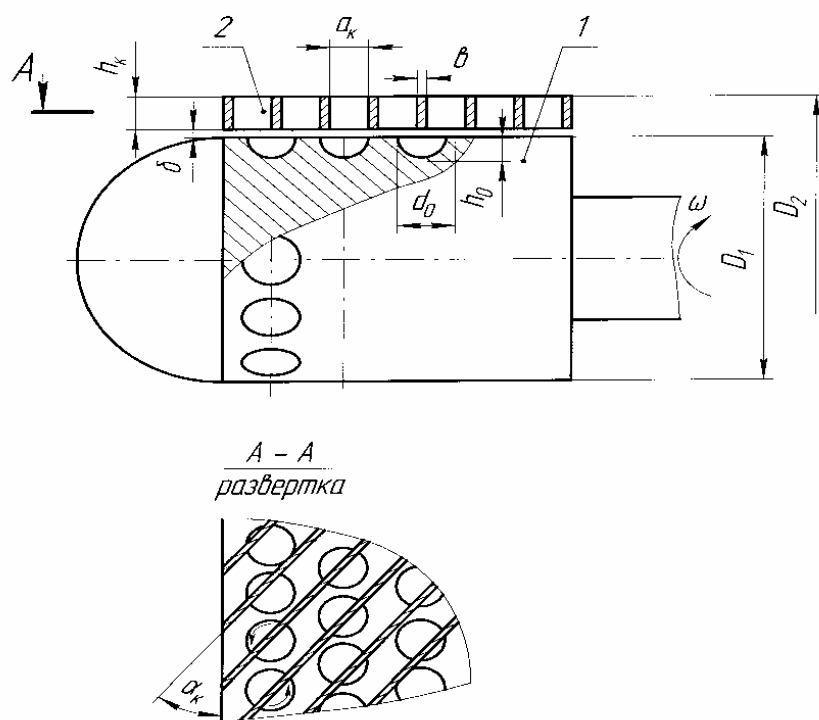


Рис. 1. Схема вихревой гидромашины с цилиндрическим ротором и неподвижными винтовыми каналами:

1 – цилиндрический барабан; 2 – винтовые каналы

При вращении ротора под действием центробежных сил и воздействия винтовой решетки на поток в глухих отверстиях ротора возникают вихри, показанные на рис. 2 стрелками. Вихри распространяются в каналы решетки и перемещают находящуюся там жидкость от входа к выходу. Основной поток перемещается по неподвижным каналам, в отличие от осевихревого насоса [3], у которого поток движется по каналам шнека. Упрощенно схему работы такого насоса можно представить как работу объемного насоса, где роль пластин выполняют вихри, возникающие в глухих отверстиях, а роль

отвода винтовые каналы. Вместе с тем, рабочий процесс такого насоса близок к вихревым насосам, где роль бокового канала выполняет винтовая решетка.

Рассматривая схему работы (рис. 1, 2) примем допущения: течение жидкости установившееся; отсутствует момент от трения жидкости о стенки неподвижного канала и поверхность барабана; давление возрастает по длине винтового канала линейно; картина течения в области всех глухих отверстий, включая входные и выходные участки, одинакова.

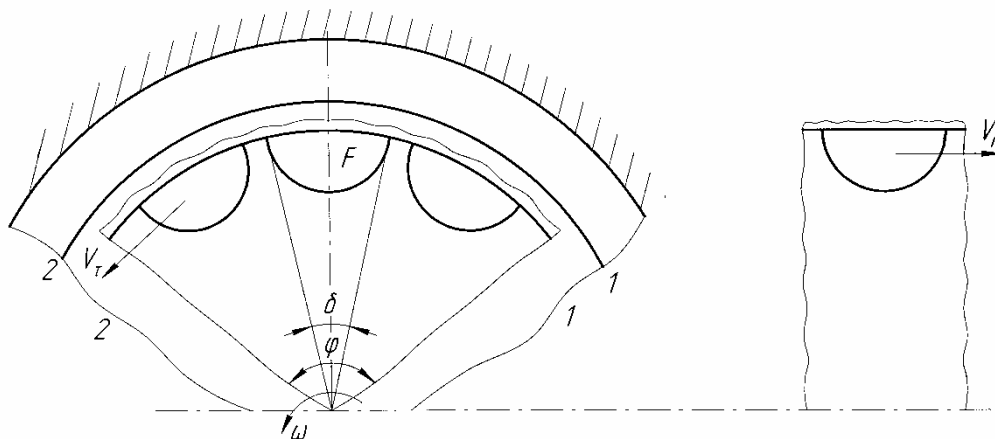


Рис. 2. Схема течения жидкости в глухих отверстиях барабана и винтовом канале

Выделим сектор φ , а на секторе угол δ , соответствующий диаметру глухого отверстия в плоскости перпендикулярной оси барабана.

При вращении ротора под воздействием центробежных сил и лопастей винтового канала жидкость в глухих отверстиях перемещается с окружной составляющей скорости v_τ и нормальной v_n .

Обозначим: F – площадь сечения глухого отверстия; i – количество глухих отверстий; v_τ – окружная составляющая скорости жидкости на площадке F ; v_n – нормальная составляющая скорости жидкости на площадке F . Учитывая близость процессов в разработанной машине и вихревом насосе [4] справедливо уравнение момента импульса (моментов количества движения) для барабана с глухими отверстиями. Момент сил в сечениях 1-1 и 2-2 за вычетом момента на его поверхности будет равен:

$$\Delta M = \int_{1-2} \rho v_\tau d\varphi dr r v_n r, \quad (1)$$

принимая, что плотность ρ постоянна, уравнение момента импульса для колеса будет:

$$\Delta M = \rho \int_{1-2} v_\tau v_n d\varphi r^2 dr = i \rho \int_F v_\tau v_n r^2 dr d\delta \quad (2)$$

Удельная работа или напор равен

$$H = M\omega/G, \quad (3)$$

где G – массовый расход жидкости, ω – угловая скорость вращения барабана. Тогда напор равен:

$$H = M\omega/G = \rho \int_{ABCD} v_\tau v_n r^2 dr d\phi \quad (4)$$

В полученном уравнении (4), напор гидромашины зависит от массы жидкости, участвующей в вихревом движении, геометрии каналов и скорости вращения барабана.

Экспериментальные исследования, проведенные на нескольких десятках вариантов вихревой машины с цилиндрическим ротором, различной формой отверстий и винтового канала подтвердили выбранную физическую модель.

На рис. 3 приведены относительные напорные характеристики вихревой машины $H = f(Q)$ отличающейся только соотношением глубины глухого отверстия h_0 к его диаметру d_0 [4].

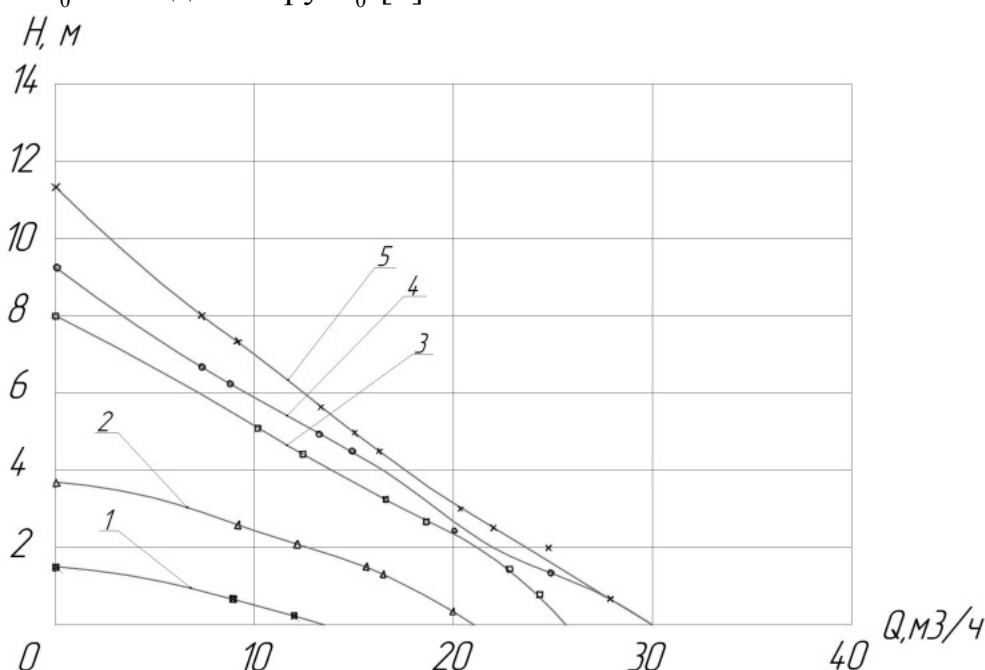


Рис. 3. Напорные характеристики с различным соотношением глубины к диаметру глухих отверстий в барабане:
 1 – $d_0=15$ мм, $h_0=4$ мм; 2 – $d_0=10$ мм, $h_0=8$ мм; 3 – $d_0=15$ мм, $h_0=12$ мм;
 4 – $d_0=16$ мм, $h_0=12$ мм; 5 – $d_0=18$ мм, $h_0=15$ мм

Испытания на различном числе оборотов показали, что для исследованного диапазона скоростей выполняются законы динамического подобия и справедливы соотношения для модельного пересчета энергетических характеристик.

В приведенном диапазоне геометрических параметров, при выполнении их оптимальных значений, получена эмпирическая формула расчета напорной характеристики:

$$H = \frac{\omega^2 D_1^2}{g} \left[0,1 + 0,93 \sin^2 \alpha_k \cos \alpha_k \frac{z_0 d_0^2 h_0}{D_1 (D_2^2 - D_1^2)} \right] (1 - 1,67q + 0,67q^2), \quad (5)$$

где $q = Q/Q_{\max}$; Q – текущее значение подачи; Q_{\max} – максимальная подача, при которой напор равен нулю. Максимальный расход рассчитывается как половина расхода через винтовую решетку при условии безударного входа $Q_{\max} = 0,5Fu/\cos\alpha_k$.

Выводы.

1. Вихревая гидромашина с цилиндрическим ротором и неподвижной винтовой решеткой обладает следующими преимуществами:

- отсутствием пульсаций давления на всех режимах, что повышает надежность;

- сверхвысокими кавитационными качествами;

- малыми габаритами и весом, а, следовательно, меньшей стоимостью;

- простотой конструкции и технологичностью.

2. Рассмотрена схема течения жидкости и на основе экспериментальных данных получена эмпирическая формула расчета напорной характеристики представленной вихревой гидромашини.

3. На базе представленной вихревой гидромашини возможно создание герметичных насосов для химической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности, авиации и судостроения.

Список литературы

[1]. *Байбаков О.В.* Вихревые гидравлические машины. – М.а: Машиностроение, 1981. – 197 с.

[2]. *Анкудинов А.А.* Расчет и проектирование предвключенной осевихревой ступени центробежного насоса: Учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 64 с.

[3]. *Анкудинов А.А., Кириллов А.А.* Автоматизированное проектирование осевихревой ступени насоса: Учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 44 с.

[4]. *Анкудинов А.А., Лысенко Л.В.* Разработка и исследование вихревой гидромашини. // В сб.: Международная конференция «Гидромеханика, гидромашини, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – С. 39.

Ильдияров Евгений Николаевич – студент, аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: 79190370518@yandex.ru

Анкудинов Анатолий Александрович – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: ankudinov051@yandex.ru

Малахов В.С., Сизов А.Н.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО НАСОСА НА ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Параметры, влияющие на энергетические характеристики. Коэффициент быстроходности вихревых насосов находится в пределах 10-40 и в отдельных случаях может быть ниже. Подача вихревых насосов лежит в пределах 0,0002-0,012 м³/с, а напор 100-2500 Дж/кг при скорости вращения рабочего колеса 150-300 рад/с. КПД вихревых насосов невелик и составляет 0,3-0,5. Вид напорной характеристики представляет собой зависимость, близкую к прямой, а отклонение от прямой в ту или иную сторону обуславливается принятыми конструктивными особенностями насоса. Так, увеличение числа лопастей рабочего колеса до 40-50 приводит к увеличению напора насоса, а увеличение числа лопастей более 40-50 снижает напор и КПД, так как увеличивается стеснение потока на входе. Применение в насосе рабочего колеса с наклоненными лопастями вызывает снижение напора и смещение оптимального режима в зону меньших подач. Следовательно, наклоном лопасти можно менять форму напорной характеристики вихревого насоса.

По технико-экономическим показателям насосы закрытого типа имеют следующие преимущества перед насосами открытого типа: более крутую напорную характеристику и в 1,5-3 раза больший напор при одинаковых окружных скоростях рабочего колеса, лучшую всасывающую и самовсасывающую способность, больший КПД: 30-50% против 20-40 % для насосов открытого типа.

Для расчета параметров вихревого насоса существует ряд методик, предлагаемых различными авторами [1, 2]. Практически все методики используют в какой-то степени экспериментальные данные, полученные при испытании вихревых насосов определенной конструкции. Поэтому наибольшее совпадение результатов расчета с экспериментом обеспечивается при проектировании геометрически подобных конструкций насосов. При изменении конструкции насоса уменьшается точность расчета.

Рассматриваемый насос. Основные технические параметры насоса ВК8-60:

Подача, м ³ /ч	8	
Напор, м		60
Температура перекачиваемой воды, не более, °С	105	
Частота вращения, с-1 (об/мин)		25 (1500)
Напряжение переменного тока, В		380
Частота переменного тока, Гц	50	
Мощность электродвигателя, кВт		2,2

Как видно из графика $H = f(Q)$ (рис. 1) насос не обеспечивает высокий напор. Для определения причин неработоспособности проведена разборка

для выявления отступлений от требований чертежа и выработки мероприятий по доводке насоса.

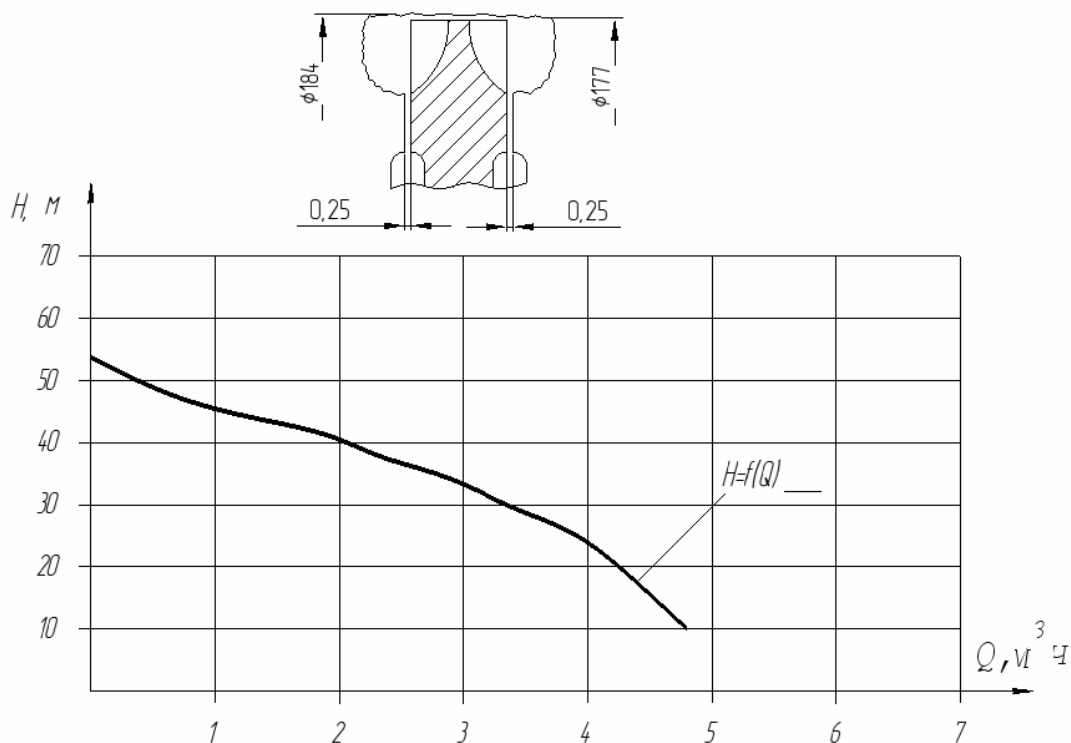


Рис. 1. Характеристика $H=f(Q)$

Основные причины малого напора насоса: боковые каналы в обеих половинах корпуса насоса имеют отклонения по форме и размерам от требований чертежа; каналы после отливки не обработаны; имеющиеся в каналах окна подвода и отвода не обеспечивают равномерное натекание жидкости на входе в рабочее колесо и выход ее из решетки в нагнетательный патрубок.

Доработка насоса была выполнена в следующем объеме: в боковых каналах проведена зачистка фрезерованием по поверхности с диаметром $\text{Ø}182$ мм; для снижения потерь в местах расположения окон подвода и отвода жидкости фрезеровкой увеличена щель для перехода воды из одного бокового канала в другой; дополнительно были уменьшены с $0,25$ мм до $0,15$ мм зазоры по торцам вихревого колеса.

Доработка насоса. После зачистки форма боковых каналов несколько отличается от формы, оговоренной в технической документации. Так, форма каналов, указанная в чертежах корпусов, близка к трапецеидальной, а после доработок – к прямоугольной. Проходное сечение каналов увеличилось по площади примерно в 1,2 раза. Боковые каналы получили некоторую симметрию относительно каналов вихревого колеса.

Результаты испытаний представлены на рис. 2. Напорная характеристика $H=f(Q)$ возросла примерно на 20 м на всем диапазоне подач от нулевой до $8 \text{ м}^3/\text{час}$. Однако на расчетной подаче напор насоса на 10 м ниже требуемого.

КПД на номинальном режиме составляет около 20% и не имеет максимума на номинальной подаче ($Q_{\text{ном}}=8 \text{ м}^3/\text{ч}$). Это свидетельствует о неопти-

мальном (перерасширенном) сечении бокового канала, которое было получено в ходе доработок.

Доработки корпусов позволили приблизить симметричность боковых каналов и окон подвода и отвода жидкости к требованиям чертежа. Однако полного совпадения формы и размеров в деталях корпуса, изготовленных литьем, обеспечить не представилось возможным. Эти отклонения вызывают неравномерное распределение полей давления по обе стороны вихревого колеса и, как следствие, прижатие его к корпусу. Мощность, потребляемая электродвигателем, в этих условиях возрастает и на номинальном режиме с подачей $8\text{ м}^3/\text{час}$ на 10% превышает допустимую.

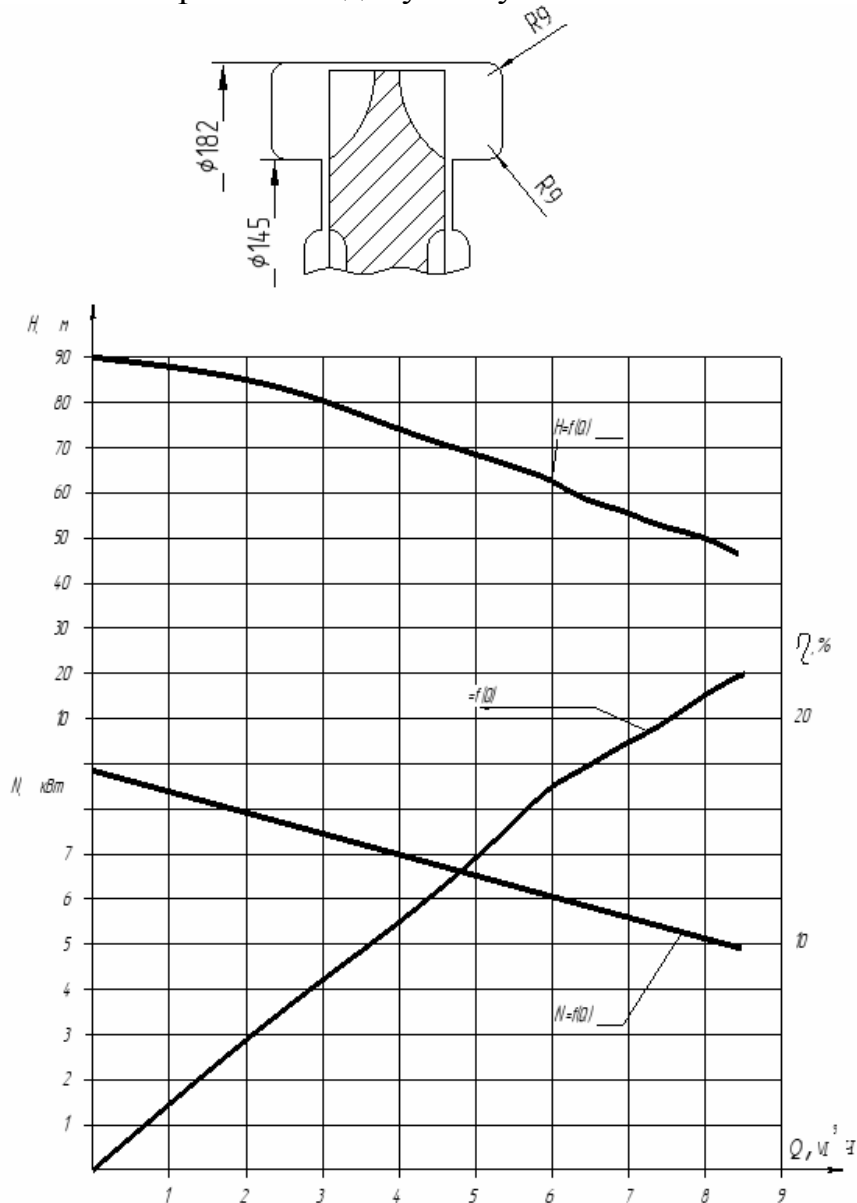


Рис. 2. Характеристики с дополнительным напорным патрубком $\text{Ø}20$ мм и электродвигателем мощностью 4кВт

Вывод: после выполнения ряда доработок насос обеспечивает напор 52 м при расходе $8\text{ м}^3/\text{час}$. Потребляемая из сети мощность, с учетом коэффициента полезного действия электродвигателя, равного 85%, превышает но-

минальную в 1,1 раза и составляет 5,1 кВт. Для снижения потерь на входе требуется обеспечить равномерный и одновременный подвод жидкости к лопастям вихревого колеса со скоростью не более 1,5 м/с. При этом условии внутренний диаметр входного патрубка должен быть не менее 30 мм. Симметричность форм и размеров боковых каналов, а также чистота выполнения внутренней поверхности каналов, оказывают значительное влияние на потери энергии при течении жидкости внутри насоса и на неравномерное распределение полей давления по обеим сторонам вихревого колеса. Поэтому каналы необходимо выполнить методами точного литья, либо механической обработкой.

Список литературы

[1]. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1971 – 540 с +2 вклейки.

[2]. Олиферов Ф. и др. Высокоэффективные лопастные насосные агрегаты для ГТД гражданской авиации // Двигатель – № 5 (17) – 2001 г.

Малахов Владислав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: vlad.merlin@mail.ru

Сизов А.Н. – ПАО «Калужский турбинный завод». E-mail: axelxd@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ОТВЕРСТИЙ РОТОРА И СТАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕВОГО НАСОСА

Вихревые насосы обычно применяют при необходимости создания большого напора при малой подаче. Их используют для водоснабжения сельских домов и для полива небольших садов и огородов. Благодаря простой конструкции рабочих органов таких насосов возможно применение химически стойких пластмасс, а также металлов, плохо поддающихся механической обработке и отливке, поэтому вихревые насосы применимы для перекачивания кислот, щелочей и других химически агрессивных реагентов [1]. Они пригодны для перекачивания легколетучих жидкостей (бензина, спирта, эфира и т. д.). Из достоинств вихревых насосов можно отметить отсутствие пульсаций давления на всех режимах, высокие кавитационные качества, малые габариты, а, следовательно, низкую стоимость [2].

Целью данной работы является исследование влияния глубины отверстий ротора и статора на характеристики вихревого насоса.

На рис. 1 изображена конструкция насоса вихревого типа с плоским ротором с глухими отверстиями на торцах и статором с глухими отверстиями [3]. Диаметр ротора равен 250 мм, а его ширина 70 мм. Диаметр глухих отверстий статора составляет 10 мм, ротора – 20 мм. Во входной патрубке насоса подается несжимаемая жидкость – вода, давление на входе атмосферное, а на выходе – 150 кПа. Частота вращения ротора составляет 1500 об/мин.

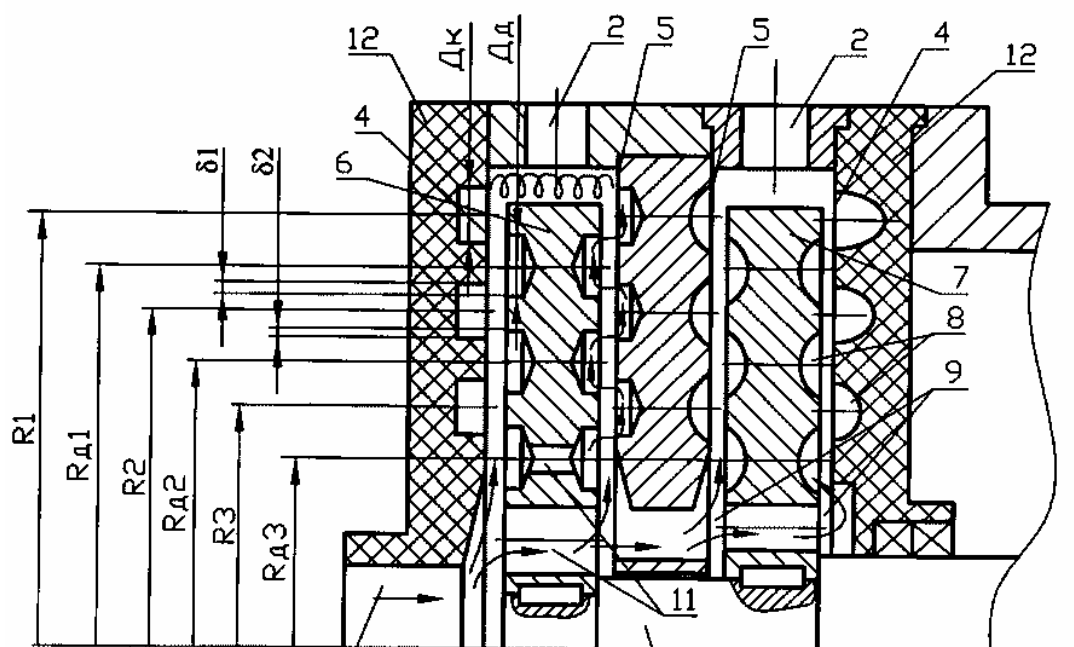


Рис. 1. Конструкция насоса вихревого типа с плоским ротором

Взаимное расположение отверстий на роторе и статоре показано на рис. 2, где глухие отверстия статора смещены относительно глухих отверстий ро-

тора на величину, близкую половине расстояния между радиусами расположения отверстий ротора, а радиальный размер отверстий статора выполнен из условия частичного перекрытия отверстий ротора в процессе поворота ротора при его вращении валом.

Количество рядов отверстий относительно оси вращения на каждой торцевой поверхности ротора и статора – 8, количество отверстий и на роторе и на статоре – 96.

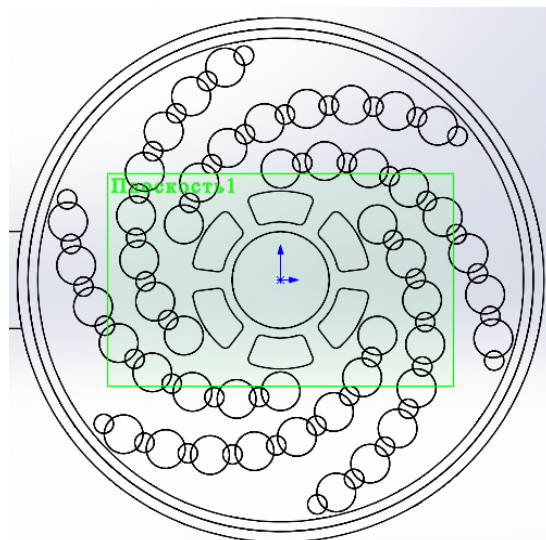


Рис. 2 Взаимное расположение глухих отверстий на роторе и статоре

Результаты численного моделирования при изменении глубины отверстий ротора и статора обрабатывались средствами постпроцессора ANSYS CFX-Post.

После завершения расчета получен объёмный расход жидкости (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты моделирования течения жидкости в проточной части вихревого насоса при изменении глубины глухих отверстий статора и ротора

Моделирование	d	h	d/h	Объёмный расход (л/с)
Статор	10	12,5	0,8	3,621
		10	1	3,969
		6,7	1,5	3,631
Ротор	20	25	0,8	3,099
		20	1	3,969
		13,3	0,5	3,312

В результате численного моделирования была построена зависимость расхода (Q) от отношения диаметра к глубине глухих отверстий (d/h) для насосов при различных значениях глубины глухих отверстий на статоре и роторе (рис.3).

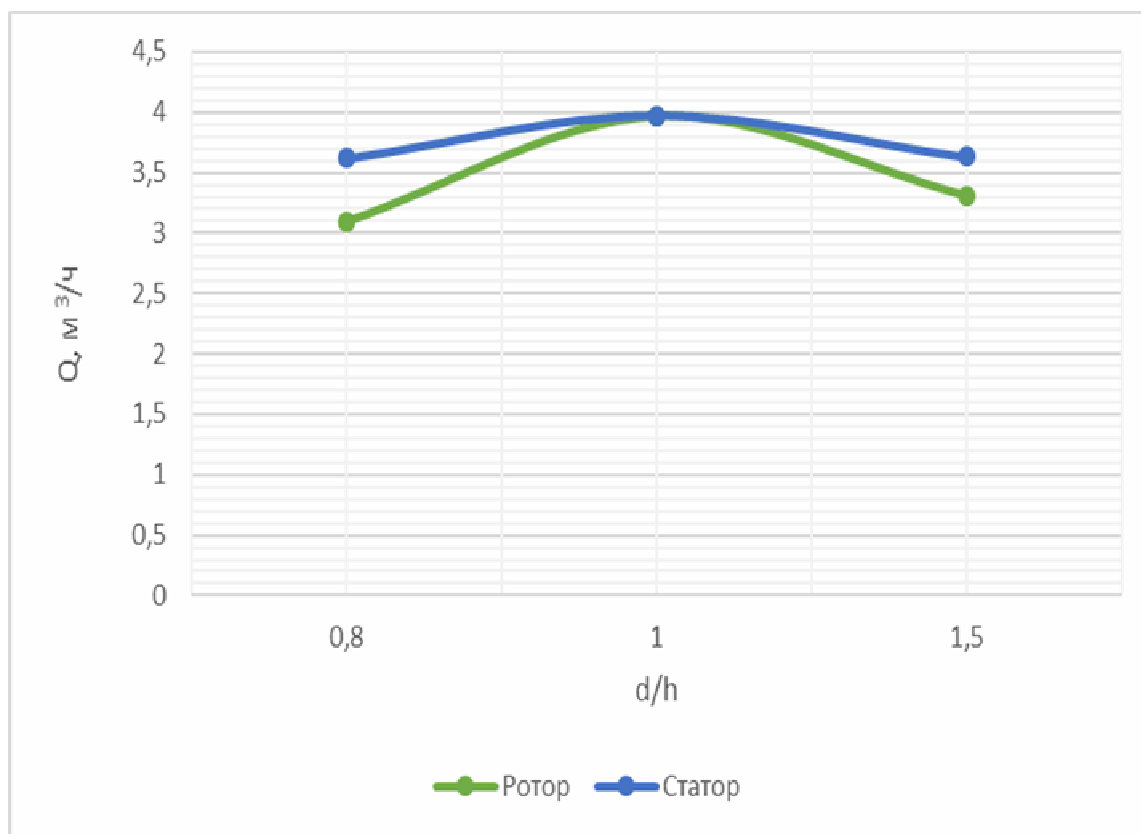


Рис.3 Зависимость расхода (Q) от отношения диаметра к глубине глухих отверстий (d/h) для насосов при различных значениях глубины глухих отверстий на статоре и роторе

Из результатов моделирования следует, что наилучшими показателями обладает конструкция вихревого насоса с отношением $d/h=1$. При этом значение напора составляет 5,2 м, объемного расхода – 3,969 л/с.

Целесообразнее изменять глубину глухих отверстий статора, так как при изменении глубины глухих отверстий ротора значения объемного расхода значительно ниже.

Список литературы

[1] *Байбаков О.В.* Вихревые гидравлические машины. – М.: Машиностроение, 1981. –197 с.

[2] *Каримулина Е.В., Шитохина О.Г.* Применение вихревого течения в технике // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 19 – 21 ноября 2019 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 200–201.

[3] *Насос-теплогенератор:* А.с. 2319911 РФ / Л.Н. Бритвин Заявл. 25.08.2006; опубл. 20.03.2008.

Каримулина Елена Владиславовна – магистрант КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: lena.sirkina98@gmail.com

Шитохина Ольга Григорьевна – КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: bonkog@mail.ru

Научный руководитель: Шитохина Ольга Григорьевна. КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: bonkog@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПЕРТОГО ОБЪЁМА В ШЕСТЕРЕННОМ НАСОСЕ

В современном машиностроении широко применяются шестеренные насосы. Их преимуществом среди объёмных насосов является компактность, простота конструкции, надёжность в работе, а также они способны надёжно осуществлять подачу вязких жидкостей.

Проанализировав работу шестеренного насоса можно выявить, что образование запертого объема происходит между двумя парами контактирующих зубьев. Образование запертого объема приводит к резким импульсным скачкам и провалам давления в этой полости, что значительно сокращает ресурс службы насоса. Импульсные процессы провала давления приводят к появлению кавитационных каверн, схлопывание которых способствует повреждению зубьев и увеличению уровня виброакустических колебаний всей системы. В связи с этим недостатком ресурс работы шестерённых насосов ограничен, однако из-за простой конструкции и малой стоимости данный тип насосов получил самое широкое распространение. Для снижения пульсаций давления в запертом объеме используют два основных метода:

- соединение запертого объема с полостью нагнетания и всасывания посредством специальных каналов в шестернях насоса или их опорах (подпятниках);
- разгрузка запертого объема за счет включения в конструкцию разгрузочных полостей.

В зависимости от конфигурации разгрузочных канавок и зазоров в насосе давление может упасть ниже давления всасывания, что и приводит к кавитации в зоне раскрытия запертого объема (рис.1).

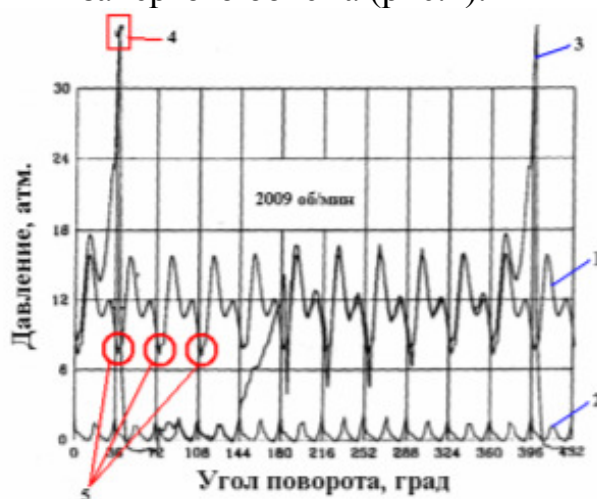


Рис. 1. Пульсации давления шестеренного насоса: 1-давление нагнетания; 2-давление всасывания; 3-давление, регистрируемое датчиком, установленным в межзубовой впадине шестерни; 4-момент образования запертого объема; 5-провалы давления в области нагнетания

При наличии запертого объёма неравномерность подачи велика. Она значительно превышает неравномерность подачи других объёмных машин.

$$Q_{max} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = \omega r^2 b (\operatorname{tg}^2 \alpha_e - \operatorname{tg}^2 \alpha_k) \quad (1)$$

$$Q_{min} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{min} = \omega r^2 b \left(\operatorname{tg}^2 \alpha_e - \operatorname{tg}^2 \alpha_k - \frac{\pi^2}{z^2}\right) \quad (2)$$

где ω – частота вращения; r – радиус основной окружности; b – ширина шестерни в см; z – число зубьев; $\operatorname{tg}^2 \alpha_k$ – угол при котором достигается максимальная мгновенная подача; $\operatorname{tg}^2 \alpha_k - \frac{\pi^2}{z^2}$ – угол при котором достигается минимальная мгновенная подача.

На основании формул подачи насоса(1) и (2) построим график зависимости идеальной подачи от угла поворота и график зависимости неравномерности подачи от числа зубьев.

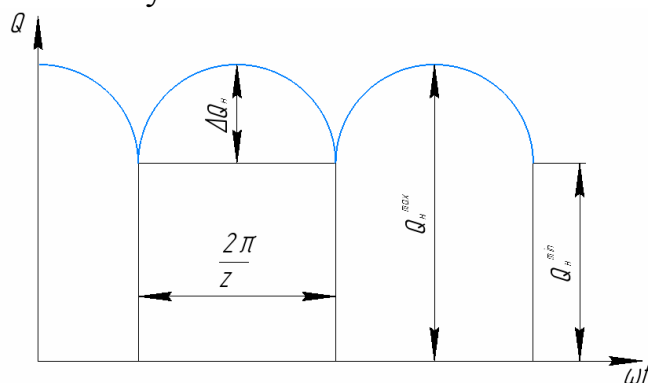


Рис. 2. График зависимости идеальной подачи от угла поворота

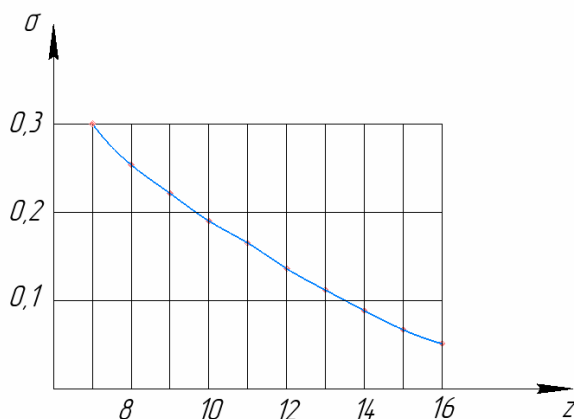


Рис. 3. График зависимости неравномерности подачи от числа зубьев

По графикам видно, что для уменьшения неравномерности подачи σ , нужно увеличить число зубьев z . Увеличение числа зубьев приведет к увеличению параметров r (радиус шестерни) и b (ширина шестерни), вследствие чего увеличиваются габаритные размеры и масса насоса. Поэтому оптимальным вариантом является применение шестерен с числом зубьев от 12 до 16,

так как при таком числе зубьев достигается минимальная неравномерность подачи ($\sigma < 0,15$) и относительно небольшие размеры насоса.

Список литературы

[1]. *Гинзбург Е.Г.* Зубчатые передачи: Справочник. – М.: Издательство «Машиностроение», 1980. – 416 с.

[2]. *Башта Т.М.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Издательство «Машиностроение», 1982. – 423 с.

[3]. *Куклин Н.Г.* Детали машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.

[4]. *Литвин Ф.Л.* Теория зубчатых зацеплений. – М.: Издательство «Наука», 1968. – 584 с.

[5]. *Юдин Е.М.* Шестерённые насосы. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Машиностроение», 1964. – 238 с.

Коваленко Александр Степанович – студент МК3-22М КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. Email: alexander1998@bk.ru

Савин Владимир Юрьевич – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. Email: savin.study@yandex.ru

Лычагин А.С., Савин В.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ В ГИДРОМАШИНАХ

Гидравлическая компенсация торцевых зазоров сокращает утечки, а, следовательно, и повышает объемный КПД, а так же сохраняет КПД неизменным в течение длительной эксплуатации насоса.

В шестерённых насосах, изготавливаемых зарубежными фирмами, гидравлическая компенсация обеспечивается за счет поджатия торцев подпятников к торцам шестерен при помощи жидкости, подводимой с линии нагнетания к кольцевой площади.

Правильный выбор этой площади имеет большое значение. При недостаточном размере такой площади могут иметь место повышенные утечки через торцевые зазоры, а при чрезмерно большой площади – полусухое трение торцев шестерен и износ подпятников. Последнее обстоятельство особенно важно для насоса, работающего с керосином. Если рабочей жидкостью является масло, то превышение площади поджатия против расчетной можно считать допустимым, так как и при высоком давлении, масляный слой сохранится и обеспечит жидкостное трение.[3]

Более правильно решить задачу об уравнивании сил давления жидкости со стороны шестерни можно путем передачи давления жидкости на площадь, центр тяжести которой смещен так, что моменты этой силы относительно осей X и Y равны соответствующим моментам сил, действующих со стороны шестерни, относительно этих же осей.[2]

Учитывая ламинарный характер течения жидкости в узких щелях, давление в направлении течения от периферии к центру падает от $P_{\text{нагн}}$ до $P_{\text{вс}}$ по логарифмическому закону.

Этот закон можно выразить следующей зависимостью:

$$p_0 = \frac{p}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \ln \frac{Q}{r_2}.$$

В этой формуле давление p и p_Q выражены как избыточные над давлением всасывания.

1-ая зона – полного давления нагнетания $p = p_{\text{нагн}} - p_{\text{вс}}$;

2-ая – переходная зона от нагнетания к всасыванию, где давление, как принято ранее, падает от p до 0 пропорционально углу то есть:

$$p_Q = \frac{p}{\varphi_0} \varphi,$$

где φ_0 – угол переходной зоны.

Каждая зона, в свою очередь, разбивается на два участка:

Первый участок, ограниченный радиусами головок R_e и впадин R_i , то есть участок, охватывающий высоту зуба, на котором, как указано выше, давление принимаем постоянным;

Второй участок, ограниченный радиусами впадин R_i и минимальным радиусом контакта r_2 на котором давление падает по логарифмическому закону.[1]

На первом участке 1-ой зоны сила давления жидкости равна

$$P_1 = \frac{p\varphi}{2} (R_e^2 - R_i^2).$$

Для определения силы P_2 , действующей на втором участке 1-01 зоны, выделим бесконечно малую площадь радиусами r и определим элементарную площадку:

$$dS = \delta\psi d\delta.$$

Силу давления на элементарную площадку:

$$dP_2 = p_Q dS = \frac{p}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \ln \frac{\delta}{r_2} \psi \delta d\delta.$$

После интегрирования получим:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{p\psi}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \int_{r_2}^{R_i} \delta \ln \frac{\delta}{r_2} d\delta = \frac{p\psi}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \left(\int_{r_2}^{R_i} \delta \ln \delta d\delta - \int_{r_2}^{R_i} \ln R_i \delta d\delta \right) = \frac{p\psi}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \left[\frac{\delta^2}{2} \ln \frac{\delta}{r_2} - \frac{\delta^2}{4} \right] = \\ &= \frac{p\psi}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \left(\frac{R_i^2}{2} \ln \frac{R_i}{r_2} - \frac{R_i^2 - r_2^2}{4} \right). \end{aligned}$$

Окончательно:

$$P_2 = \frac{p\psi}{2} \left(R_i^2 - \frac{R_i^2 - r_2^2}{2 \ln \frac{R_i}{r_2}} \right).$$

Складывая значения P_1 и P_2 , получим значения суммарной силы для первой зоны:

$$P_1 = \frac{p\psi}{2} \left(R_e^2 - \frac{R_i^2 - r_2^2}{2 \ln \frac{R_i}{r_2}} \right).$$

Во второй зоне давление жидкости, как указано выше, изменяется по закону:

$$p_\varphi = p \frac{\varphi}{\varphi_0},$$

где φ – угол, отсчитываемый от линии всасывания.

Выделив на первом участке этой зоны элементарную площадку радиусами, проведенными под углами φ и $\varphi + d\varphi$, определим элементарную площадку:

$$dS = \frac{R_e^2 - R_i^2}{2} d\varphi.$$

Элементарную силу, действующую на эту площадку:

$$dP_3 = p_\psi dS = \frac{p}{\varphi_0} \frac{R_e^2 - R_i^2}{2} \varphi d\varphi.$$

Интегрируя, найдем силу:

$$P_3 = p\varphi_0 \frac{R_e^2 - R_i^2}{4}.$$

На втором участке этой зоны имеет место падение давления как по окружности (пропорционально углу), так и в радиальном направлении (по логарифмическому закону).

Выделяя для этого участка элементарную площадку радиусальными, проведенными под углами φ и $\varphi + d\varphi$, и окружностями радиусов определим элементарную площадку:

$$dS = \delta d\varphi d\delta.$$

Давление на эту площадку:

$$p_{\varphi\delta} = p \frac{\varphi}{\varphi_0} \frac{1}{\ln \frac{R_i}{r_2}} \cdot \ln \frac{\delta}{r_2}.$$

Элементарную силу, действующую на эту площадку:

$$dP_4 = p_{\varphi\delta} dS = \frac{p}{\varphi_0 \ln \frac{R_i}{r_2}} \varphi \delta \ln \frac{\delta}{r_2} d\varphi d\delta.$$

Откуда

$$P_4 = \frac{p}{\varphi_0 \ln \frac{R_i}{r_2}} \int_0^{\varphi_0} \int_{r_2}^{R_i} \varphi \delta \ln \frac{\delta}{r_2} d\varphi d\delta.$$

Принимая для приближенных расчетов $\psi = \frac{\pi}{2}$ и $\varphi_0 = \pi$, получим:

$$S_n = \frac{\pi}{2} \left(R_e^2 - \frac{R_i^2 - r_2^2}{2 \ln \frac{R_i}{r_2}} \right).$$

Таким образом, рассмотрев данный способ можно повысить объемный КПД и сохранить его на длительный период эксплуатации насоса. Так же

можно правильно рассчитать площадь поджатия, чтобы обеспечить правильно жидкостное трение.

Список литературы

[1] *Башта Т.М.* Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем / Т.М. Башта. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 167 с.

[2] *Юдин Е.М.* Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчёт", / Е. М. Юдин, 1964. – 237 с.

[3] *Буренин В.В., Дронов В.П.* Конструкции насосов для криогенных жидкостей / В.В. Буренин, В.П. Дронов, 1981. – 240 с.

[4] *Грянко Л.П., Исаев Ю.М.* Гидродинамические и гидрообъемные передачи в трансмиссиях транспортных средств: Учебное пособие.– СПб, 2000. – 265 с.

Лычагин Алексей Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lychagin.96@mail.ru

Савин Владимир Юрьевич – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: savin.study@yandex.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЁМНОМ ГИДРОПРИВОДЕ

Объёмный гидропривод широко используется в различных отраслях машиностроения благодаря таким преимуществам, как создание значительной мощности при ограниченных размерах и массе, высокое быстродействие, позиционная точность исполнительных механизмов, плавность работы, простота автоматизации и разветвленность привода, бесступенчатое регулирование скорости на ходу машины, самосмазываемость элементов гидроприводов, благодаря чему достигается высокая износостойкость и надежность гидропривода при его работе [3].

Повышение быстродействия и точности гидравлического привода вызывает необходимость углубленного изучения динамики гидравлических механизмов.

Исследования переходных процессов позволяют оценивать пригодность гидроаппарата для применения в определённой гидросистеме и выработать при этом конструктивные мероприятия для улучшения этой пригодности. При исследовании переходных процессов оцениваются:

- забросы давления Δp_1 и Δp_2 в подводящей и отводящей линиях;
- частоты колебаний давления в гидросистеме, определяемые как её свойствами, так и свойствами гидроаппарата;
- время t_3 затуханий;
- параметры конструктивных мероприятий, необходимых для получения демпфирования, обеспечивающего желаемое время затухания при приемлемых Δp_1 и Δp_2 .

Переходные процессы рассматриваются обычно, как результат одноразового возмущения работы гидроаппарата и реже, как результат периодических возмущений с частотой, соответствующей частоте изменения внешней нагрузки гидросистемы [1]. В обоих случаях для решения задачи используется математическая модель. При построении математической модели учитываются внешние и внутренние факторы. К внешним факторам относятся свойства гидросистемы а именно:

- упругостные свойства зоны высокого давления, характеризующие её объёмом и приведённым модулем упругости;
- неравномерность подачи источника питания;
- время срабатывания источника возмущения работы гидроаппарата;
- волновые свойства трубопроводов.

К внутренним факторам относятся свойства гидроаппарата, то есть особенности параметров его статической и динамической характеристик, обусловленные конструкцией проточной части и свойствами демпфирующей системы.

В настоящее время разработаны программные продукты, реализующие математические модели процессов в гидроприводах, в частности, Simscape Fluids – отдельная библиотека пакета Simulink среды MATLAB, предназначенная для моделирования гидравлических систем. Физические модели в Simscape Fluids параметризуются с использованием переменных и выражений MATLAB и помогают спроектировать системы управления для гидравлической системы в Simulink [4].

При работе гидросистемы с регулируемым насосом возможны забросы давления в напорной линии при изменении расхода рабочей жидкости от номинальной подачи насоса до нуля и от нуля до номинальной подачи насоса за некоторое время [2]. Моделирование процессов с помощью Simscape Fluids в гидроприводе с пластинчатым насосом прямого и непрямого управления позволит выявить факторы, оказывающие влияние на забросы давления в напорной линии.

Список литературы

[1]. Данилов Ю.А. Аппаратура объемных гидроприводов : Рабочие процессы и характеристики / Ю.А. Данилов, Ю.Л. Кирилловский, Ю.Г. Колпаков. – М.: Машиностроение, 1990. – 271 с.

[2]. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник / В.К. Свешников – СПб: Политехника, 2015. – 627 с.

[3]. Гидропривод. Основы и компоненты: учебный курс по гидравлике, том 1. – Эрбах, Германия: Бош Рексрот АГ Сервис Автоматизация Дидактика, 2003. – 323 с.

[4]. *SimscapeFluids* /exponenta – техническая поддержка. – URL: <https://exponenta.ru/simhydraulics>. (дата обращения: 01.04.2021)

Галкин Алексей Игоревич – магистрант, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alex40-rus@mail.ru

Шитохина Ольга Григорьевна – доцент, канд. физ.-мат. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: bonkog@mail.ru

ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Топливная система газотурбинного двигателя (ГТД) служит для подачи топлива из топливной системы в камеру сгорания двигателя в достаточном количестве и в подготовленном для наиболее полного его сгорания виде. [1].

Топливная система ГТД должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать бесперебойную подачу и хорошее качество распыла топлива в камерах сгорания на всех режимах работы двигателя;
- быть безопасными в пожарном отношении;
- иметь высокую эксплуатационную технологичность (доступность, легкосъемность, контролепригодность, взаимозаменяемость, минимальное время и стоимость устранения неисправности в оперативном цикле эксплуатации);
- обеспечивать необходимую чистоту топлива;
- быть в максимально возможной степени автоматизированными и простыми в управлении;
- иметь малые габариты и вес.

Топливо для газотурбинных двигателей должно соответствовать следующим основным требованиям: иметь большую теплоту сгорания; обладать высокой полнотой сгорания без выделения вредных примесей; не оказывать негативного воздействия на элементы топливной системы не изменять свои свойства при долгом хранении; иметь низкую стоимость.

В современных ГТД применяют углеводородные топлива марок Т-1, ТС-1, Т-2, РТ, Т-5, Т-6, Т-7 и Т-8. Их получают на основе керосина с добавлением различных присадок.

В зависимости от типа применяемого основного топливного насоса (ОТН) различают схемы топливных систем ГТД с ОТН управляемой производительности (рис.1.) и неуправляемой производительности (рис.2.) В случае использования в конструкции двигателя трубчато-кольцевой камеры сгорания топливная система не содержит магистрали пускового топлива [2]. В общем случае в топливной системе современного ГТД с кольцевой камерой сгорания можно выделить три магистрали (низкого давления, высокого давления, магистраль пускового топлива) и систему дренажа топлива.

Магистраль низкого давления обеспечивает предварительное повышение давления топлива перед основным топливным насосом и служит для увеличения высоты топливной системы. В ее состав входят (рис. 1.): подкачивающий двигательный насос *НПД* с регулятором давления, фильтр грубой очистки Φ , расходомер топлива и топливомасляный радиатор *ТМР*. Подкачивающий насос *НПД*, имеющий привод от ротора двигателя, повышает давление топлива до 0,15-0,3 МПа, в результате чего предотвращает его кавитацию на входе в основной топливный насос.

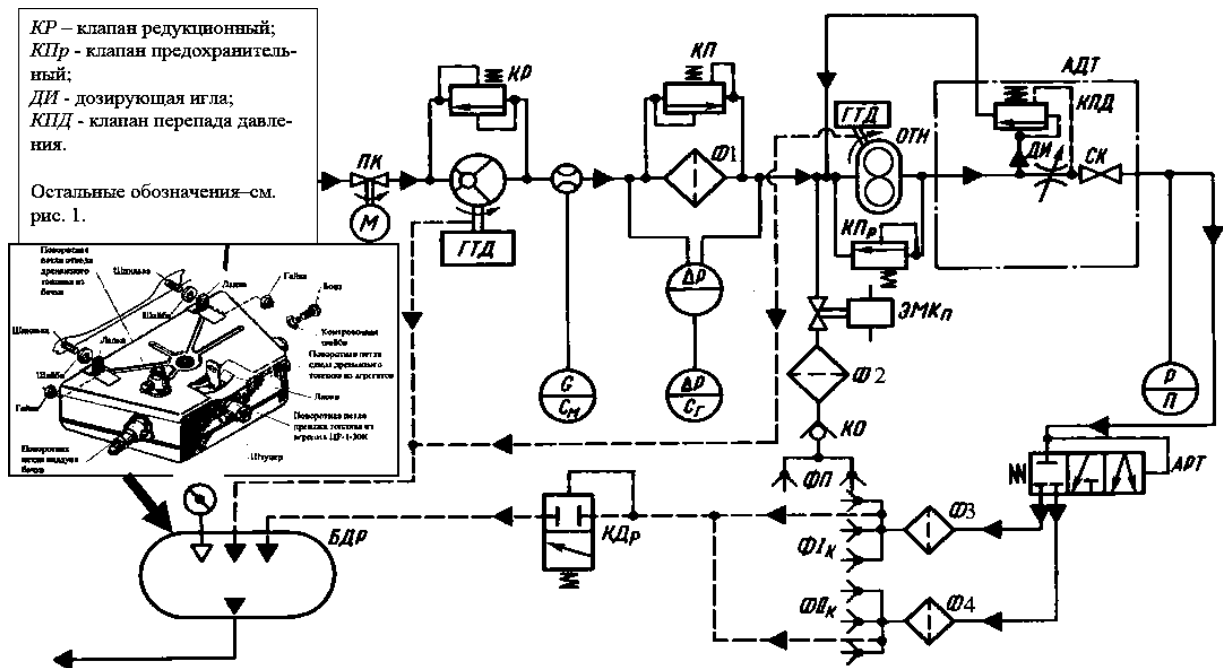


Рис.1. Схема топливной системы ГТД с ОТН управляемой производительности

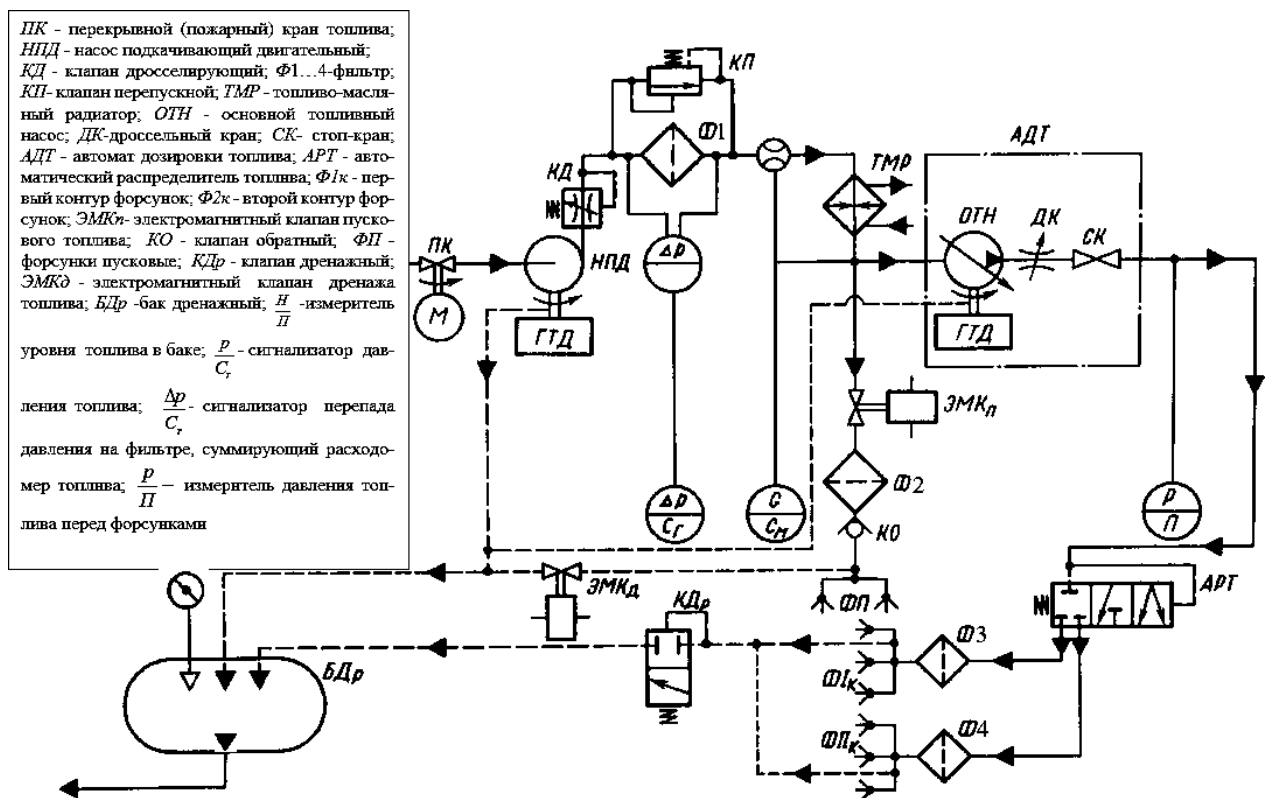


Рис.2. Схема топливной системы ГТД с ОТН неуправляемой производительности

Для создания необходимого давления топлива перед форсунками служит основной топливный насос *ОТН*, который на максимальном режиме должен увеличивать давление до величин 4-15 МПа.

От типа основного топливного насоса (ОТН) и его принципа управления расходом топлива, выделяют две разновидности систем: с основным топливным насосом управляемой и неуправляемой производительности.

В первом случае управление производительностью ОТН осуществляется автоматом дозирования топлива (АДТ), в зависимости от положения рычага управления двигателем (РУД), положение которого изменяет проходное сечение дроссельного канала (ДК). К основным топливным насосам управляемой производительности обычно относят плунжерный насос с наклонной шайбой, на которую воздействуют элементы АДТ.

Топливные системы с ОТН неуправляемой производительности действуют на основе перепуска избыточного количества топлива с выхода насоса на вход. Автомат дозирования топлива должен осуществлять этот перепуск в таком количестве, что бы подача топлива строго соответствовала заданному режиму работы двигателя. Устройством, позволяющим дозировать топливо этим способом является клапан перепада давления (КПД). Этот клапан автоматически поддерживает перепад давления на дозирующей игле (ДИ).

В качестве ОТН не управляемой производительности используют шестеренные насосы, а также и плунжерные насосы с неподвижной наклонной шайбой.

Топливные насосы современных ГТД могут обладать максимальной производительностью в пределах 10000-20000 кг/ч при максимальном давлении на выходе (в зависимости от типа форсунок) до 4-15 МПа

В топливных системах могут применяться центробежные, плунжерные, шестеренные. Каждый из типов насосов имеет свои преимущества и недостатки, определяющие возможные области применения.

Центробежные насосы характеризуются возможностью получения весьма высокой производительности при малых габаритах и весе. Они менее других типов насосов чувствительны к качеству применяемого топлива [3].

В основном применяются в качестве подкачивающих, но могут использоваться и как основные.

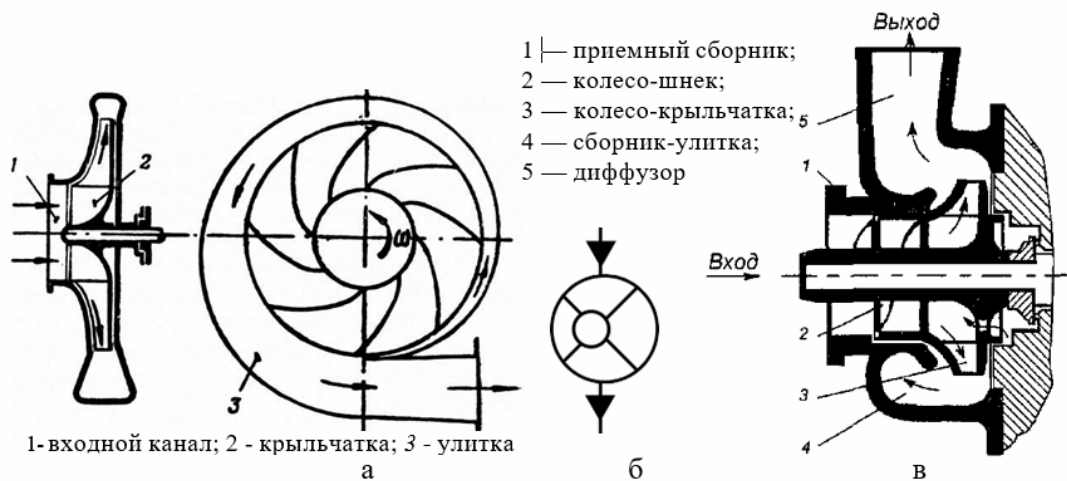


Рис.3. Схема центробежного насоса

Шестеренные насосы (рис.4.) наиболее просты в конструктивном отношении, и, кроме того, они мало чувствительны к сорту применяемого топлива и содержанию в нем воды, к температуре топлива и окружающей среды. При том же весе и габаритах шестеренные насосы по своей производительности превосходят плунжерные в 1,5-2 раза. Шестеренные насосы также очень надежны в эксплуатации.

Наряду с указанными преимуществами, шестеренные насосы имеют и недостатки, связанные с трудностью обеспечения давления топлива на выходе и постоянной производительностью при неизменном числе оборотов.

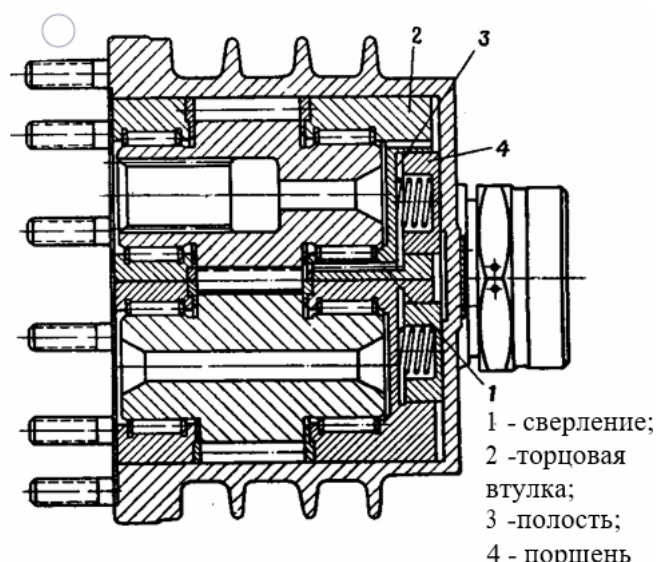


Рис.4. Шестеренный топливный насос

Плунжерные насосы (рис. 5.) получили наибольшее распространение в качестве основных топливных насосов. Основными их преимуществами являются возможность получения высоких давлений топлива и возможность достаточно простого регулирования расхода топлива при постоянном числе оборотов.

Основная часть неисправностей элементов топливных систем происходят из-за появления вредных примесей в топливе, которые могут оказывать разрушающее воздействие на элементы конструкции двигателя [4].

Присутствующие в топливе кислородные, сернистые соединения и вода вызывают коррозию топливных узлов. Разрушения топливных трубопроводов в результате их колебаний составляют значительную часть всех отказов в топливной системе ГТД.

Для снижения вибрации трубопроводов их отдельные участки защищают от колебаний путем изменения расстояний между опорами.

Чтобы деформации трубопроводов и корпуса двигателя не приводили к разрушениям соединений трубопроводов, выполняют термокомпенсационные элементы. С целью сохранения герметичности соединений трубопроводов для их резьбовых элементов (гаек, болтов) применяют контрольные устройства, препятствующие ослаблению затяжки соединений от вибраций.

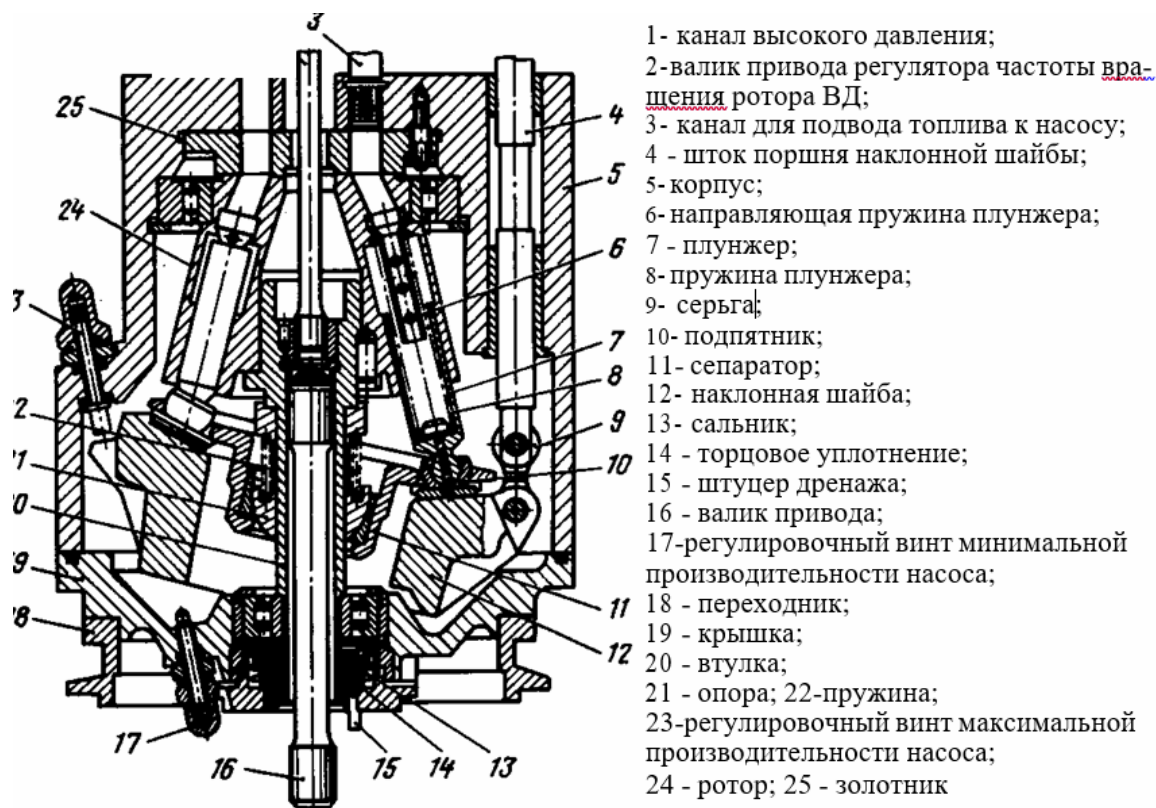


Рис.5. Плунжерный насос высокого давления

В процессе исследования выполнено ознакомление с основными видами конструктивно-схемных решений топливных систем ГТД, также рассмотрены принципы анализа топливных систем и конструкции агрегатов с учетом условий их работы.

Определено что наиболее распространенным топливным насосом, применяемым в топливной системе, является плунжерный насос из-за его возможности получения высоких давлений топлива.

Список литературы

- [1]. *Иноземцев А.А. и др.* Авиационный двигатель ПС-90АМ.:ЛибраК,
- [2]. *Иноземцев А.А, Сандрацкий В.Л.* Газотурбинные двигатели-ОАО“Авиадвигатель” – Пермь, 2006.
- [3]. *Лозицкий Л.П. и др.* Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. -М.: Воздушный транспорт, 1992.
- [4]. *Лозицкий Л.П. и др.* Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП. – М.: Машиностроение, 2012.

Шитохина Ольга Григорьевна – доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: bonkog@mail.ru

Заболотский Илья Павлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: ilua_zabolotsky333@mail.ru

Антипов В.С., Ильичев В.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АНТИПОМПАЖНОЙ СИСТЕМЫ НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Большое количество современных научных исследований посвящено изучению работы нагнетателей природного газа. Важнейшей задачей при проектировании и эксплуатации является исключение возникновения режима помпажа, сопровождающегося появлением пульсаций потока газа и динамических сил высокой амплитуды, что может привести к повреждению элементов конструкции, значительным экономическим потерям и угрожает безопасности обслуживающего персонала [1, 2].

Существует множество факторов, влияющих на процессы, происходящих в нагнетателях и вызывающих перемещение рабочей точки в области характеристик, при которых наблюдается явление помпажа. Без применения численных методов и компьютерных программ, оперирующих системами из сотен нелинейных уравнений, эту задачу решать в настоящее время нерационально. Одним из наиболее совершенных программных продуктов для осуществления численного моделирования является система AspenHysys, позволяющая создавать и исследовать как модели функционирования компрессоров или нагнетателей и связанных с ними систем, так и схемы многих других технологических процессов.

Целью данной работы – является апробация методики исследования характеристик схемы антипомпажного регулирования для нагнетателя с использованием программы AspenHysys.

Одной из основных проблем при эксплуатации компрессорного оборудования является опасность возникновения помпажа – явления, заключающегося в нестабильности потока рабочего тела, когда давление на всасывании компрессора резко возрастает, а на нагнетании уменьшается. Момент помпажа наступает, когда нагнетатель не может развить усилие, большее, чем сила сопротивления рабочей смеси [3, 4].

При помпаже давление нагнетания, достигнув критической величины, резко падает до равного в области всасывания. Из-за этого возникает обратный поток рабочего тела в сторону всасывания, сопровождающийся высокой турбулентностью, вибрациями, которые в конечном итоге могут привести к разрушению лопаток и прочих элементов.

В программе имеются достаточно развитые средства моделирования динамического процесса функционирования нагнетателя, оснащённого антипомпажным оборудованием, и можно проследить перемещение рабочей точки работы нагнетателя при любом переходном процессе [5].

Результаты динамического моделирования – остановки компрессора, контролируемого системой антипомпажного регулирования, представлены на рис. 1.

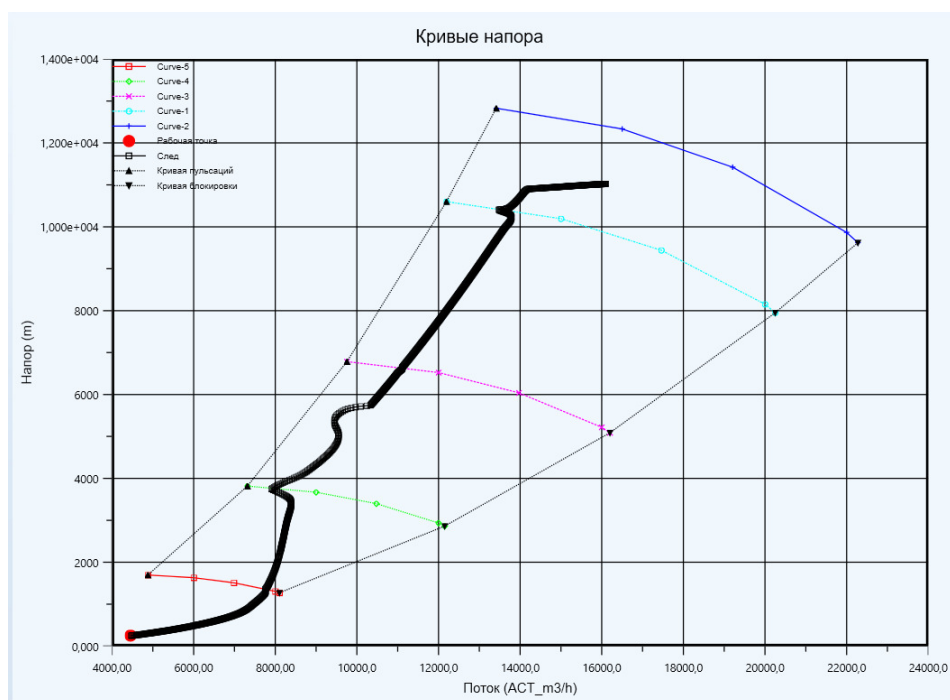


Рис. 1. Результаты моделирования остановки нагнетателя при его контроле системой антипомпажного регулирования

Заключение. Одной из важнейших проблем при проектировании и эксплуатации нагнетателей природного газа на магистральных трубопроводах является исключение их эксплуатации вблизи границы помпажа, и тем более их перехода в область помпажа.

Исследование режимов работы нагнетателей является сложной задачей. В настоящее время эта задача достаточно успешно решается с использованием современных систем динамического моделирования, одной из которых является программа AspenHysys. Она позволяет моделировать функционирование нагнетателя с заданными характеристиками, а также подключать к нему системы антипомпажного моделирования, созданные как на основе шаблонов, так и пользовательские.

По описанной методике можно исследовать динамические режимы функционирования других нагнетателей с любыми системами антипомпажного регулирования и добиться полного исключения возможности помпажа.

Список литературы

[1]. Любимов А.Н., Чеглаков И.В., Неверов В.В. и др. Модернизация воздушных центробежных компрессоров. / В сборнике: Компрессоры и компрессорное оборудование труды международного симпозиума им. К.П. Селезнева. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2018. – С. 57-65.

[2]. Соколовский М.И., Ерышкин Ю.П., Селянская Е.Л. и др. Способы повышения энергоэффективности центробежных компрессоров. / Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2018. – № 2. – С. 80-87.

[3]. *Гузенко Д.Б., Ильченко М.А.* Обеспечение бесперебойной работы компрессора с помощью антипомпажной системы. Автоматизация в промышленности. 2016. № 3. С. 17-20.

[4]. *Avdeyev B.Y., Antonyuk E.M., Konovalova V.S. et al.* Means for fault diagnostic system setup for ngv-refuelling stations compressor equipment. Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIconRusNW 2016. С. 488-490.

[5]. *Кузнецов О.А.* Основы работы в системе AspenHysys. – М.: -Берлин: Изд-во «Директ Медиа», 2015. – 153 с.

Антипов Вадим Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: beowulf1064@gmail.com

Ильичев В.Ю. – к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivl2003@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЛАСТИНЫ НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НЕЕ СИЛ

Найдем нагрузку, действующую на пластины, находящиеся в пазах ротора пластинчатого насоса (рис. 2) и зависимость ее от длины. Длину пластины представим в виде суммы (рис. 1)

$$l = l_1 + l_2, \quad (1)$$

где l_1 – длина выступающей части пластины из ротора; l_2 – длина, находящейся в пазу ротора пластины.

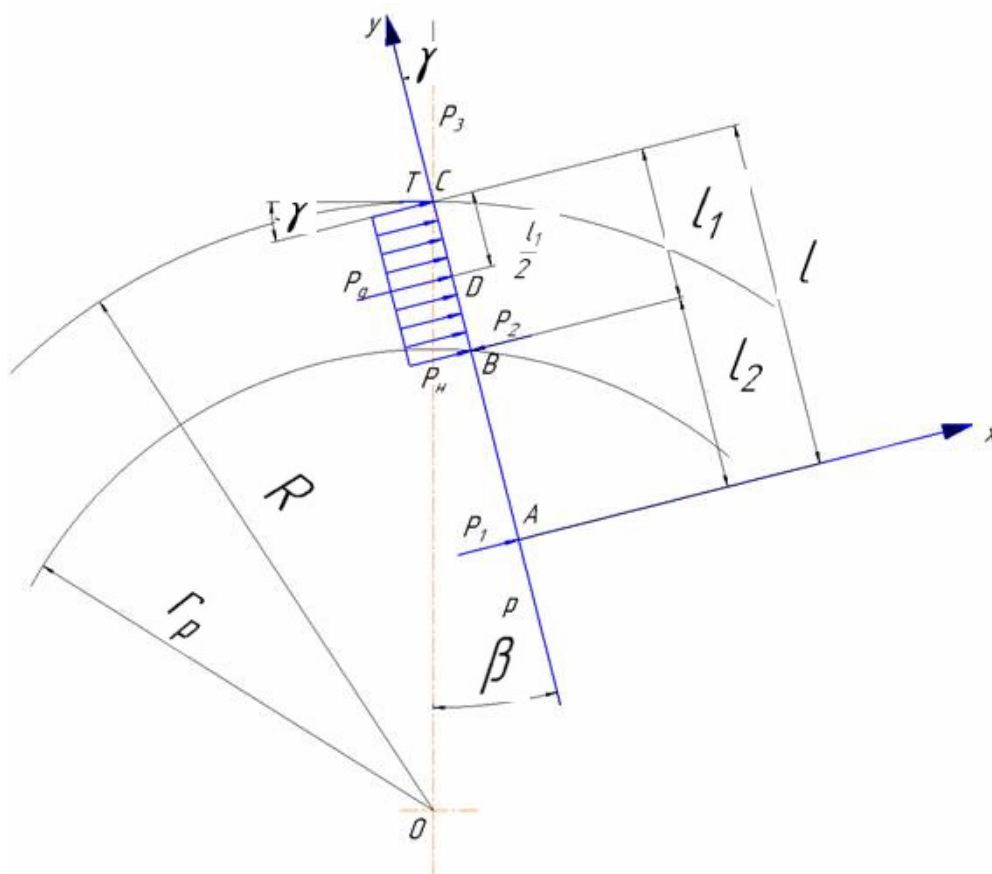


Рис. 1. Схема для расчета нагрузок, действующих на пластину

Силы P_1 и P_2 зависят от выбора размера l_2 . Эти силы действуют на пластину при работе насоса. Возникающая в результате реакции стенки паза сила P_1 действует в точке A на пластину перпендикулярно направлению ее движения относительно паза ротора [1]. В точке B , где пластина опирается о край ротора, действует сила P_2 , направленная перпендикулярно пластине. Вдоль пластины действует сила:

$$P = p_n B b, \quad (2)$$

где p_n – давление нагнетания.

В точке С сила P_3 действует по нормали к внутренней поверхности статора. Сила трения T направлена по касательной к внутренней поверхности статора:

$$T = \mu P_3 \quad (3)$$

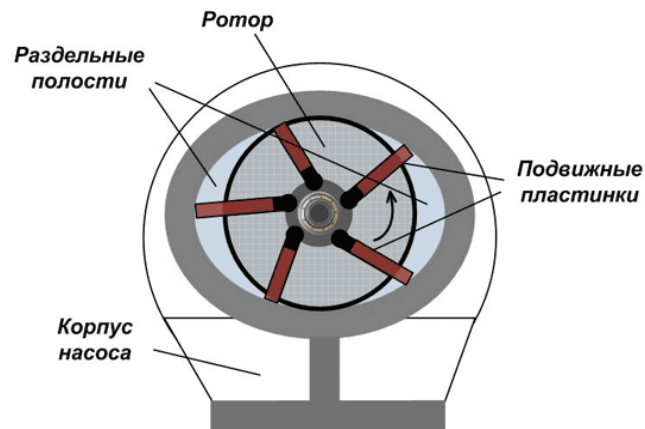


Рис. 2. Упрощенная схема пластинчатого насоса

Рассмотрим выступающую из ротора часть пластины ВС. Сила P_q действующая на выступающую часть пластины длиной l_1 изображена на рис. 3 оранжевым цветом.

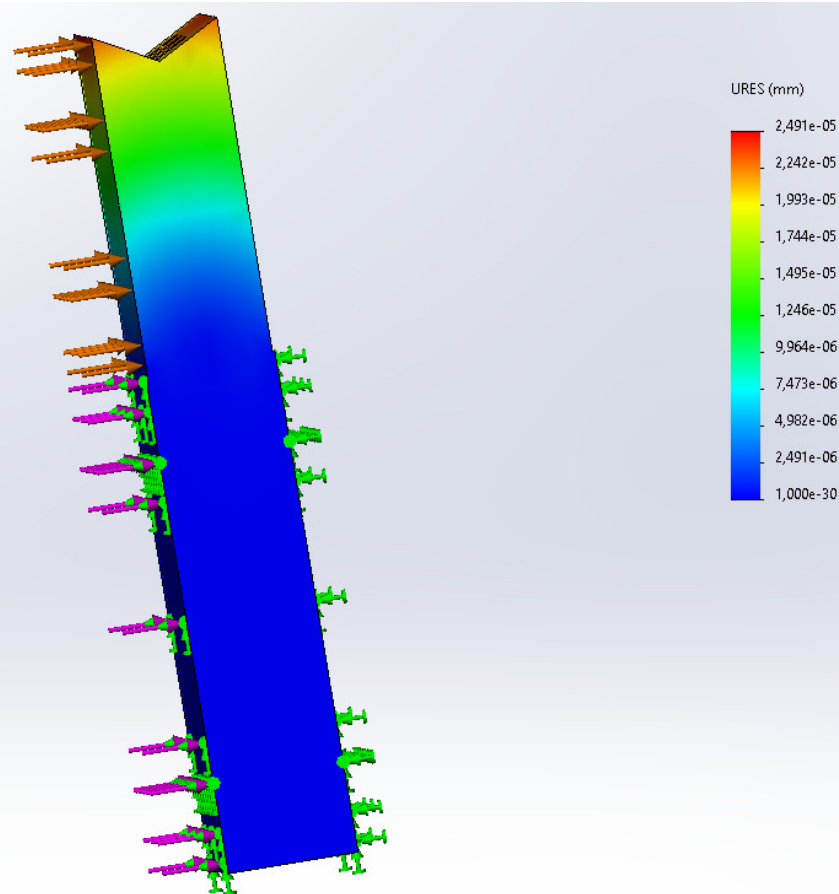


Рис.3. Деформация пластины в результате действия на нее сил

Из рис. 3 видно, что наиболее сильно подвержена деформация, выступающая из ротора часть пластины (l_1).

Распределенную нагрузку, вызванную давлением жидкости, можно выразить в точке D:

$$P_q = p_n B l_1. \quad (4)$$

Ось Y расположим через пластину. Ось X – перпендикулярно пластине. Уравнение равновесия всех сил на ось X:

$$T \cos \zeta + P_q - P_2 + P_1 - P_3 \sin \zeta, \quad (5)$$

где $\zeta = \arcsin\left(\frac{r_p}{R} \sin \theta\right)$; θ – угол наклона пластины.

Уравнение равновесия всех сил на ось Y:

$$T \sin \zeta - P + P_3 + P_a \cos \zeta = 0 \quad (6)$$

Третье уравнение равновесия получим, приравняв нулю сумму моментов всех сил относительно точки C:

$$P_q \frac{l_1}{2} - P_2 l_1 + P_1 l_1 = 0 \quad (7)$$

Выразим величину P_3 , подставив вместо T его значение из уравнения (4):

$$P_3 = \frac{P}{\mu \sin \zeta + \cos \zeta} \quad (8)$$

В уравнении (8) определим P_2 через P_1 :

$$P_2 = \frac{P_q \frac{l_1}{2} + P_1 l_1}{l_1} \quad (9)$$

Подставим в уравнение (5) значения P_2 из уравнения (9), T – из уравнения (3) и P_3 из уравнения (8). Получим следующее выражение:

$$P_1 = \left(\frac{P(\mu \cos \zeta - \sin \zeta)}{\mu \sin \zeta + \cos \zeta} + \frac{P_q}{2} \right) \frac{l_1}{l_2} \quad (10)$$

Подставим в (10) значение силы P_1 полученным выражением:

$$P_2 = \frac{P(\mu \cos \zeta - \sin \zeta)}{\mu \sin \zeta - \cos \zeta} + P_q + \left(\frac{P(\mu \cos \zeta - \sin \zeta)}{\mu \sin \zeta + \cos \zeta} + \frac{P_q}{2} \right) \frac{l_1}{l_2} \quad (11)$$

Построенные графики изменения сил P_1 , и P_2 в зависимости от изменения отношения l_1/l_2 при постоянной величине l_1 (рис. 4).

Увеличение зависимости l_1/l_2 так же увеличивает значения силы P_1 и P_2 что связано с увеличением износа деталей насоса (пластин и пазов ротора) [2]. Чтобы избежать этого, отношение l_1/l_2 стоит выбирать возможно меньшим. В конструкциях насосов отношение l_1/l_2 допускается в пределах 0,74–0,89.

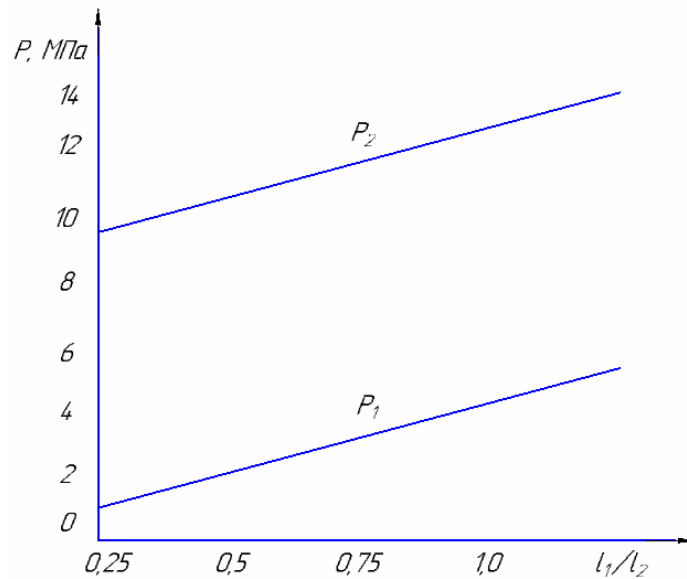


Рис. 4. Зависимость P_1 , P_2 , действующих на пластину от отношения $\frac{l_1}{l_2}$ при $\beta=8^\circ$, $b=2$ мм, $B=24$ мм, $p_n=6,27$ МПа, $l_2=5,5$ мм.

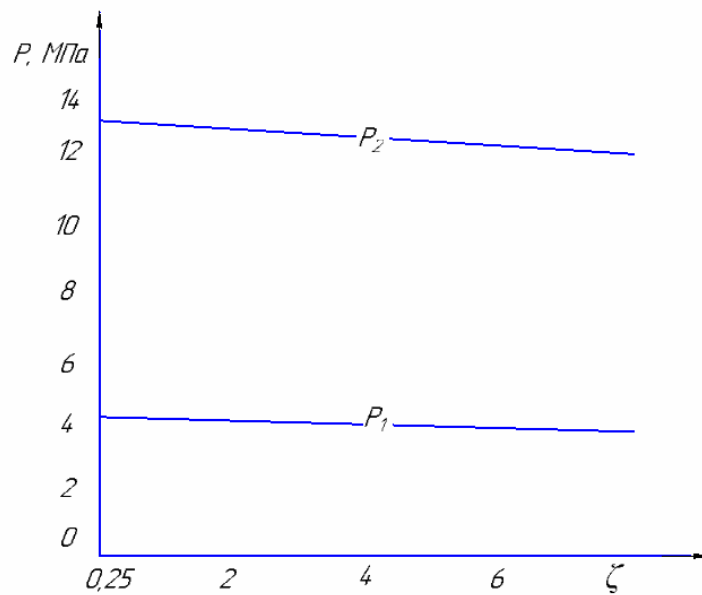


Рис. 5. Зависимость усилий P_1 , P_2 , действующих на пластину от угла ζ наклона пластины при $\mu=0.08$, $b=2$ мм, $B=24$ мм, $p_n=6,27$ МПа, $l_1=5,5$ мм, $l_2=6$ мм

С уменьшением значения угла ζ (угол наклона пластины) силы воздействия P_1 и P_2 увеличиваются (рис. 4). Из треугольника ОВС получим зависимость между углами ζ и θ (рис. 5). Зависимость выглядит следующим образом: $\sin \zeta = \frac{r_p}{R} \sin \theta$. В итоге можно сделать вывод, исходя из уравнений (10) и (11), что линейное увеличение сил P_1 и P_2 происходит при увеличении давления нагнетания.

Список литературы

[1] *Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник. 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

[2] *Зайченко И.З., Мышлевский Л.М.* Пластинчатые насосы и гидромоторы. – М.: Машиностроение, 1970. – 229 с.

[3] *Машиностроительный гидропривод: учеб. пособие / Под ред. В.Н. Прокофьева.* – М.: Машиностроение, 1978. – 495 с.

Волков Глеб Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gleb4ikvolk@gmail.com

Савин Владимир Юрьевич – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. Email: savin.study@yandex.ru

Соколов М.И., Шевелев Д.В.

К ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Возобновляемая, или альтернативная, «зелёная» энергетика – это энергетика, основанная на использовании ресурсов, которые являются возобновляемыми или неисчерпаемыми по человеческим масштабам. Основным принципом использования возобновляемой энергии заключается в её извлечении из постоянно происходящих в окружающей среде процессов или возобновляемых органических ресурсов и предоставлении для технического применения [1]. «Зелёную» энергию получают из природных ресурсов, таких как: солнечный свет, водные потоки, ветер, приливы и тепло земных недр (геотермальная энергия) которые являются возобновляемыми (пополняются естественным путём), а также из биотоплива: этанола, растительного масла, древесины.

Солнечная энергетика – направление альтернативной энергетике, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии в каком-либо виде, например, в виде тепла или электричества [2]. Принято считать, что солнечная энергетика является «экологически чистой», то есть не производящей вредных отходов во время активной фазы использования.

Солнце является самым мощным источником энергии в Солнечной системе. Поток солнечного излучения, проходящий через площадь в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно потоку излучения на расстоянии одной астрономической единицы от центра Солнца (на входе в атмосферу Земли), равен $s_0 = 1368 \text{ Вт/м}^2$ (солнечная постоянная) [3]. Из-за поглощения, при прохождении атмосферы Земли, поток солнечного излучения снижается и на экваторе, на уровне моря составляет величину $s = 1019 \text{ Вт/м}^2$. Однако следует учесть, что среднесуточное значение потока солнечного излучения через единичную горизонтальную площадку меньше (из-за смены дня и ночи, и изменения угла солнца над горизонтом).

Одним из возможных направлений использования солнечной энергии являются солнечные тепловые электростанции башенного типа (СТЭС) [4]. В основе СТЭС лежит принцип концентрации солнечного излучения с помощью отражающих зеркал-гелиостатов. Солнечные лучи направляются на приемник солнечного излучения – теплообменный аппарат, находящийся на вершине башни. Там промежуточный теплоноситель (смесь расплавленных солей) разогревается до высокой температуры. Этот промежуточный теплоноситель используется для производства рабочего тела-пара в цикле паротурбинной установки. Паровая турбина, вращая электрический генератор производит целевой продукт СТЭС – электрическую энергию. В отличие от солнечных электростанций фотоэлектрического типа, СТЭС могут работать ночью, когда солнце скрыто за горизонтом, благодаря запасу тепловой энергии в накопительных термических баках с расплавленной солью. Время работы ночью определяется

размерами баков с теплоносителем, но необходимо чтобы в течение дня баки полностью наполнились расплавленной солью с необходимой температурой.

В летнее время, когда поток солнечного излучения максимален, проблем с накоплением необходимой массы соли не возникает [5], что нельзя сказать о зимнем периоде, когда уровень солнечной инсоляции значительно ниже. С помощью сервиса [6] были получены данные среднегодовой солнечной инсоляции за 30 лет для Калужской области (табл. 1).

Таблица 1.

Среднегодовая инсоляция для г. Калуга за 30 лет.

		Весна	Лето	Осень	Зима	Среднее значение
Уровень солнечной инсоляции s , кВт*час/м ² /сут.	Реальные погодные условия	3,75	4,7	1,5	0,58	2,83
	Чистое небо	5,86	6,92	3,0	1,46	4,3

Паротурбинная установка электрической мощности $N_{эл}=10$ МВт и КПД $\eta_{эл}=35\%$, в течении суток будет нуждаться, для своей работы, в $N_T=686000$ кВт*час тепловой энергии и выработает 240 000 кВт*час электрической энергии.

Ориентируясь на среднегодовую величину уровня солнечной инсоляции $s=2,83$ кВт*час/м²/сут и КПД передачи солнечной энергии пару в $\eta=80\%$, примерная суммарная площадь гелиостатов составит $S=303\,000$ м².

Используя данные Таблицы 1 и определенную площадь гелиостатов СТЭС, определена выработка средняя выработка электрической энергии в сутки и условная загрузка ПТУ (табл. 2).

Таблица 2.

Характеристики СТЭС

	Весна	Лето	Осень	Зима	Среднее значение
Выработка электрической энергии, кВт*час/сут	333 000	399 000	142 000	86 000	240 000
Условная загрузка ПТУ	1,39	1,66	0,59	0,36	1,0

Таким образом, определено, что СТЭС с ПТУ мощностью 10 МВт будет обладать максимальным теоретически возможным КИУМ порядка 74 %.

Список литературы

[1] Соломин Е.В. Возобновляемые источники энергии. Новые возможности человечества. // Альтернатив. энерг. и экол. – 2013. – N 10. – С. 38–40. Рус.

[2] Аливисатос П. Как работает солнечная энергия? // В мире науки. – 2009. – № 8. – С. 94–98.

[3] Скляр Ю.А., Червяков М. Ю., Воробьев В.А. и др. Особенности распределения поглощённой солнечной радиации в 2010–2012 годах по данным

с ИСЗ «Метеор – М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 272–283.

[4] *Abhishek Shah* “advantages and Disadvantages of Solar Thermal Energy (Power Towers, Parabolic Troughs)” 7 Jul, 2011 Режим доступа: <http://www.greenworldinvestor.com/2011/07/07/advantages-and-disadvantages-of-solar-thermal-energy-power-towersparabolic-troughs> (Дата обращения 18.02.21)

[5] *Шпильрайн Э.Э.* “Проблемы и перспективы возобновляемой энергетики России” // Институт высоких температур РАН. Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=446 (Дата обращения 12.02.21)

[6] *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources* “Power Data access viewer” Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer> (Дата обращения 20.03.21)

Соколов Максим Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ilannymax@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович – доцент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ХОЛОДИЛЬНИКА-ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРЫ МАРСА

Задача отвода теплоты из цикла любой теплоэнергетической установки, функционирующей за пределами Земли, является ключевой для возможности её реализации. У установки, работающей в условиях открытого космоса, отвод теплоты осуществляется либо только излучением, либо с выбросом рабочего тела в космическое пространство. Планета Марс имеет собственную атмосферу, что даёт возможность использовать ещё один вид теплообмена – конвекционный [1].

Для численного расчёта эффективности отвода теплоты конвекцией, необходимо знать основные параметры окружающей среды, в которой будет происходить теплообмен. Для Марса:

- атмосферное давление: 0,4 ... 0,87 кПа;
- температура на поверхности: 210 ... 308 К;
- состав атмосферы: CO_2 (95,32%), N (2,7%), Ar (1,6%), O (0,145%), CO (0,08%), H_2O (0,021%), N_2O_2 (0,01%), Ne (0,00025%);
- ускорение свободного падения на экваторе – 3,711 м/с²
- плотность потока солнечного излучения на поверхности: 493...716 Вт/м².

Сезонные пылевые бури приводят к значительному уменьшению максимальной дневной температуры Марса, не оказывая большого влияния на минимальную ночную температуру. Суточный цикл практически совпадает с земным (сутки Марса - 24,66 час.), наклон плоскости экватора к плоскости орбиты на Марсе - 25,19 град (на Земле - 23,45 град).

На ровной поверхности Марса ветер стихает ночью (скорость порядка 2 м/с) и усиливается днем (6 ... 8 м/с). На склонах ветры могут усиливаться до 20 ... 40 м/с, точно так же, как и во время пылевых бурь. [2]

Исходя из вышеперечисленных параметров, в качестве объекта исследования была выбрана цилиндрическая поверхность охладителя с площадью наружной стенки 1 м². Исследовалось два варианта теплообмена:

1) При параметрах космического вакуума (температура реликтового излучения 2,7 К);

2) На поверхности Марса, при этом состав атмосферы - CO_2 (100%), давление - 600 Па, температура окружающей среды 210 К, скорость ветра изменялась в диапазоне 0..20 м/с, температура на внутренней поверхности охладителя – 300 К, ускорение свободного падения на экваторе Марса – 3,711 м/с².

Тепловой поток от солнечного излучения не учитывался, материал стенки охладителя – медь (модель абсолютно чёрного тела).

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты численного моделирования теплообмена в условиях Марса.

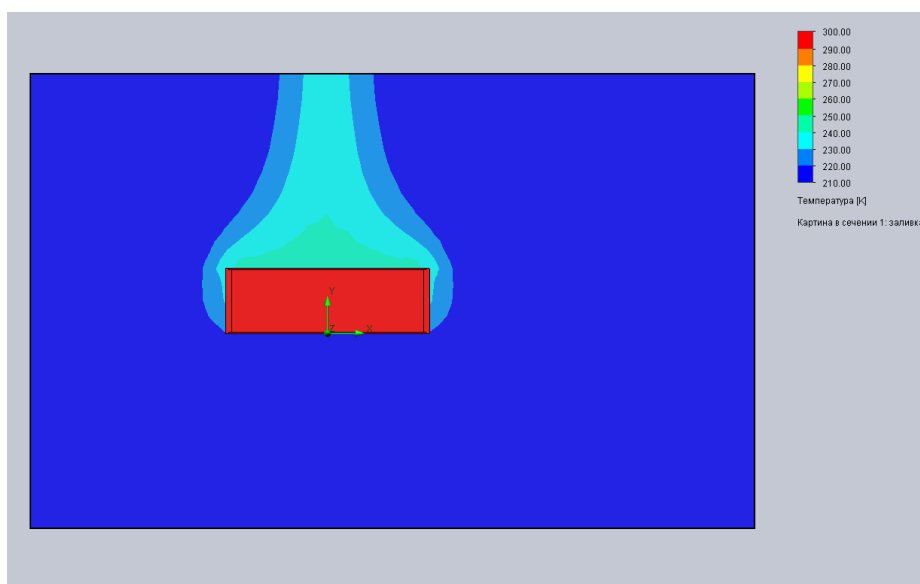


Рис. 1. Распределение температуры в условиях атмосферы на поверхности Марса при отсутствии ветра (естественная конвекция)

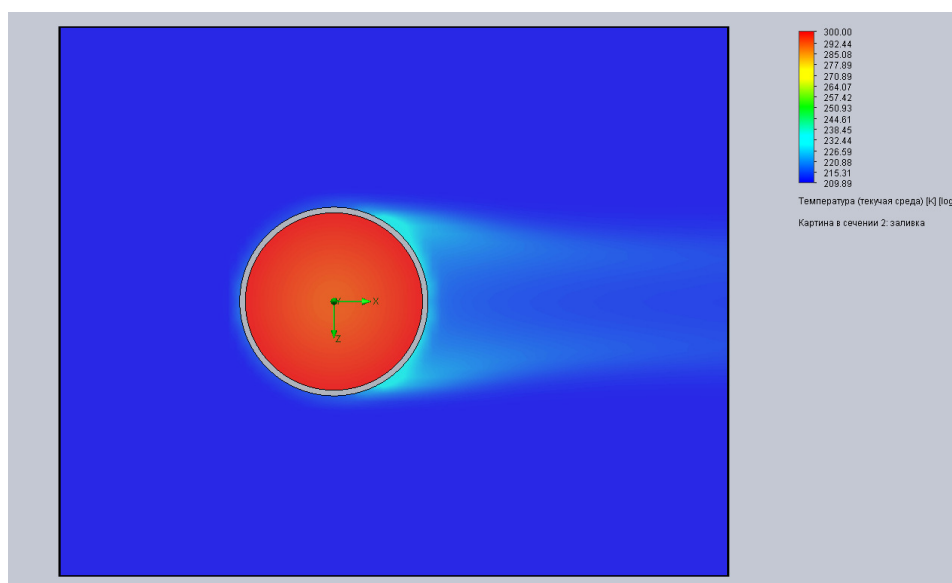


Рис. 2. Распределение температуры в условиях атмосферы на поверхности Марса при обтекании ветром 20 м/с

В качестве оценки эффективности отвода тепла, был выбран параметр среднего коэффициента теплоотдачи наружной стенки цилиндра, т.к. он учитывает общее тепло, переносимое от стенки к среде. При изменении скорости ветра 0...20 м/с, средняя температура поверхности внешней стенки охладителя изменяется как показано на рисунке 3. Точкой (1) обозначен коэффициент теплоотдачи стенки в условиях космического вакуума.

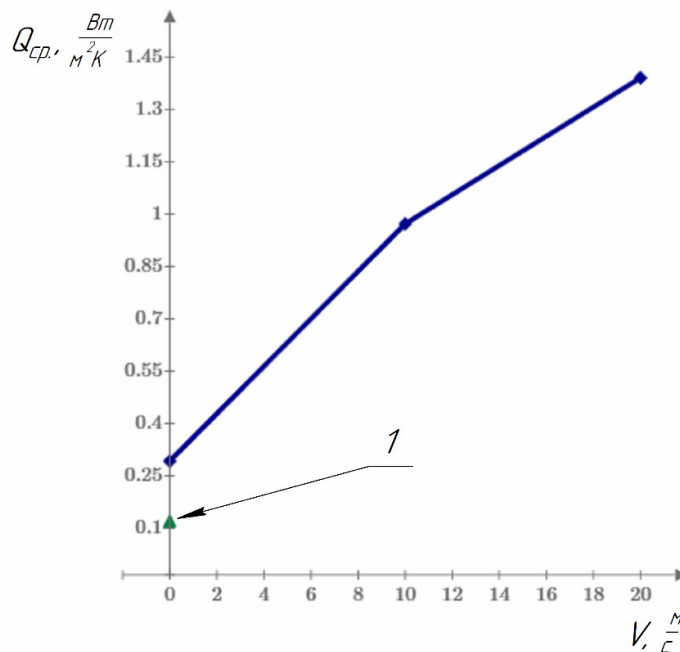


Рис. 3. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи наружной стенки охладителя от скорости ветра

Моделирование показало, что в условиях Марсианской атмосферы, при скорости ветра 0...20 м/с теплоотдача увеличивается в 2,5...14,5 раз, по сравнению с космическим вакуумом, где имеется только лучистый теплообмен.

Таким образом, влияние разреженной атмосферы Марса и скорости ветра на теплообмен холодильника-излучателя энергоустановки очень существенно, и даже при относительно низких температурах отвода теплоты может в десятки раз увеличивать коэффициент теплоотдачи.

Список литературы

- [1]. Куландин А.А., Тимашев С.В., Атамасов В.Д. Основы теории, конструкции и эксплуатации космических ЯЭУ: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. - 328 с.
- [2]. Мороз В.И. Физика планеты Марс. - Москва: Наука, 1978. - 351 с.

Козырев Алексей Александрович – студент МКЗ-21М, магистрант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248030, Россия. E-mail: kozyurevaa@student.bmstu.ru

Жинов Андрей Александрович – к.т.н., заведующий кафедрой «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: azhinov@bmstu.ru

Трутнев Д.С., Ильичев В.Ю.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОДЕЛЬНЫХ ТУРБИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОТУРБИНЫ

Одной из важнейших задач в области энергетики является оптимальное проектирование гидротурбин при строительстве гидроэлектрических станций. На современном этапе развития науки построить адекватную математическую модель работы гидротурбины с тем, чтобы провести оптимизацию, пока не представляется возможным. Большой накопленный опыт, как правило, позволяет определиться с типом гидротурбин для каждого конкретного случая. Экспериментально установленный факт [1], что гидротурбины одного типа, имеющие разные размеры, но геометрически подобный тракт, мало отличаются по индивидуальным свойствам, позволяет все исследование при проектировании натуральных ГЭС перенести на малые модельные турбины, изучение которых можно проводить с использованием стендовых испытаний в заводских лабораториях.

Параметры гидротурбин являются их количественными и качественными характеристиками. При проектировании гидротурбин заданными параметрами являются: напор, расход и мощность. Напор H (м) определяется при проектировании установки и представляет собой энергию, которой располагает турбина. Расход Q ($\text{м}^3/\text{с}$) определяется также при проектировании ГЭС. Мощность турбины N (кВт) при заданных значениях H и Q называют номинальной. Параметрами, определяемыми для выбора турбины, являются: частота вращения n (об/мин) и диаметр рабочего колеса D (м).

Диаметр рабочего колеса турбины D является основным размером, определяющим при заданных напоре и пропускной способности мощность и массу турбины. Гидродинамические качества рабочего колеса в основном определяют такие характеристики турбины, как КПД, приведенные расход, частоту вращения, кавитационный коэффициент и коэффициент быстроходности. Данные о турбине представляются в форме характеристик, определяющих все необходимые показатели турбины для различных условий ее работы, различных режимов. Поскольку такие данные для натурной гидротурбины, устанавливаемой на ГЭС, получить заранее невозможно, то их получают для подобной модельной турбины при ее испытаниях и исследованиях на гидротурбинных стендах. Затем, используя формулы пересчета [1, 2, 3], учитывающие масштабный эффект, получают энергетические, кавитационные и другие характеристики натурной турбины, выражающие зависимости КПД, кавитационного коэффициента и других величин на различных режимах работы от основных параметров (D , n , Q , H).

Основным результатом лабораторных испытаний модельной гидротурбины является главная универсальная характеристика или просто универсальная характеристика, представляющая зависимости КПД η , величины от-

крытия направляющего аппарата α_0 и кавитационного коэффициента σ от приведенных величин частоты вращения n'_1 и расхода Q'_1 .

В результате энергетических испытаний модельной турбины получается таблица чисел, состоящая из величин угла поворота лопастей ϕ , открытия направляющего аппарата α_0 , приведенной частоты вращения турбины n'_1 , приведенного расхода воды Q'_1 и КПД турбины η , дополнительно могут содержаться значения кавитационного коэффициента σ и каких-либо других функций. Эти экспериментальные данные характеризуют зависимость КПД η от угла поворота лопастей ϕ и приведенных частоты n'_1 и расхода Q'_1 . [4]

Методика выбора конструкции гидротурбин

В качестве исходных данных задаются следующие величины:

Расчетный напор H_p , мощность N , высота отсасывания H_s , и характерные отметки верхнего и нижнего бьефов (расчетная, максимальная и минимальная).

Первым шагом будет являться определение расчетных напоров, в частности максимальный напор H_{\max} . Основываясь на полученном значении максимального напора подбираем разные типы модельных гидротурбин, которые удовлетворяют условиям исходным данным (их может быть несколько, если они удовлетворяют начальным данным).

Вторым шагом является определение номинального диаметра рабочего колеса D_1 для каждой модельной гидротурбины. Для определения расхода Q_1 и КПД η_m , которые используются в формуле по определению диаметра, необходимо определить «расчетную точку» в универсальной характеристике (пример характеристики представлен на рис. 1) каждой выбранной модельной турбины. Предварительно «расчетная точка» выбирается в области значений максимального приведенного расхода $Q'_{1\max}$ на линии, соответствующей оптимальной приведенной частоте вращения $n'_{1\text{opt}}$. После определения диаметра рассчитывается максимальное значение КПД натурной машины и частота вращения, уточняется расчетная приведенная частота вращения и определяется рабочая зона на универсальной характеристике.

Третьим шагом является определение «расчетной точки» как произведение пересчитанного КПД натурной гидротурбин и величины приведенного расхода. Далее определяем, в какой точке универсальной характеристики, расположенной на линии $n'_{1p} = \text{Const}$, произведение Q'_1 и КПД модели отвечает условию. Для найденной «расчетной точки» выписываем значения Q'_1, η_m и коэффициента кавитации σ .

Четвертым заключительным шагом является определение допустимой высоты отсасывания и дальнейшее сопоставление вариантов гидротурбин с выбором оптимального.

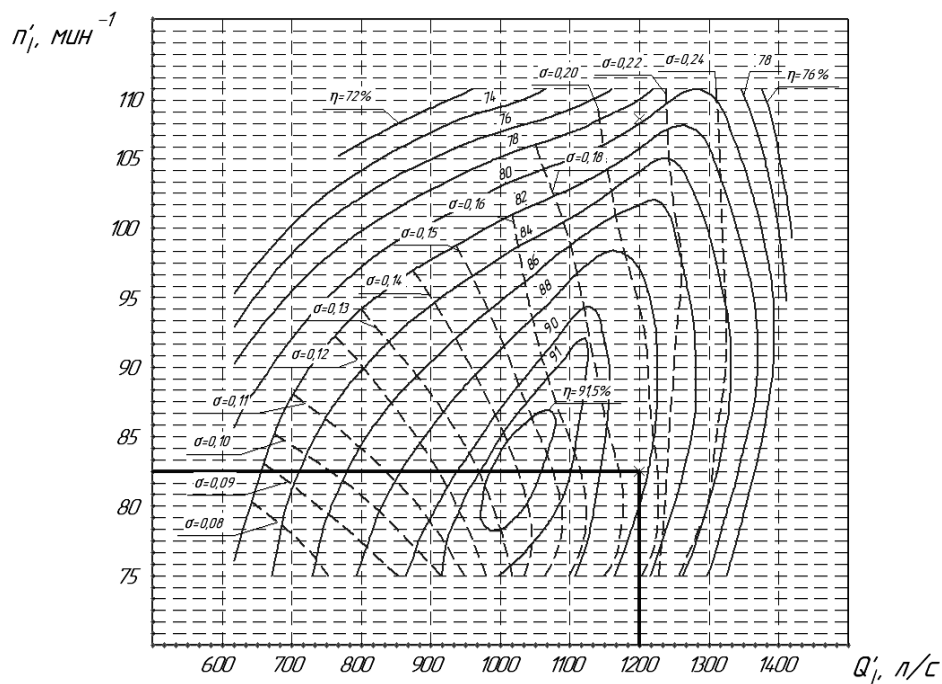


Рис. 1 - Универсальная характеристика гидротурбины РО 75-В.

В качестве примера применения разработанной методики был осуществлен выбор конструкции гидротурбины для следующих исходных данных: $H_p=57$ м, $N=85000$ кВт, $H_s=-4,5$ м.

Таблица 1.

Отметки бьефов плотины

	расчётная	максимальная	минимальная
▽НУ	125	145	103
▽ВУ	68	79	60

Определяется диаметр рабочих колёс:

$$D_1^* = \left(\frac{N}{9,81 \cdot Q'_1 \cdot \eta_M \cdot H_p^{1,5}} \right)^{0,5},$$

где значения Q'_1 , м³/с и КПД модельных турбин η_M определяются по универсальным характеристикам.

Для турбины ПЛ60-В расчётное значение диаметра равно 4 м, для РО75-В 4,5 м.

По универсальным характеристикам были определены расчётные точки турбин со следующими значениями Q'_1 , η_M и σ :

- для ПЛ70-В: $Q'_1=1,4$ м³/с; $\eta_M=0,849$; $\sigma=0,557$;
- для РО75-В: $Q'_1=1,2$ м³/с; $\eta_M=0,79$; $\sigma=0,214$.

Вычисляется допустимая высота отсасывания для ПЛ70-В: $H_s^{\text{доп}}=-7,99$ м, для РО75-В: $H_s^{\text{доп}}=0,905$ м. Сравниваются полученные варианты турбин, для дальнейших расчётов была выбрана турбина РО75-В, так как высота отсасывания $H_s^{\text{доп}}=-3,04$ м для этой турбины меньше необходимой $H_s=-4,5$ м.

Методика хорошо показывает себя при большом многообразии гидротурбин. Используя свою собственную универсальную характеристику модельной гидротурбины, представляется возможным оценить все представленные варианты гидроагрегатов и выбрать наиболее подходящий исходным данным.

Список литературы

[1] *Орго В.М.* Основы конструирования и расчета на прочность гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

[2] *Барлит В.В.* Гидравлические турбины. – Киев: Вища школа, 1977. – 360 с.

[3] *Кривченко Г.И.* Гидравлические машины: турбины и насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

[4] *Волков Ю.С., Мирошниченко В.Л., Салиенко А.Е.* Математическое моделирование универсальной характеристики поворотно-лопастной. – М.: Машинное обучение и анализ данных, 2014. – 11 с. [Текст: электронный] // Научная электронная библиотека ELIBRARY: электронно-библиотечная система. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22955462> (дата обращения: 16.02.2021).

Трутнев Дмитрий Сегреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: serious_912@mail.ru

Ильичев В.Ю. – к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivl2003@mail.ru

Лужецкий А.А., Ильичев В.Ю.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация: Статья посвящена разработке методики проектирования устройства, предназначенного для повышения КПД малоразмерной газотурбинной установки – пластинчатого теплообменника (рекуператора). Данный процесс проектирования должен решать несколько взаимосвязанных задач: достижение наибольшего КПД при получении приемлемых габаритов рекуператора и наименьшей его удельной стоимости. Все этапы разработки конструкции теплообменника производятся с использованием современных программных продуктов, в том числе разработанных авторами.

Ключевые слова: газотурбинная установка, регенерация, пластинчатый рекуператор, язык Python, библиотека CoolProp, SolidWorks.

Annotation: The article is devoted to the development of a design technique for a device designed to increase the efficiency of a small gas turbine plant – a plate heat exchanger (recuperator). This design process solves several interrelated problems: achieving the greatest efficiency when obtaining acceptable dimensions of the recuperator and its lowest unit cost. All stages of heat exchanger design development are made using modern software products, including those developed by the authors.

Keywords: gas turbine plant, regeneration, plate recuperator, Python language, CoolProp library, SolidWorks.

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ), отличающиеся компактностью и малой мощностью (до 1 МВт), получают всё большее распространение в энергетике отдалённых регионов, автономных предприятий и жилищных комплексов [1]. Для достижения конкурентоспособности таких установок важно обеспечить их высокую энергоэффективность (характеризуемую удельным расходом топлива на единицу вырабатываемой мощности или КПД). Данную задачу можно решить с помощью подогрева воздуха перед камерой сгорания за счёт использования теплоты уходящих из газовой турбины продуктов сгорания. Такой подогрев осуществляется с помощью специальных теплообменных аппаратов – рекуператоров [2]. С другой стороны, малоразмерные ГТУ должны быть сравнительно дешёвы для приобретения конечным пользователем, поэтому рекуператор не должен значительно увеличивать габариты и удорожать установку [3]. В настоящее время наиболее перспективными с точки зрения обеспечения перечисленных требований являются пластинчатые рекуператоры [4], оптимизация которых в процессе проектирования и является предметом данной работы.

Оптимизация заключается в уменьшении срока окупаемости средств, затрачиваемых на изготовление рекуператора, за счёт уменьшения его стоимости и повышения КПД ГТУ, и в обеспечении компактности теплообменника

и совершенства газодинамики протекающих в нём потоков газов.

Материал и методы исследования

В работе авторов [5] описан разработанный ими метод технико-экономического обоснования выбора материала теплообменных поверхностей, с рассмотрением примера его применения для рекуператора малоразмерной ГТУ 9И113М0,2 (наиболее подходящим материалом в данном случае оказалась сталь 15Х2М2ФБС), а также степени рекуперации r , при которой длина рекуператора получается приемлемой. Для осуществления указанного обоснования разработана программа на языке Python. Также разработан метод расчёта срока окупаемости спроектированного рекуператора.

Для дальнейшего развития методики проектирования пластинчатого рекуператора необходимо произвести следующие более глубокие исследования:

1. узнать влияние толщины пластин рекуператора и степени рекуперации на срок его окупаемости;
2. исследовать влияние толщины пластин и диаметров входных отверстий в них на прочность и деформацию;
3. рассмотреть изменение параметров потоков нагреваемой и нагревающей сред в пространствах между пластинами; по результатам их визуализации сделать выводы о совершенстве рассматриваемых конструкций.

Срок окупаемости дополнительного устройства – рекуператора в цикле ГТУ можно определить, сравнивая стоимость рекуператора и сумму сэкономленных денежных средств за счёт уменьшения расхода топлива. Результаты определения срока окупаемости рекуператора с помощью программы [5] при различных степенях регенерации и толщины пластин приведены на рис. 1.

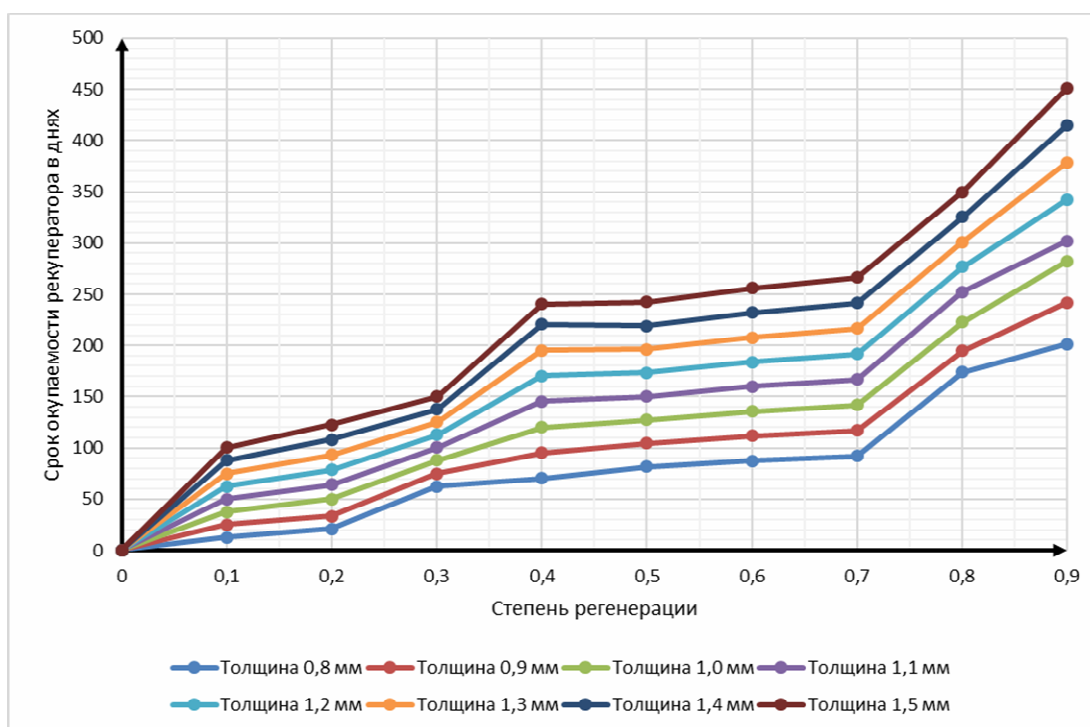


Рис. 1. График зависимости срока окупаемости пластинчатого рекуператора от степени регенерации и толщины пластин

Из графика видно, что срок окупаемости увеличивается с повышением степени регенерации и увеличением толщины пластин – это связано с большим темпом увеличением площади поверхности теплообмена и соответствующей стоимости рекуператора по сравнению с повышением КПД цикла и экономией денежных средств на топливный газ. При степени регенерации, большей 0,7, наблюдается резкий рост срока окупаемости, поэтому для рекуператора в данном случае рекомендуется не превышать это значение.

Для дальнейших исследований использовалась программа SolidWorks Simulation. Этот продукт предназначен для численного моделирования физических процессов с использованием метода конечных элементов, что позволяет выбрать наиболее удачный вариант конструкции без проведения натурального эксперимента на стендах. Такое математическое моделирование позволяет существенно сократить время проектирования новых изделий.

Для исследования характеристик пластинчатого массива был выделен блок, состоящий из двух соединённых пластин. Этого вполне достаточно для выявления качественного проявления различных эффектов и для первичной оптимизации. Для расчёта полной конструкции пластинчатого рекуператора требуются огромные вычислительные мощности, к тому же такое исследование на данном этапе не является необходимым.

При проведении исследования были получены следующие эпюры: напряжения, перемещения, деформации, запас прочности.

Исследование проводилось при изменении входных диаметров отверстий и толщины пластин. В качестве примера полученных результатов расчёта на рис. 2 приведен график изменения минимального коэффициента запаса прочности рассматриваемого блока.

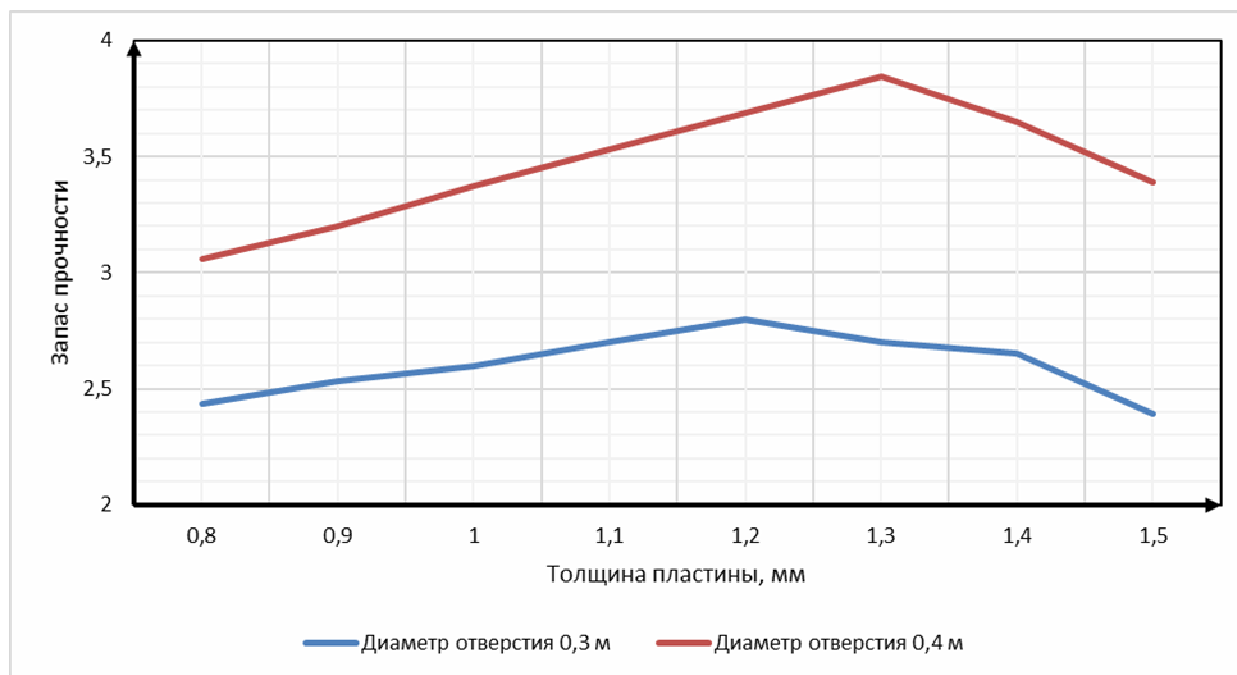


Рис. 2. График зависимости коэффициента запаса прочности пластин от их толщины и диаметров входных отверстий.

Из графика видно, что при увеличении диаметров входных отверстий коэффициент запаса прочности увеличивается, так как площадь, на которую действует распределенная нагрузка, создаваемая высоким давлением газа, уменьшается. Однако, во всех случаях минимальный коэффициент запаса прочности является достаточным, поэтому с точки зрения прочности (рис. 2) и обеспечения минимального срока окупаемости (рис. 1) целесообразно выбрать толщину пластин 0,8 мм. Меньшую толщину принимать нельзя, так как при этом, как показали дополнительные исследования, деформации пластин оказываются недопустимыми.

При помощи созданной программы и описанной выше методики были рассчитаны площади теплообмена для различных размеров пластин рекуператора. Исходя из полученных результатов были выведены графики зависимостей длины рекуператора от расстояния между пластинами. На рис. 3 показана такая зависимость для размера пластин 1000 мм на 1200 мм.

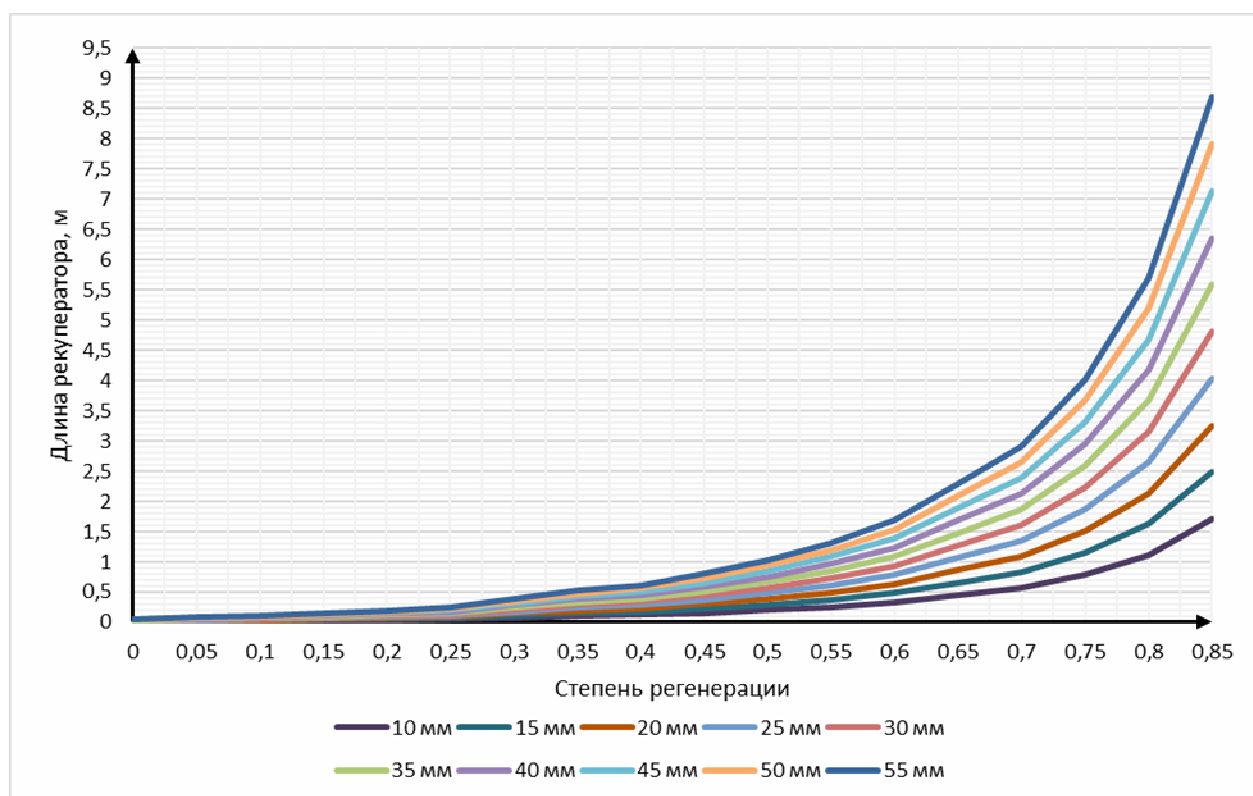


Рис. 3. График зависимости длины рекуператора от степени регенерации для различных расстояний между пластинами размером 1000x1200 мм.

Зависимости, подобные рис. 3, были построены для тех же расстояний между пластинами, но для размеров пластин 1000x700 мм и 800x600 мм.

Из полученных графиков видно, что при уменьшении размеров пластин и увеличении расстояния между ними возрастают осевые габариты рекуператора, что значительно увеличивает количество ходов для рабочих тел внутри рекуператора, из-за чего повышаются гидравлические потери (потери давления).

Максимальная длина рекуператора, подходящая для малоразмерной ГТУ 9И113М0,2, составляет приблизительно 1400 мм. При увеличении рас-

стояния между пластинами пропускная способность межпластинчатого пространства увеличивается. Исходя из данных соображений, для исследования изменения параметров потоков в рекуператоре, выбраны три конструкции:

1. Размеры пластин 1200x1000 мм, расстояние между пластинами 20 мм. Рассчитанная длина рекуператора составила 1080 мм.

2. Размеры пластин 1000x700 мм, расстояние между пластинами 15 мм. Длина рекуператора составила 1400 мм.

3. Размеры пластин 800x600 мм, расстояние между пластинами: 10 мм. Длина рекуператора составила 1410 мм.

Моделирование изменения параметров потоков нагревающих и нагреваемых сред в рекуператоре, произведённое с помощью программы Flow Simulation, показало существенные недостатки конструкций №2 и №3. В проточной части образуются запирающие потоки, обратные течения; потери давления составляют более 5%.

Конструкция №1 показала удовлетворительные результаты: завихрений по ходу течения рабочих тел не наблюдается, потери давления составляют менее 5%, расхождение с расчетными с помощью программы [5] данными менее 1%. Результаты визуализации изменения давлений нагревающей и нагреваемой сред для конструкции №1 приведены на рис. 4.

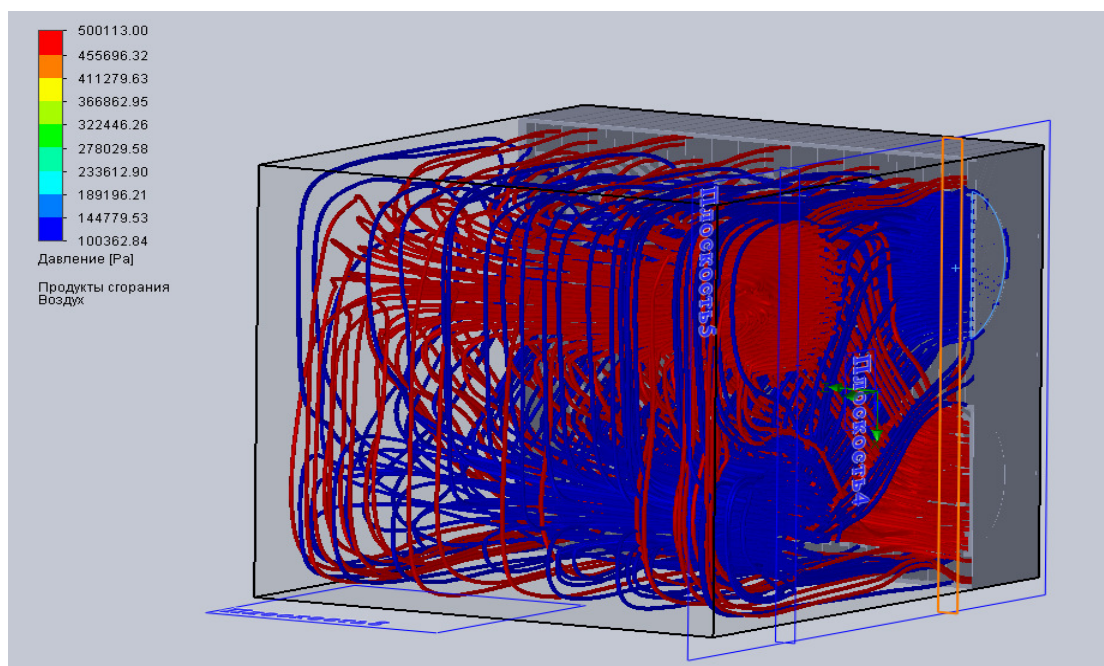


Рис. 4. Эпюра изменения давлений потоков.

Заключение

В ходе описанного исследования разработаны процедуры, позволяющие оценить степень совершенства конструкции пластинчатых рекуператоров и выбрать наилучшую конструкцию их рассматриваемых вариантов.

Рассмотрен пример такой оценки для пластинчатого рекуператора мало-размерной ГТУ 9И113М0,2, позволивший выбрать конструкцию с размерами пластин 1200x1000 мм и расстоянием между пластинами 20 мм. При этом удалось добиться минимальной потери давления обменивающихся теплом

сред, а рассчитанная длина рекуператора составила 1080 мм, что значительно меньше допустимой для данной установки. Таким образом, разработанный теплообменник обеспечивает минимальный срок окупаемости капитальных вложений в его изготовление (за счёт существенной экономии топлива при повышении КПД газотурбинной установки) при обеспечении достаточной прочности конструкции и минимальных потерь давления протекающих через него сред.

Проект осуществлён с применением современных средств программного математического моделирования [6, 7], позволяющих существенно сократить временные и трудовые затраты проектировщиков.

Список литературы

[1]. *Беляев В.Е., Беляева С.О., Трофимович И.В.* Применение малоразмерных ГТУ в системах децентрализованного энергоснабжения. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т.3. – № 2 (45). – С. 59-61.

[2]. *Кузьмичёв В.С., Омар Х.Х., Ткаченко А.Ю.* Способ повышения эффективности газотурбинных двигателей для наземного применения за счет регенерации тепла. // Вестник Московского авиационного института. – 2018. Т. 25. – № 4. – С. 133-141.

[3]. *Завальный Ф.Г., Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В.* Техничко-экономическое обоснование применения газотурбинных двигателей на маневровых локомотивах. // Научное обозрение. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 10-14.

[4]. *Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А.* Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей. // Труды МАИ. – 2013. – № 71. – С. 13.

[5]. *Ильичев В.Ю., Лужецкий А.А.* Методика технико-экономического обоснования применения пластинчатых рекуператоров в малоразмерных ГТУ. // Научное обозрение. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 40-45.

[6]. *Ильичев В.Ю., Юрик Е.А.* Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python. // Научное обозрение. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 14-18.

[7]. *Абрамов Д.Д., Кислякова Т.В., Пальчикова Г.С.* Особенности создания в SolidWorks 3D моделей механизмов с целью повышения эксплуатационных качеств. // В сборнике: Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 2019. – С. 10-19.

Лужецкий Александр Александрович – магистрант кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aleksandr.luzheczkij.98@gmail.com

Ильичев В.Ю. – к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivl2003@mail.ru

Даньшин М.С., Ильичев В.Ю.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Газотурбинные установки (ГТУ) являются основным типом привода газотранспортной системы России [1]. Однако большая часть из них к настоящему времени морально и физически устарела, что приводит к чрезмерным расходам газа на собственные нужды [1, 2]. К основным способам повышения экономичности ГТУ можно отнести следующие мероприятия:

- увеличение температуры газа на входе в турбину, что связано с поиском новых материалов для лопаток турбин и методов их охлаждения;
- использование ступенчатого расширения с промежуточным подогревом рабочего газа;
- повышение к.п.д. отдельных элементов ГТУ (компрессора, газовой турбины, камеры сгорания).

Из способов улучшения параметров ГТУ наиболее перспективным является применение воздухонагревателей (регенераторов) для утилизации теплоты отработавших в турбине газов [1].

При проектировании регенераторов большое внимание уделяется простоте и компактности конструкции. С другой стороны, важно, чтобы гидравлические сопротивления регенератора были по возможности минимальными, так как выгоды от применения регенерации в значительной степени снижаются из-за дополнительных сопротивлений, вызванных введением регенератора.

Наибольшее распространение получили трубчатые регенераторы, рассматриваемые в данной статье [3].

Целью работы является проектирование оптимальной по основным критериям конструкции трубчатого 4-ходового рекуператора для малоразмерного ГТД производства ПАО «КАДВИ» мощностью 200 кВт. Двигатель имеет габаритные размеры 1270 x 765 x 900 мм, поэтому проектируемый рекуператор должен быть компактным.

Первым этапом проектирования являлся расчет необходимых характеристик рекуператора: степени регенерации, температуры и давления на выходе, площади поверхности теплообмена, а также габаритных размеров.

Исходные данные:

- $p_{1\text{возд}} = 588000$ Па – давление воздуха на выходе из компрессора
- $t_{1\text{возд}} = 152$ С – температура воздуха на выходе из компрессора
- $t_{1\text{газ}} = 413$ С – температура продуктов сгорания на выходе из турбины
- $G_{\text{возд}} = 2$ кг/с - расход воздуха
- $G_{\text{возд}} = 2,015$ кг/с - расход продуктов сгорания
- $r = 0.5$ – степень регенерации (выбрана по предварительным расчётам)

Для сравнения выбраны 3 конструкции, исходя из ряда рекомендуемых соотношений внутреннего и наружного диаметров d_2/d_1 и относительных шагов трубок S/d_2 .

Для расчета основных параметров была использована САПР система – Mathcad. В ходе расчетов были получены параметры на выходе:

По воздуху:

- $t_{2\text{возд}} = 282,5 \text{ С,}$
- $p_{2\text{возд}} = 582,12 \text{ кПа.}$

По газу:

- $t_{2\text{газ}} = 287,4 \text{ С,}$
- $p_{2\text{газ}} = 105,9 \text{ кПа.}$

Оставшиеся данные сведем в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики рассматриваемых вариантов рекуператоров

	1 вариант	2 вариант	3 вариант
d_2/d_1	25/23	25/23	15/13
S/d_2	1,32	2	2
$F_{\text{пов-ти ГО, м}^2}$	41,88	42,18	63,18
$L_{\text{труб, м}}$	1,13	1,16	0,8
$\alpha_{\text{возд, Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}}$	757	532,2	1361
$\alpha_{\text{газ, Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}}$	50,17	50,1	168,4
$K, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	47	45,79	149,3

После теоретического расчета в Mathcad с целью верификации результатов произведено 3D моделирование данных конструкций в среде SolidWorks и в среде Flow Simulation. При задании граничных условий использовались такие параметры как: расход на входе/выходе, температура на входе, давление окружающей среды.

Результаты полученных в результате моделирования теплофизических параметров на выходе сведем в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты моделирования рекуператоров

	1 вариант	2 вариант	3 вариант	Расчётная
$t_{2\text{возд, } ^\circ\text{С}}$	254,9	259,14	250,7	282,5
$t_{2\text{газ, } ^\circ\text{С}}$	281,6	280,1	294	287,4
$p_{2\text{возд, кПа}}$	519,6	544,8	510,1	582,1
$p_{2\text{газ, кПа}}$	105,410	105,125	102,400	105,9

Из табл. 2 видны отклонения теоретических данных от данных, полученных в Flow Simulation. В некоторых случаях они достигают 14% (хотя в большинстве случаев намного меньше), что объясняется неравномерностями реальных потоков и универсальностью теоретического метода (без учёта конструктивных особенностей рекуператоров). Поэтому, можно считать полученные результаты достаточно точными для рассматриваемой задачи оптимизации. По конечной температуре газа видно, что наиболее эффективным по процессу теплообмена является вариант 2 (однако не сильно отличается от варианта 1), он же характеризуется наименьшими потерями давления воздуха.

Габаритные размеры, полученные из 3D-модели, занесем в табл. 3.

Таблица 3.

Габаритные размеры рекуператоров

	1 вариант	2 вариант	3 вариант
Длина, мм	1657	1357	1907
Ширина, мм	1286	1835	1835
Высота, мм	1907	1910	1910

Из таблицы видно, что наименьший объем имеет вариант 1. Как было сказано выше, уменьшение объема является очень важным для малоразмерной ГТУ.

На последнем этапе была оценена стоимость сравниваемых конструкций рекуператоров. Результирующие данные приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты расчета срока окупаемости

	Масса, кг	Стоимость, руб	Выгода в год, руб	Окупаемость, лет	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
1	1309	33415	92642	1,19	1657	1286	1357
2	2356	60141	51013	2,04	1357	1835	1835
3	2740	69944	43107	2,37	1907	1853	1835

По итогу всех расчетов был сделан вывод, что по совокупности характеристик тепловая эффективность-габариты-стоимость и по степени их важности для рассматриваемого малоразмерного двигателя оптимальным является первый вариант конструкции рекуператора.

Список литературы

[1]. Сафонов Е.В., Бромер К.А., Шульц А.О. и др. Особенности конструкции эффективных рекуператоров микрогазотурбинных энергоустановок. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2013. – С. 1-5.

[2]. Акулов К.А. Методические указания для практических занятий по дисциплине «Газотурбинные установки» для студентов, обучающихся по направлению 131000.62 «Нефтегазовое дело» всех форм обучения. Часть II. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2013. – С. 1-32.

[3]. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей. // Электронный журнал «Труды МАИ». – Выпуск № 71 – 2013 – С. 1-30.

[4]. Аронсон К.Э., Блинков С.Н., Брезгин В.И. и др. Теплообменники энергетических установок. – Екатеринбург: УрФУ, 2015, – гл.№6.

Даньшин Максим Сергеевич – студент, магистрант КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: mdanshin37@gmail.com

Ильичев В.Ю. – к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivl2003@mail.ru

Егоров Е.В., Шевелев Д.В.

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Ключевыми задачами при проектировании экспериментального стенда, являются его надёжная и бесперебойная работа, а также максимально возможная продолжительность работы стенда.[1] В ходе проектирования компоновки стенда было принято решение запуска в основную пневмолинию воздуха, сжимаемого в компрессоре ТКР, для увеличения продолжительности работы стенда.

Для реализации данного решения необходимо рассчитать и спроектировать газовый эжектор, который позволил бы использовать воздух сжимаемый в компрессоре ТКР в работе стенда. Газовым эжектором называется аппарат, в котором полное давление газового потока увеличивается под действием струи другого, более высоконапорного потока. Передача энергии от одного потока к другому происходит путем их турбулентного смешения. Необходимость применения эжектора, обуславливается тем, что поток сжатого воздуха из ресивера имеет большую скорость и при прямом включении потока с компрессора ТКР, велика вероятность образования противотечения в пневмолинии, что в свою очередь приведет к аварийной ситуации.

Основываясь на методику расчета классического газового эжектора, описанную в работе Г.Н. Абрамовича [3] был произведен расчет в результате, которого были получены необходимые параметры для следующего этапа проектирования (табл. 1).

Таблица 1.

Параметры рабочего тела в характерных сечениях.

	Вход в эжектор	Вход в сопло	Выход из эжектора	Выход из сопла
Массовый расход	0,042 кг/с	0,0009 кг/с	0,0429 кг/с	0,0009 кг/с
Скорость	30,7 м/с	2 м/с	33 м/с	34,4 м/с

В качестве прототипа для дальнейшего проектирования и оптимизации был выбран эжектор (рис.1.), состоящий из: внешнего корпуса, штуцера 32 мм для подвода воздуха из компрессора ТКР; штуцера 25мм переходной втулки и внутреннего корпуса с установленной 6 мм трубкой, для подвода воздуха из ресивера; переходника и ПВХ трубы для отвода воздуха.

Следующим этапом станет продувка в CFD- пакете[2] САД-системы SolidWorks для оптимизации и доработки конструкция модуля газового эжектора, которая в дальнейшем будет изготовлена и установлена в систему экспериментального стенда.

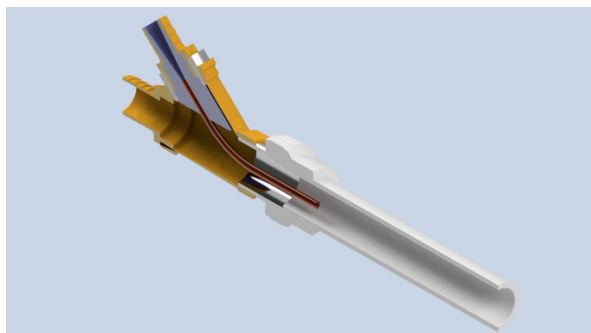


Рис. 1. Эжектор

Список литературы

[1]. Каминский В.Н., Каминский Р.В., Лазарев А.В. и др. Создание стендов для контрольно-исследовательских испытаний турбокомпрессоров // Известия МГТУ. 2012. №2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-stendov-dlya-kontrolno-issledovatel'skih-ispytaniy-turbokompressorov> (дата обращения: 25.03.2021).

[2]. Дерюгин Ю., Тетерина И., Карпенко А. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках // ЛитРес, 2017 г. – 505с.

[3] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976

Егоров Евгений Владиславович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: eugene.egorov98@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович – к.т.н., КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: denis.v.shevelev@gmail.com

Мусатов Д.А., Ильичёв В.Ю.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Современные цифровые технологии проникли во все сферы деятельности человека, в том числе и в исследовательскую, конструкторскую и производственную деятельность. Поэтому навыки разработки программных продуктов и умение ими пользоваться очень востребованы на нынешнем рынке труда.

В проектно-конструкторской и научной деятельности уже практически нигде не обходятся без применения компьютерных технологий и специальных программ. Так же и при проектировании паровых и газовых турбин, используется большое количество различных расчётов и данных экспериментов, библиотек, софта и прочего. Поэтому задача разработки программ для ускорения, упрощения и повышения точности результата проектирования и оптимизации энергетических установок является актуальной для исследования [1].

На данный момент уже написана программа расчёта разбивки теплоперепадов. В задачи следующего исследования входит разработка программы для автономного расчёта ступени паровой турбины с использованием экспериментальных данных из разных источников и представления конечных результатов в понятной графической форме [2].

Также исследуются широкие возможности применения библиотек встраиваемого языка программирования Python для энергомашиностроительной отрасли. Он является простым в использовании высокоуровневым языком, и способен на осуществление достаточно сложных алгоритмов в машиностроении, имеет множество дополнительных библиотек и баз данных, которые можно с успехом использовать в процессе проектирования оптимальных конструкций.

Python прекрасно подходит для энергомашиностроительной отрасли, так как позволяет использовать подключаемые библиотеки, необходимые для расчётов, создания интерфейса пользователя, вывода графики. Одними из самых полезных являются библиотеки для определения теплофизических свойств рабочих тел, например CoolProp. В турбинных установках это могут быть не только свойства воды и водяного пара, но и фреонов, используемых в органических циклах, или продуктов сгорания топлива, которые поступают в газовую турбину.

На данный момент на языке Python создаётся программа по расчёту промежуточной ступени паровой турбины с применением аппроксимационных зависимостей, приведённых в методиках расчёта [3]. При этом визуализируются основные графические данные, получаемые в результате расчёта

промежуточной ступени – треугольники скоростей и профили сопловых и рабочих лопаток.

Расчёт состоит из следующих этапов:

- - ввод исходных данных;
- - определение основных параметров пара перед ступенью и за ней;
- - принятие оптимальных значений коэффициентов;
- - расчёт располагаемого теплоперепада на ступень;
- - определение диаметра ступени;
- - расчёт основных параметров ступени;
- - определение уточнённого значения коэффициентов;
- - организация расчётного цикла с помощью функции «while» для пересчёта реальных коэффициентов и окончательного определения параметров;
- - определение и сверка лопаточного КПД [3].
- - построение треугольников скоростей с использованием библиотеки Mathplotlib [4].

В перспективе исследований необходимо создать программу для полного расчёта проточной паровой турбины по средней линии тока, в который входит:

- - определение всех начальных и конечных параметров;
- - расчёт мощности и расхода пара;
- - расчёт регулирующей ступени (ступени скорости);
- - определение количества и средних диаметров ступеней давления, разбивка теплоперепада турбины по ступеням;
- - поступенчатый расчёт теплофизических параметров по средней линии тока (по средним диаметрам ступеней) с целью определения длин лопаток, внутреннего КПД ступеней и пр.;
- - профилирование лопаток ступеней (если это необходимо);
- - разработка всей конструкции турбины с обязательным расчётом сопловых и рабочих лопаток на прочность [4].

Для дальнейшего развития программы помимо используемой ранее графической библиотеки Mathplotlib, с помощью которой строились графики и треугольники скоростей, для Python будет использован модуль ZenCad, так как несмотря на то, что Mathplotlib позволяет строить 3d модели, его возможностей недостаточно для построения сложных поверхностей лопаток.

ZenCad – это библиотека параметрического 3d моделирования. Библиотека создаёт 3d модели путём написания скрипта. В её основе лежит система OpenScad. В отличие от OpenScad, библиотека использует геометрическое ядро граничного представления OpenCascade и язык общего назначения Python.

ZenCad может использоваться как самостоятельная система быстрого прототипирования для целей макетирования или 3d печати, так и в комплексе с библиотеками экосистемы Python. Позволяет строить очень сложные поверхности и при этом сохранять в удобных для редактирования и дальнейше-

го исследования форматах, например, для 3d печати или экспорта в Solid-Works, КОМПАС-3D, AutoCAD и др.

Таким образом, с помощью описанных выше средств можно существенно автоматизировать и усовершенствовать расчёт проточной части паровой турбины.

Список литературы

[1]. *Прохоренок Н., Дронов В.* Python 3 и PyQt 5. Разработка приложений // БХВ-Петербург, 2018 г. – 746 с.

[2]. *Саммерфилд М.*, Программирование на Python 3 Подробное руководство // Символ-Плюс, 2009 г. – 238 с.

[3]. *Костюк А.Г.* Паровые и газовые турбины // М.:Энергоатомиздат, 1985 г. – п.5.4. – С. 77-82

[4]. *Щегляев.А.В.* Паровые турбины // М.:Энергия 1967 г. – С. 105-129

Мусатов Давид Александрович – студент, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248030, Россия. E-mail: davidmusatoo@gmail.com

Ильичев Владимир Юрьевич – к.т.н., КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: patrol8@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТУПЕНЕЙ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Применение околозвуковых и сверхзвуковых ступеней в компрессоре позволяет увеличить его производительность, повысить напор всех ступеней и при заданном значении $\pi_{k\Sigma}^*$ уменьшить число ступеней, а следовательно, уменьшить габариты и массу компрессора. Для обеспечения эффективной работы околозвуковых и сверхзвуковых ступеней с высоким КПД необходимо специальное профилирование лопаток. Проведенный анализ развития двигателей и прогнозов научно-технических достижений в двигателестроении показал весьма широкий подход в области расчета и проектирования сверхзвуковых ступеней компрессора.

Изучив отечественную литературу по данному вопросу, можно выделить основные особенности для профилирования лопаток сверхзвуковых ступеней компрессора [1]. Для создания профиля лопатки сначала по выбранным значениям густоты решетки на периферии, удлинения лопаток и отношения хорды профиля на периферии и втулки определяется число лопаток рабочего колеса z . Величину отношения хорды u на периферии к размеру хорды u втулки предварительно выбирают, ориентируясь на выполненные конструкции. Величина $\frac{b_k}{b_{вт}}$ для рабочего колеса первой сверхзвуковой ступени при $\bar{N}_T = 0,2$ может быть принята равной 1,2 – 1,35, а при $\bar{N}_T = 0,38$ может быть равна 1,35 – 1,5. Далее производится расчет геометрических элементов в следующем порядке:

1. Величина хорды «b».

2. Максимальная относительная толщина профиля $\bar{C} = \frac{C_{\max}}{b}$.

Величину \bar{C} на периферии рабочего колеса первой сверхзвуковой ступени целесообразно выбирать равной 0,020 – 0,025, а для второй сверхзвуковой ступени 0,025 – 0,03. При этом величина \bar{C} у втулки и закон изменения \bar{C} по высоте лопатки определяется в первую очередь из прочностных соображений.

3. Угол заострения лопатки γ входного участка профиля.

Величина $\gamma = 6^\circ$ соответствует величине $\bar{C} = 0,026$.

4. Угол атаки i .

Угол атаки i должен плавно изменяться по высоте лопатки.

5. Угол отставания потока δ

Величину угла δ задают линейно изменяющейся по высоте лопатки от 1 до 2 град, на периферии до 10 град у втулки. Большие значения величины относятся к рабочим колесам с большим углом изгиба профиля.

- 1) Конструктивные углы лопатки β'_1, β'_2 и угол изгиба профиля ε
- 2) Средняя линия профиля состоит из прямолинейного начального участка L и сопрягающейся с ним дуги окружности радиуса R .

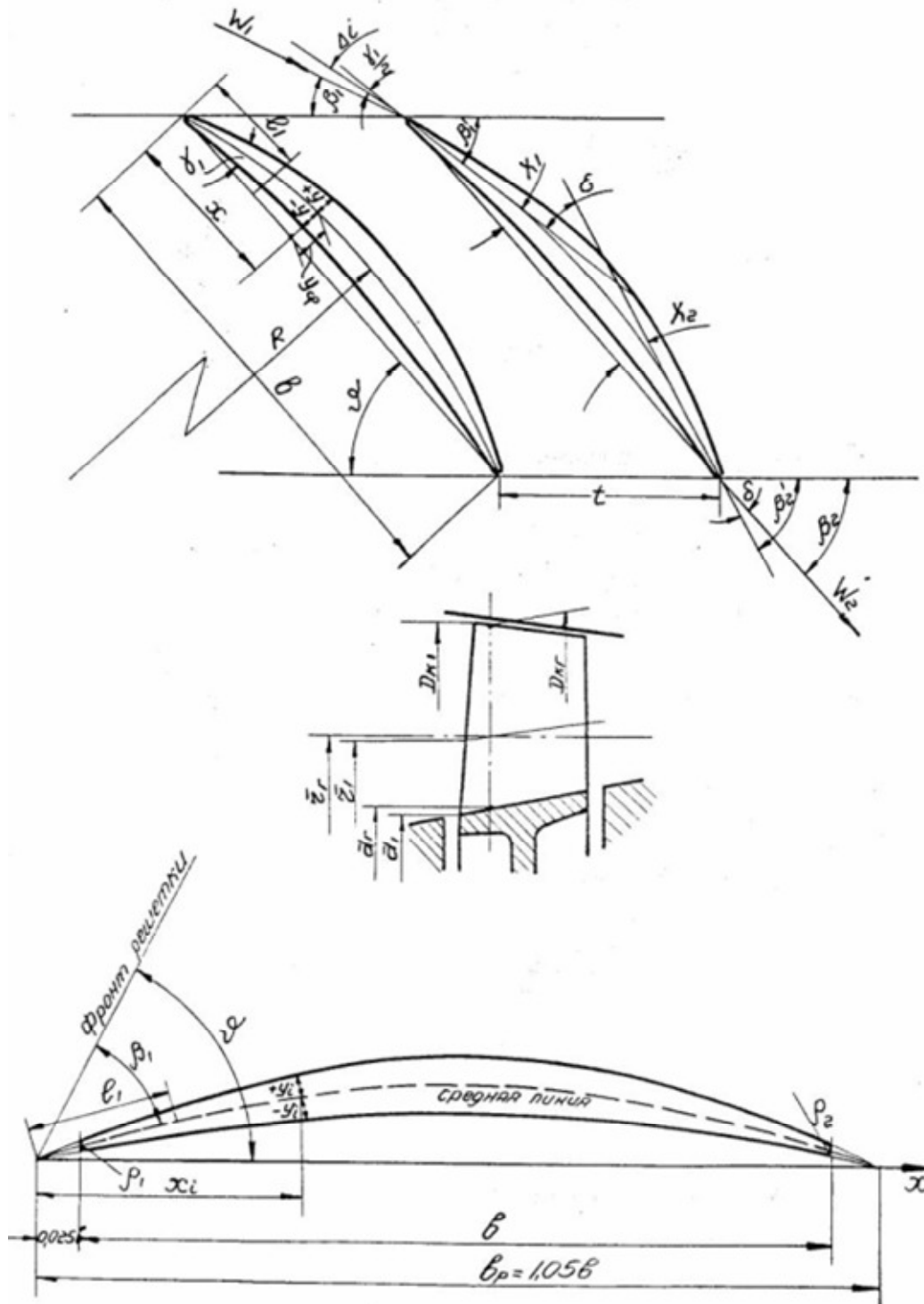


Рис 1. Геометрические параметры решетки сверхзвукового лопаточного венца

В качестве исходного профиля принимается симметричный профиль, координаты данного профиля представлены во множестве исследовательских работ.

К основным особенностям профилей описанных в литературе для этих ступеней являются, во-первых, их меньшая относительная толщина, которая может на конце лопатки достигать 2 – 2,5 %, и, во-вторых, заостренные входные кромки с углом заострения $\gamma = 4 - 6^\circ$ и радиусом скругления входных и выходных кромок 3 – 10 % от величины хорды.

Угол атаки на входе в рабочее колесо принимается положительным и составляет $2 - 4^\circ$. Угол отставания несколько меньше на периферии, а у втулки достигает $9 - 10^\circ$, изменяясь примерно по линейному закону [2].

При расчете параметров по высоте лопатки сверхзвуковой (околозвуковой) ступени применяют те же законы, что и для дозвуковой ступени [3]. Предпочтительным является закон постоянства циркуляции, так как вследствие постоянства осевой скорости по высоте проточной части улучшаются условия работы последующих ступеней. Углы атаки для расчетных сечений по высоте лопатки в сверхзвуковых ступенях выбираются в диапазоне от 0° до $+1^\circ$ (в корне до $+3^\circ$), т.е. меньше, чем в дозвуковых ступенях. При этом угол атаки у сверхзвукового профиля отсчитывается от касательной к спинке профиля на входе в него.

Рассчитав в каждом расчетном сечении угол входа потока β_{1i} и, выбрав величину угла атаки, определяем геометрический угол входа профиля $\beta'_{1i} = \beta_{1i} + i_i$.

Геометрический угол выхода профиля β'_{2i} определяется по выражению:

$$\beta'_{2i} = \beta_{2i} + i_i,$$

где δ_i - угол отставания потока на расчетных радиусах.

Угол отставания на каждом расчетном радиусе может быть определен по следующему выражению:

$$\delta_i = \delta_{xi} + \Delta\delta_{\varepsilon i} + \Delta\delta_{Mi} + \Delta\delta_{Ci}.$$

Величина $\frac{a}{b}$, характеризующая положение максимального прогиба, на периферийных сечениях выбирается в пределах 0,5 – 0,6. В области втулки рабочего колеса, где скорости могут быть дозвуковыми, величина $\frac{a}{b}$ может быть уменьшена до 0,45.

В данной литературе для сверхзвуковых профилей максимальная толщина $\bar{C}_i = \frac{C_{\max i}}{b_i}$ выбирается в пределах:

0,02 – 0,03 – на периферии лопаток;

0,05 – 0,07 – на среднем диаметре;

0,08 – 0,12 – у корня лопаток.

В данной работе рассматривается вариант, когда средняя линия очерчивается по дуге окружности. В большинстве исследований говорится о том, что в сверхзвуковых профилях радиус входной и выходной кромок выпол-

няются одинаковыми. В качестве базового профиля в данном случае принимается симметричный аэродинамический профиль. После построения сверхзвукового профиля приводится следующая рекомендация, эквивалентный диффузор должен иметь угол раскрытия не более $\Theta_0 = 10 \div 12^\circ$ и не быть бочкообразным. Корректировка диффузора в этом случае, а, следовательно, и профиля лопатки, должна проводиться за счет изменения очертания вогнутой поверхности профиля.

В зарубежной литературе описывается, что применение в качестве базового профиля симметричный профиль нецелесообразно. Так как сверхзвуковые каскады, использующие механизм сжатия ударной волны, подвержены своеобразным источникам потерь: росту энтропии поперек удара, механизму взаимодействия ударных волн с пограничным слоем и скачкам уплотнения. На протяжении многих лет наблюдалась тенденция к минимизации потерь, действующих как на уменьшение числа Маха перед ударом, так и на характер ударной волны, переходящей от нормального к косому удару в ступени. Ослабленный удар мог бы, в принципе, уменьшить ударную границу – более позднее взаимодействие тоже.

По большинству зарубежных исследовательских работ, можно сделать вывод, что при расчете сверхзвуковых ступеней, несмотря на потерю напора в ударных волнах, КПД может достигать более 90% для сложных ступеней с $\pi_k^* = 3$. Однако, для достижения цели необходимо решить несколько серьезных проблем. Неясно, всегда ли можно сделать оптимальный угол на входе в каскад. Ударная волна на поверхности лопаток провоцируя отрыв потока, может снизить эффективность дозвуковой части каскада более серьезно, чем это было предсказано выбором коэффициента потерь. До сих пор не решена и проблема эффективного трехмерного проектирования рабочих колес и статоров для высоких сверхзвуковых ступеней [4].

Для чисел Маха до $1,4-1,5^\circ$, используют такие профили как двухдуговые (ДСА), многодуговые (МСА) и J-образные профили, которые широко используются на протяжении многих лет для снижения всех перечисленных выше потерь [5].

Чтобы работать при более высоких числах Маха на входе при сохранении эффективности, нормальную ударную волну следует избегать и заменять несколькими косыми ударными волнами. Совокупность косых ударов может производить одинаковое повышение давления более эффективным способом, используя либо внутреннее сжатие, либо внешнее сжатие, в зависимости от того, происходит ли сжатие внутри прохода или во входной области. Многолетний опыт работ фактически показал, что внешнее сжатие было гораздо более эффективным. При этом надо стремиться обеспечить такое профилирование, чтобы скачки не вызывали отрыва пограничного слоя. Это достигается в случае прямолинейного входного участка на спинке, острой передней кромки и малой клиновидности входного участка профиля, т. е. если поток

на входе не будет претерпевать изменений. В литературе приводится данный вид сверхзвуковой решетки компрессора, которая представлена на рис. 2.

Параметры данной лопаточной решетки:

1. Хорда (C) -170 мм;
2. Шаг (расстояние между хордами) ($\left(\frac{S}{C}\right) - 0,65$);
3. Угол установки $\gamma = 148,1^\circ$;
4. Максимальная толщина профиля ($\left(\frac{t_{\max}}{C}\right) - 0,035$);
5. Расстояние между радиусами ($\left(\frac{r_{LE}}{C}\right) - 0,0025$).

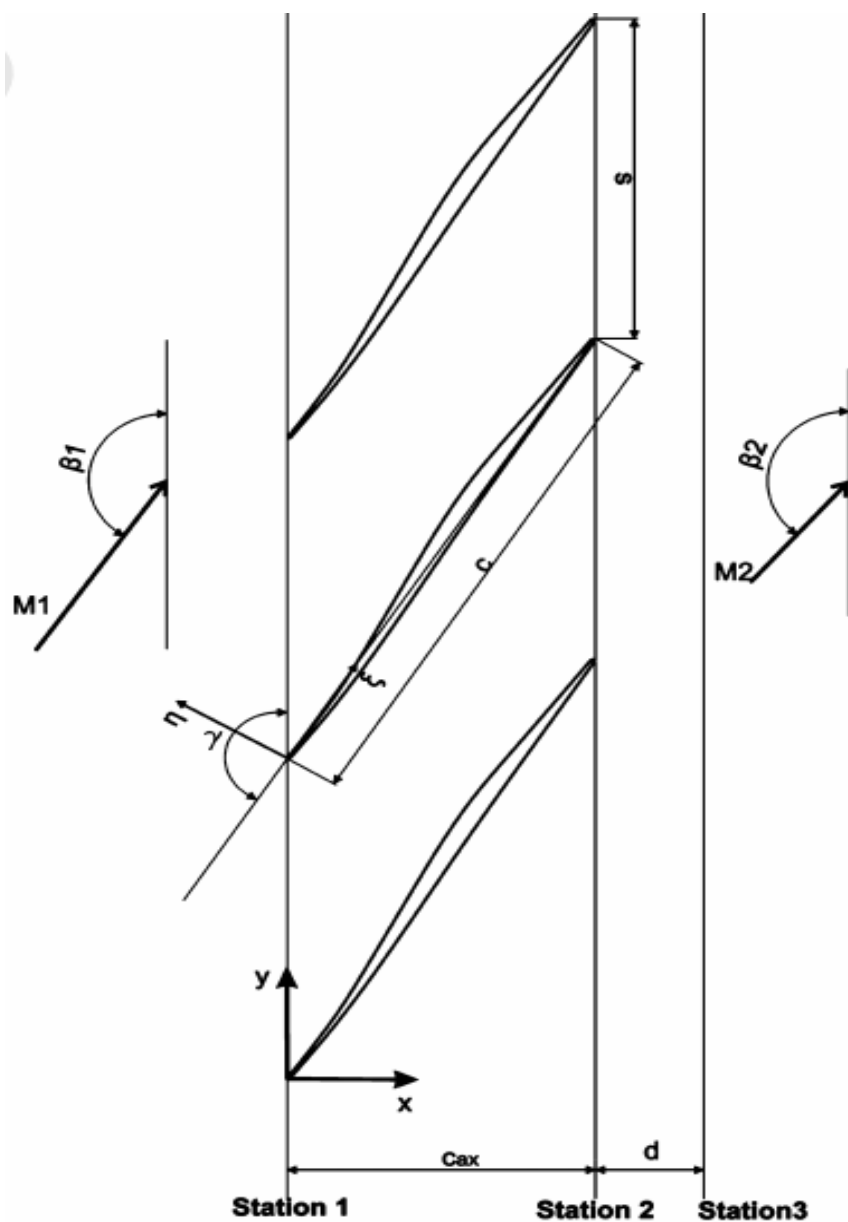


Рис 2. Сверхзвуковые профили РК осевого компрессора

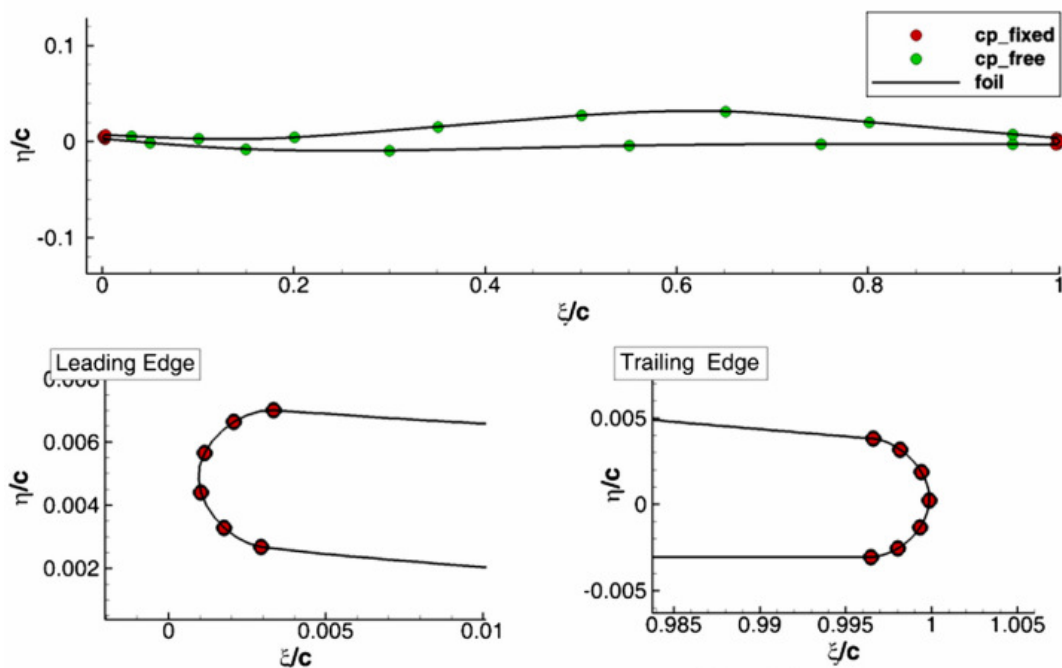


Рис 3. Сверхзвуковой профиль лопатки

Дуговой профиль – это профиль лопатки, средняя линия которого описывается одной дугой окружности, частный случай двухдугового профиля. Спинка и корытце профиля также описываются дугами окружности, параметры которых определяются аналогично двухдуговому профилю. В зарубежной литературе это Double Circular Arc blade section (DCA) [6].

В отечественной литературе приведена методика построения только дугового профиля, а о двухдуговом профиле в свободном доступе имеется недостаточное количество информации для воспроизведения этого типа профиля лопаток.

Рассмотрев информацию по теме сверхзвуковых ступеней компрессора, можно сделать вывод, что оптимальным по параметрам и по доступности методик создания профиля является Double Circular Arc blade section (DCA) т.е. двухдуговой профиль.

Список литературы

- [1]. Комиссаров Г.А., Микиртычан В.М., Хайт М.В. Методика газодинамического расчета осевого компрессора. ЦИАМ, 1961. – 132 с.
- [2]. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2003. – 344 с.
- [3]. Емин О.Н, Карасева В.Н., Ржавина Ю.А. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров : учебное пособие. – 2003. – 146 с.
- [4]. Giovanni Venturelli., Ernesto Benini. Kriging-assisted design optimization of S-shape supersonic compressor cascades, – 2016 – 23 с.

[5]. *T. Sonoda, M. Olhofer, T. Arima, B. Sendhoff*, A new concept of a two-dimensional supersonic relative inlet Mach number compressor cascade, in: Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2009, Power for Land, Sea and Air, June 8–June 12, 2009.

[6]. *X. Sun, S. Yang, Q. Zhao*, Shock loss model and blade profile optimization design of a supersonic cascade, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G, J. Aerosp. Eng. 229 (7) (2015) 1325–1329.

Качурин Алексей Витальевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: alek9024@gmail.com

Гридчин Николай Викторович – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: gridchin2610@gmail.com

ТИПОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПТУ И ТГ

Сравнительный анализ типов систем автоматического управления для ПТУ. В зависимости от типа, мощности и предполагаемого характера работы турбины оснащаются различными системами регулирования и защиты. Конструктивное исполнение отдельных узлов и устройств этих систем также различно у разных турбостроительных заводов. Однако в любой системе регулирования практически используются принципиально одинаковые структурные схемы и способы решения поставленных задач. Такое принципиальное единообразие диктуется директивными требованиями к САР с точки зрения качества и надежности их работы, свойствами турбоагрегата как объекта регулирования.

Среди широкого круга задач автоматического регулирования параметров ПТУ и ТГ наиболее важными являются задачи автоматического поддержания с требуемой точностью заданной частоты вращения (ЧВ) ротора турбины, заданного давления свежего пара перед ПТУ, а также некоторых теплотехнических параметров в отдельных контурах регулирования. Для решения этих задач традиционно применяются три типа САР – гидродинамические, электрогидравлические (ЭГСАР) и электромеханические.

Типы систем автоматического управления ПТУ и ТГ. По функциональному составу задействованного оборудования САР, применяющиеся для регулирования параметров ПТУ и ТГ, для настоящего рассмотрения могут быть поделены на гидродинамические, электрогидравлические и электромеханические. Основным функциональным признаком такого деления – то, каким образом происходит управление положением исполнительного регулирующего органа (отсечного золотника, клапана парораспределения или даже арматуры). Среди основных требований к таким системам можно выделить поддержание заданной частоты вращения ротора турбины с требуемой точностью в статическом режиме, и удержание её в заданных пределах при полном сбросе нагрузки, а также поддержание заданного давления свежего пара перед турбиной на всех режимах эксплуатации для исключения её работы на «скользящих» параметрах.

Гидродинамическая система автоматического регулирования на примере турбин ПАО «КТЗ». ЭГСАР (рис 1 и 2) лежит в основе почти всех САР ПТУ и ТГ мощностью до 25 МВт с сопловым парораспределением, выпускаемых КТЗ вплоть до 2000-х гг. САР имеет ряд характерных особенностей, среди которых можно отметить навешенный на роторе специальный центробежный насос-регулятор (НР) с пологой (слабопадающей) напорной характеристикой, использующийся и как источник маслоснабжения системы регулирования-защиты-смазки, и как датчик частоты вращения – по перепаду давления на НР. Все элементы системы регулирования, которые должны вос-

принимать импульс изменения ЧВ, соединены между собой импульсными масляными линиями и подключены на напор НР, слив же отработавшего масла в динамических режимах поступает во всас НР, а не в масляный бак, поддерживая постоянство напора. В дальнейшем такой импульс по изменению ЧВ усиливается при помощи специального узла (трансформатора давления), улавливается чувствительным элементом (отсечным золотником) и обрабатывается исполнительным органом – гидравлическим сервомотором регулирующего клапана (питаемым маслом от другого, «силового» контура) в сторону уменьшения изменения, реализуя принцип управления по отклонению.

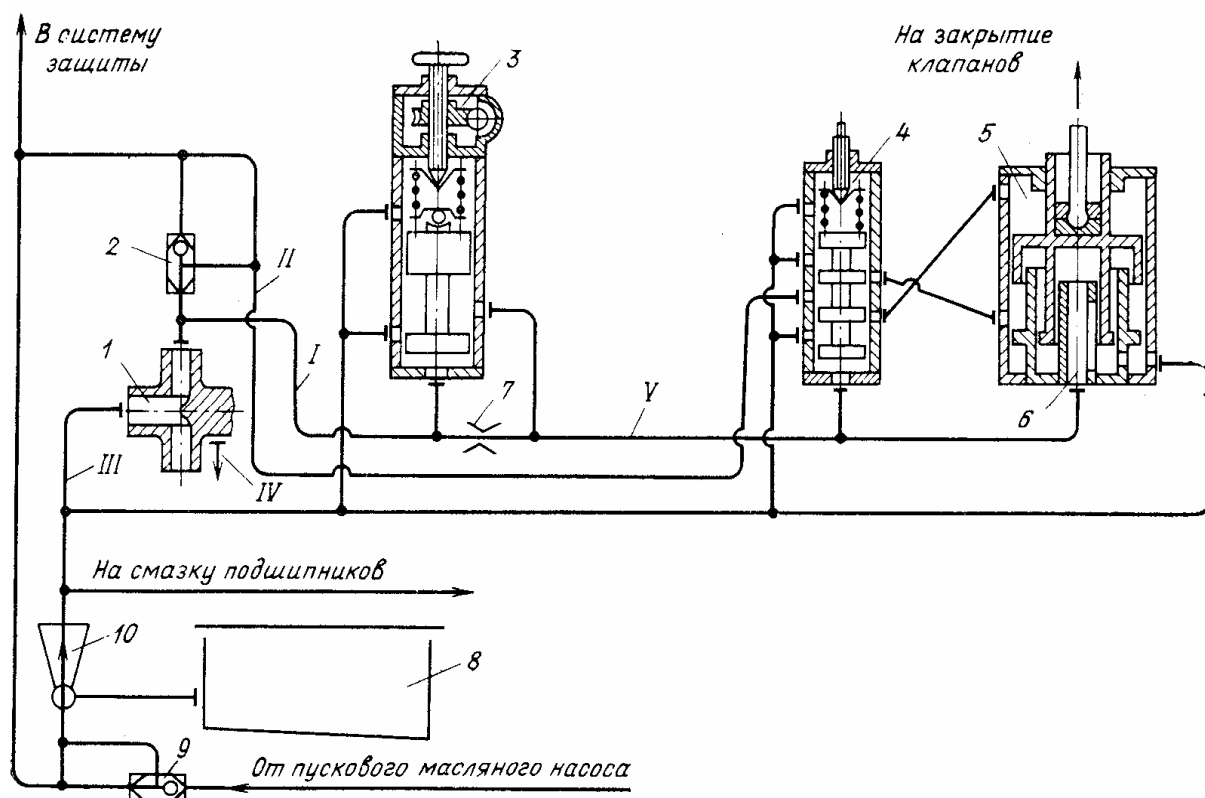


Рис.1. Схема гидродинамической САР:

1-центробежный масляный насос; 2-обратный клапан; 3-трансформатор давления; 4-отсечной золотник; 5-сервомотор; 6-обратная связь; 7-дрессельная диафрагма; 8-бак; 9-обратный клапан; 10-инжектор.

I-линия нагнетания насоса-регулятора до обратного клапана; II-линия нагнетания насоса-регулятора после обратного клапана, III-линия всасывания насоса-регулятора; IV-линия слива масла в бак; V-проточная импульсная линия.

Достоинствами гидродинамических САР являются: простота ремонта; надёжность и стабильность при эксплуатации (по 25-30 лет работы и более без замены деталей на запасные с сохранением заданных статических и динамических характеристик при условии сохранения качества масла и своевременного ТО); энергонезависимость; огромный накопленный опыт эксплуатации и ремонта. К недостаткам относится: высокая чувствительность к

типу и чистоте рабочей жидкости (возможны заклинивания золотников во втулках) и пульсациям давления; высокая сложность изготовления; требует более трудоёмкой процедуры настройки при сравнительно больших массо-габаритных показателях и материальных затратах на изготовление; инерционность в части реализации алгоритмов управления (особенно в переходных режимах); трудновыполнимость требований новых стандартов по качеству вырабатываемой электроэнергии; сложность обеспечения герметичности ввиду большого количества трубопроводов [1].

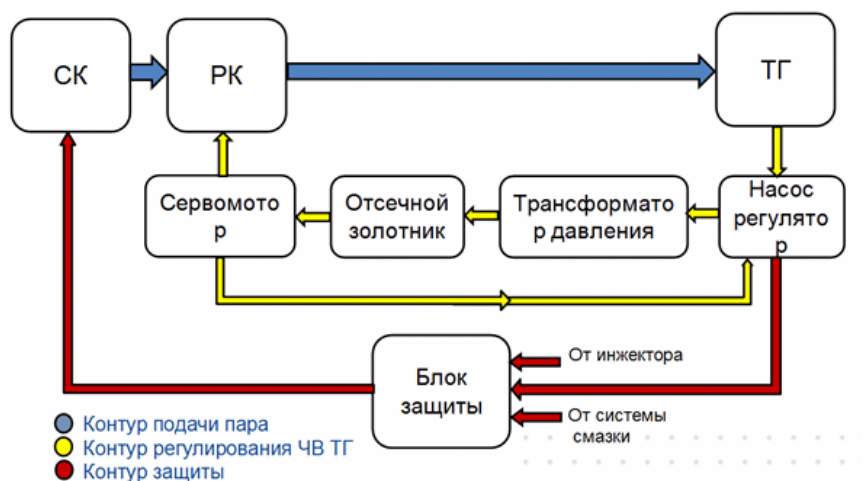


Рис.2. Структурная схема гидродинамической САР

Электрогидравлическая система автоматического регулирования.

В электрогидравлических САР (рис. 3 и 4) перемещение исполнительного регулирующего органа происходит при помощи электрогидравлического усилителя. Таким усилителем обычно выступает линейный электромеханический привод (ЭМП), представляющий собой бесщёточный электродвигатель со специальным блоком цифрового управления (вращательное движение его ротора преобразуется в поступательное планетарным механизмом в сочетании с роликвинтовой передачей), в связке с отсечным золотником блока регулирования. Для сравнения, если в гидродинамической САР положение (отклонение от «нейтрали») отсечного золотника в БР определялось изменением давления масла в импульсной линии, то в ЭГСАР оно определяется прямым воздействием от ЭМП по управляющему электрическому сигналу из системы управления (микропроцессора). В новых блоках регулирования (БР), объединяющих в своём корпусе только отсечной золотник и сервомотор, был сохранён уровень давления масла, принятый ранее в гидродинамических САР, что позволило избежать дополнительной отработки новых типов уплотнений в системе маслоснабжения. А благодаря исключению из БР многочисленных проточных каналов, камер, импульсных линий и исключению из состава системы отдельных узлов, массогабаритные показатели ГМЧ удалось существенно снизить при одновременном упрощении как её изготовления, так и настройки. Текущий сигнал от датчика положения, установленного на сервомоторе (или на регулирующем клапане), используется для коррекции (контур

местной обратной связи) управляющего воздействия на ЭМП. Подобная конструкция БР унифицирована и может использоваться в контурах регулирования как ЧВ, так и давления пара перед ПТУ, а также для управления положением поворотных диафрагм для регулирования давления пара в отборах. Характерной особенностью ЭГСАР является высокая точность и быстродействие регулирования (обеспечиваемые в т.ч. и конструкцией ЭМП), а также возможность полной автоматизации процесса пуска и работы ПТУ [2].

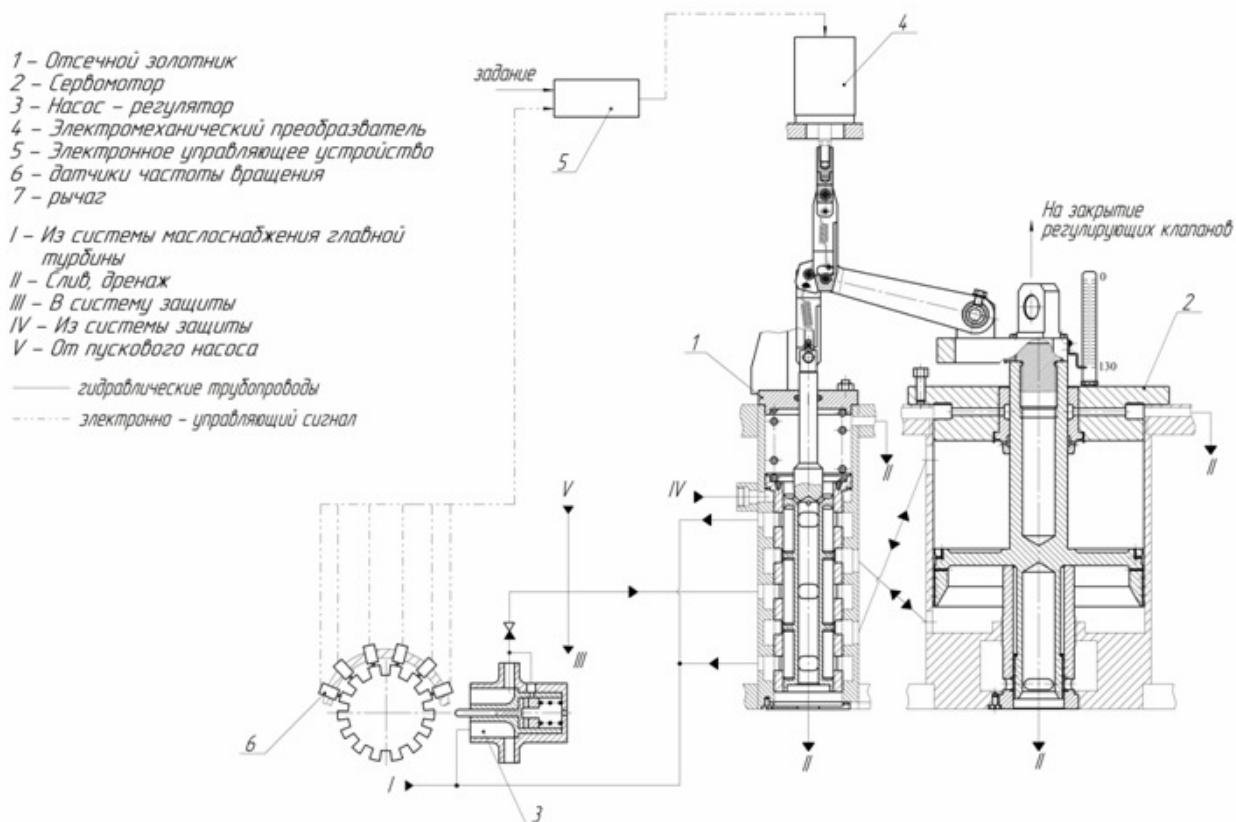


Рис. 3. Конструкция электрогидравлической системы регулирования

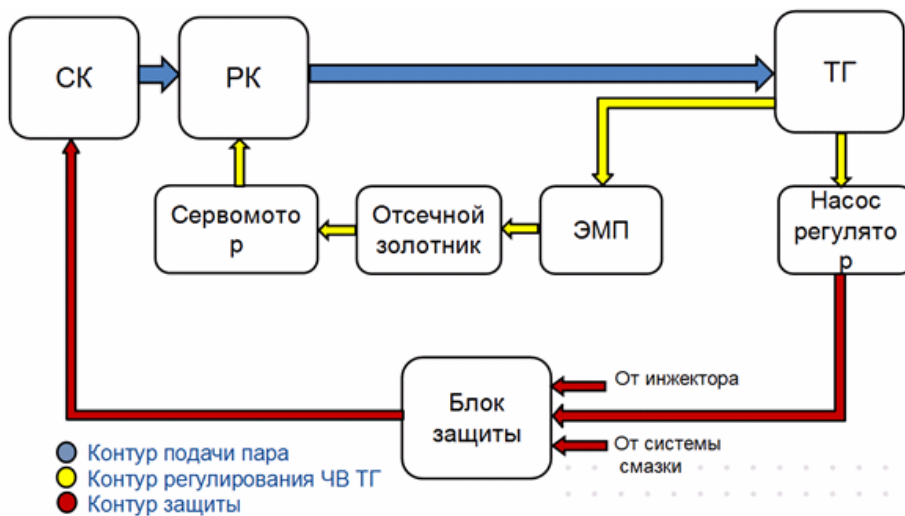


Рис. 4. Структурная схема электрогидравлической системы регулирования

Достоинствами ЭГСАР является: более высокое быстродействие и точность поддержания регулируемого параметра по сравнению с ГСАР (удовлетворяет современным стандартам); существенное сокращение количества узлов системы и маслопроводов (импульсных линий), её массогабаритных показателей и трудоёмкости настройки и обслуживания; меньший, чем у ГСАР, расход масла (и нагрузка на маслонасосы), более широкий рабочий диапазон; высокая степень унификации конструкций; возможность полной автоматизации работы и непрерывная техническая диагностика [2].

Недостатками ЭГСАР является: высокая (как у ГСАР) чувствительность к рабочей жидкости; сложность обеспечения связи электронной управляющей части (ЭУЧ) и гидромеханической части (ГМЧ); более высокая энергоёмкость.

Электромеханические системы автоматического регулирования. Быстрое развитие рынка высокоточных быстродействующих ЭМП с 2010-х гг. с появлением на нём высоконагруженных моделей (до десятков тыс. кН) позволило перейти к третьему типу систем регулирования – электромеханическим САР, основанным на прямом приводе регулирующих клапанов паровпуска (рис. 5.):



Рис. 5. ЭМП и парораспределение с использованием ЭМП

При этом система регулирования упрощается до вида (рис. 6.):

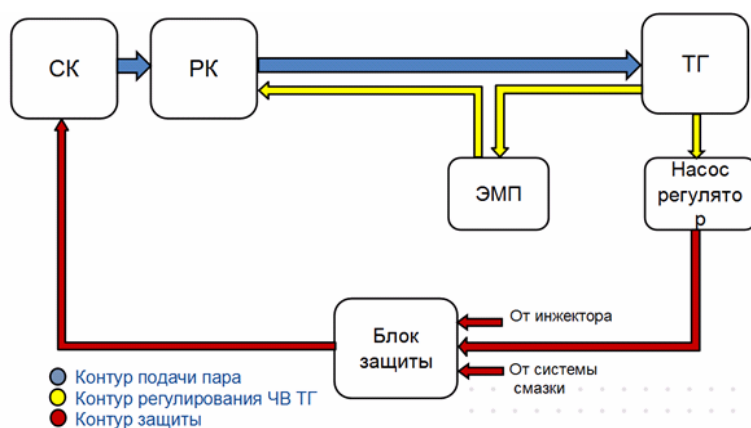


Рис. 6. Структурная схема электромеханической САР

ЭМП при этом аналогичен по типу с применяемым в ЭГСАР, однако должен обладать достаточным перестановочным усилием и требуемым быстродействием. Промежуточное звено – отсечной золотник с сервомотором (да и сам БР), характерное для ЭГСАР, при этом исключается. Сигнал от датчиков измерения регулируемых параметров поступает в ЭУЧ, в сравнении с заданной установкой преобразуется в управляющий сигнал по току/напряжению и затем поступает на вход ЭМП, который, в свою очередь, осуществляет соответствующее перемещение регулирующего клапана. При перемещении РК происходит перераспределение подводимых к нему потоков рабочих сред разной температуры (или изменение их расходов), в результате чего в точке их смешения за РК достигается нужный эффект. Указанные процессы, особенно в части регулирования температуры ввиду большой теплоёмкости рабочих сред и оболочек являются инерционными, требований к времени переходных процессов для них, как правило, не предъявляется. Усилия, требуемые от ЭМП для перемещения исполнительного органа регулятора, также относительно невелики (до 1кН). Ввиду конструктивных ограничений у имевшихся ЭМП по быстродействию (более 1 сек) и развиваемым усилиям (не более 2,5-3 кН) их применение для регулирования быстропротекающих процессов, таких как регулирование частоты вращения ротора или давления пара перед ПТУ, до недавнего времени оставалось невозможным, в то время как выбор ЭМП был сравнительно невелик.

Достоинствами систем данного типа является: отсутствие рабочего масла (исключается целиком блок регулирования, а значит, и затраты на его изготовление, настройку и испытания); повышенную надежность работы вследствие избавления от промежуточных элементов системы; положительны опыт использования для регулирования медленно протекающих процессов (таких как регулирование температуры воды или рабочего масла, давления пара в концевых уплотнениях турбины на статических режимах).

При этом такие системы имеют следующие недостатки: ограниченность ряда ЭМП способных к регулированию быстропротекающих (≥ 1 сек) и высоконагруженных (до 2-3) тон процессов; сложность энергообеспечения, охлаждения, смазки мощных ЭМП; необходимость отдельной конструктивной проработки, а иногда, невозможность реализации форсированного режима работы (ускоренного срабатывания) ввиду сильного влияния на массогабаритные и энергетические показатели ЭМП.

Выводы. Из сравнительного анализа видно, что гидродинамические системы уступают электромеханическим и электрогидравлическим по многим параметрам. По отношению к электромеханической САР следует отметить дополнительные факторы, связанные со сравнительно более высокими потребляемыми мощностями. Для преодоления паровых усилий потребляемая прямым приводом мощность может оказаться сравнительно высокой (в ЭГСАР с этой задачей справляется гидропривод – сервомотор под перепадом давлений в его полостях, формируемым отсечным золотником). Кроме того, необходимо учитывать характер работы регулирующего клапана – периода-

ми непрерывной работы до 5000 часов. В ЭГСАР, благодаря конструктивным особенностям гидропривода, выполнение данного требования не вызывало затруднений, то в случае электромеханической САР требуемое быстродействие в форсированном режиме требует отдельных конструкторских решений либо существенно увеличивает массогабаритные показатели привода. Повышенная потребляемая мощность требует также рассмотрения вопроса охлаждения привода и его узлов, таких как преобразователь частоты – из-за больших протекающих токов в ряде случаев оказывается, что воздушного (естественного) охлаждения уже недостаточно. Таким образом, на сегодняшний день ЭГСАР выгодно отличается от двух других приведенных типов САР.

Список литературы

[1] *Паровые турбины малой мощности КТЗ* / В.И. Кирюхин, Н.М. Тараненко, Е.П. Огурцова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

[2] *Булкин А.Е.* Автоматическое регулирование энергоустановок. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009.

Каньшин Кирилл Сергеевич – студент, бакалавр КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: Kanshin.K@yandex.ru

Чубаров Федор Леонидович – доцент, к.т.н. КФ РГАУ-МСХА им. Тимирязева. E-mail: fedor1966chub@yandex.ru

Сизов А.Н. – ПАО «Калужский турбинный завод». E-mail: ax-elxd@yandex.ru

УЛУЧШЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ОСЕВИХРЕВОЙ СТУПЕНИ

Для энергетических, химических, авиационных и других центробежных насосов, работающих с низким давлением рабочей жидкости на входе, требуются высокие кавитационные качества при длительном ресурсе работы. Для исключения явления кавитации, чтобы в любой точке проточной части насоса абсолютное давление было выше давления насыщенного пара перекачиваемой жидкости [2].

Чаще всего в качестве кавитационного показателя насоса используется – кавитационный запас Δh , показывающий избыток абсолютной удельной энергии жидкости во входящем патрубке насоса относительно удельной энергии, определяемой давлением насыщенных паров жидкости. Чем меньше величина Δh , тем больше вероятность возникновения кавитации.

Кавитация уменьшает КПД, напор и производительность насоса. При сильном развитии кавитации турбонасос полностью прекращает работу (срывает подачу). Кавитационное разрушение материалов (питтинг) происходит при длительной работе насоса в условиях кавитации в местах захлопывания пузырьков.

Существуют различные методы снижения кавитационного запаса насоса. Одним из перспективных способов улучшения кавитационных качеств насоса, снижения шума, вибрации и низкочастотных пульсаций давления и подачи является установка на входе в насос осевихревой ступени (ОВС) [1].

Наличие в осевихревой ступени неподвижной винтовой решетки и вихревого течения на периферии существенно влияет на развитие кавитации. Благодаря вихрям в каналах неподвижной решетки и на периферии шнека происходит дробление кавитационных каверн (рис. 1) и «затягивание» срывного режима, из-за чего повышается устойчивость работы и снижается вероятность кавитационных автоколебаний.

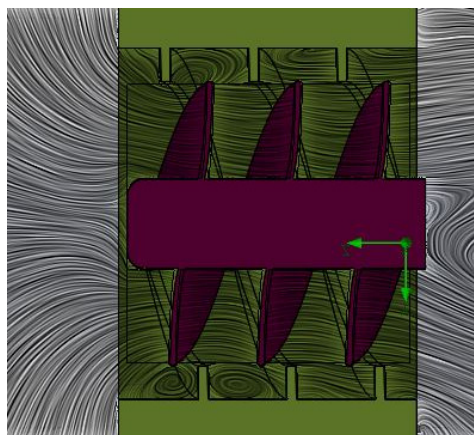


Рис. 1. Моделирование течения жидкости в ОВС в SolidWORKS

Для ОВС, имеющей неподвижную винтовую решетку, существует несколько параметров, от которых в сильной мере зависит не только напор и мощность, но и кавитационные качества. Это осевая длина l ; высота лопастей неподвижной решетки h_H ; угол установки лопастей неподвижной винтовой решетки β_H ; форма канала неподвижной винтовой решетки.

Благодаря экспериментальным данным [1] были получены зависимости коэффициента Руднева $C_{кр1}$ первого кавитационного режима ($h_{кр1}$ – первый критический кавитационный запас) от осевой длины (табл. 1) и от высоты неподвижной решетки (табл. 2).

Развитие кавитации в ОВС в сильной степени зависит от осевой длины. Это связано с тем, что кавитационная каверна распространяется по длине канала неподвижной решетки. Попадая в зону большего статического давления, каверна уменьшается в диаметре и по мере течения захлопывается в каналах неподвижной решетки.

По полученным данным таблицы 1 можно сделать вывод, что в отличие от шнека у ОВС коэффициент Руднева изменяется в зависимости от осевой длины. Причем с увеличением длины коэффициент Руднева увеличивается (рис. 2), а значит кавитационные качества улучшаются.

Таблица 1.

Влияние осевой длины на коэффициент Руднева

l , мм	$C_{кр1}$	$h_{кр1}$
400	2802	0,506
265	2206	0,696
200	2065	0,76

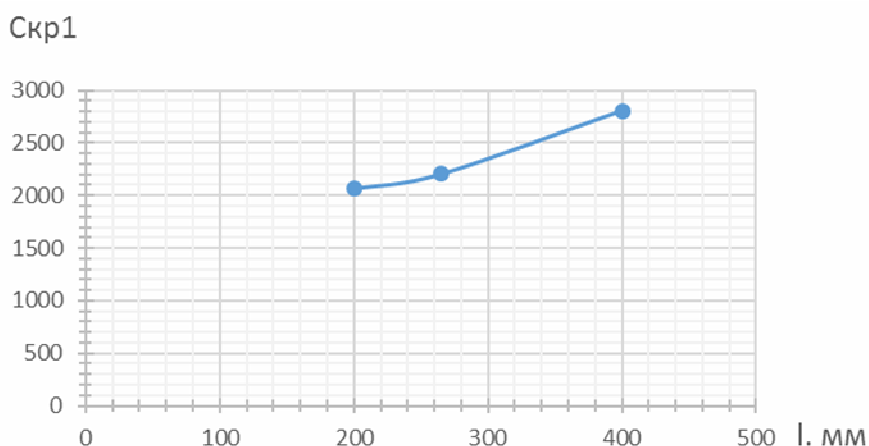


Рис. 2. Зависимость коэффициента Руднева от осевой длины

Данный результат имеет большое значение для проектирования насосов с высокими требованиями по кавитационным качествам. Необходимые характеристики можно получить, не увеличивая проходное сечение для уменьшения скорости жидкости, а увеличивая только осевую длину.

Увеличение высоты неподвижной винтовой решетки h_H до определенного оптимального значения приводит к увеличению вторичного вихревого течения в каналах и повышает напор. Это приводит к схлопыванию кавитационных каверн в неподвижной решетке на меньшей ее длине, что затягивает срыв и улучшает кавитационные качества.

Таблица 2.

Влияние высоты решетки на коэффициент Руднева

h_H , мм	$h_{кр1}$	$C_{кр1}$
31	0,47	2962
24	0,56	2597
9,5	0,58	2530

Результаты расчета показывают, что при увеличении высоты неподвижной решетки кавитационные качества возрастают (Рисунок 3).

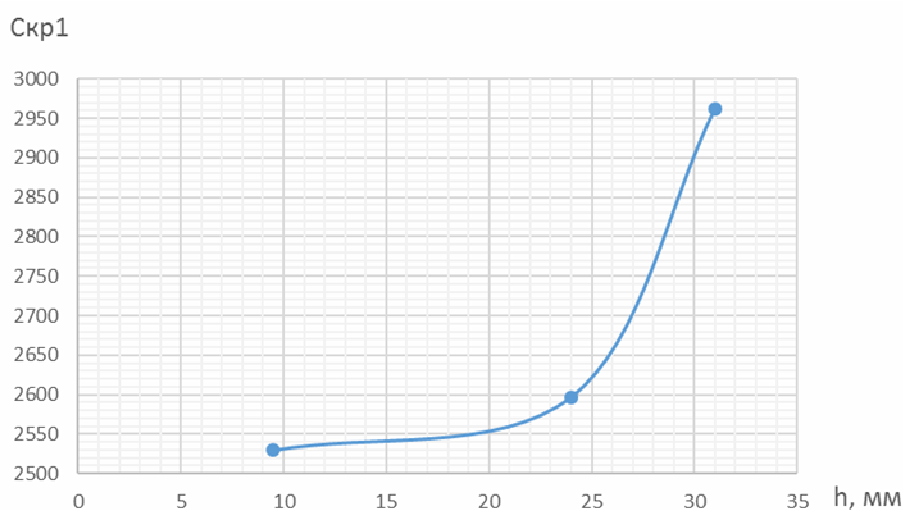


Рис. 3. Зависимость коэффициента Руднева от высоты неподвижной решетки ОВС

Кавитации в центробежных насосах сопровождается признаками, отрицательно сказывающимися на работе насоса: кавитационное разрушение, срыв работы, повышенные шум и вибрации.

В отличие от классических шнеков в ОВС кавитационный коэффициент быстроходности Руднева зависит от геометрии осевого колеса и их можно варьировать. При увеличении осевой длины и высоты решетки коэффициент возрастает. Это позволяет при необходимости изменять кавитационные качества насоса изменяя только ОВС.

Список литературы

[1] Анкудинов А.А. Расчет и проектирование предвключенной осевых ступени центробежного насоса: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 64 с.

[2] Грянко Л.П. Лопастные насосы / Л.П. Грянко и А.Н. Папира – СПб: Машиностроение, 1975. – 430 с.

Ващенко Анастасия Витальевна – студент, магистрант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sveridova.alenka@yandex.ru

Анкудинов Анатолий Александрович – КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ankudinov051@yandex.ru

Научный руководитель: Анкудинов Анатолий Александрович. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, E-mail: ankudinov051@yandex.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНДЕНСАТНО-ПИТАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В настоящее время в различных отраслях России увеличивается количество оборудования, исчерпавшего свой технический ресурс. Это в полной мере относится к электроэнергетике, и, в частности, к насосам [1]. Так, например, при эксплуатации крупных блоков тепловых электростанций третье место по числу аварийных остановок занимают главные питательные насосы.

На большинстве энергетических блоков ресурс данного оборудования исчерпан, и особое значение для данной отрасли имеет их незамедлительная замена или модернизация. В тепловой и атомной энергетике насосы других типов также морально и физически устарели, т. е. – выработали свой ресурс. Применяемые в настоящее время на ТЭС конденсатные, бустерные и питательные насосы не соответствуют современным требованиям: у них недостаточный КПД, повышенный шум и вибрации; в конструкциях применяются устаревшие концевые сальниковые и щелевые уплотнения валов.

Из-за низких кавитационных качеств питательных насосов на входе в главный питательный насос устанавливаются бустерные насосы. Это усложняет схему и снижает надежность всего энергоблока. Так, в энергетических блоках мощностью 300 Мвт используются три предвключенных насоса с подачей 50% от номинальной каждый, что приводит к снижению надежности работы электростанции в целом. Опыт эксплуатации энергоблоков показывает, что бустерные насосы могут выходить из строя из-за кавитационного разрушения проточной части и размывов корпуса.

На тепловых электростанциях с мощностью блоков 500, 800, и 1200 МВт в качестве главных питательных насосов использовались насосы типа ПН 1500-350 производства АО «Пролетарский завод» с приводной турбиной К – 17 (ОК – 18ПУ), изготавливаемой ОАО «Калужский турбинный завод» (рис. 1). Анализ работы этих насосов показал, что их основными недостатками является повышенная вибрация, заклинивание ротора из-за температурного перекоса на пусковых режимах, кавитационная эрозия на входе в первую ступень, высокие утечки через концевые уплотнения вала [2].

Существуют следующие способы улучшения кавитационных качеств центробежных насосов:

- выполнение РК первой ступени с увеличенной площадью входа на лопасти;
- применение бустерного насоса с более низкой частотой вращения, чем у основного насоса;
- применение предвключенного осевого колеса — шнека.

Рассмотрим наиболее популярный вариант среди вышеперечисленных. Чаще всего, с целью улучшения кавитационных качеств, на входе в центробежное колесо первой ступени устанавливается шнек. Это позволяет снизить

допускаемый кавитационный запас насоса. У лучших шнековых колес срывной кавитационный коэффициент быстроходности составляет $C_{кр} \geq 3000$.

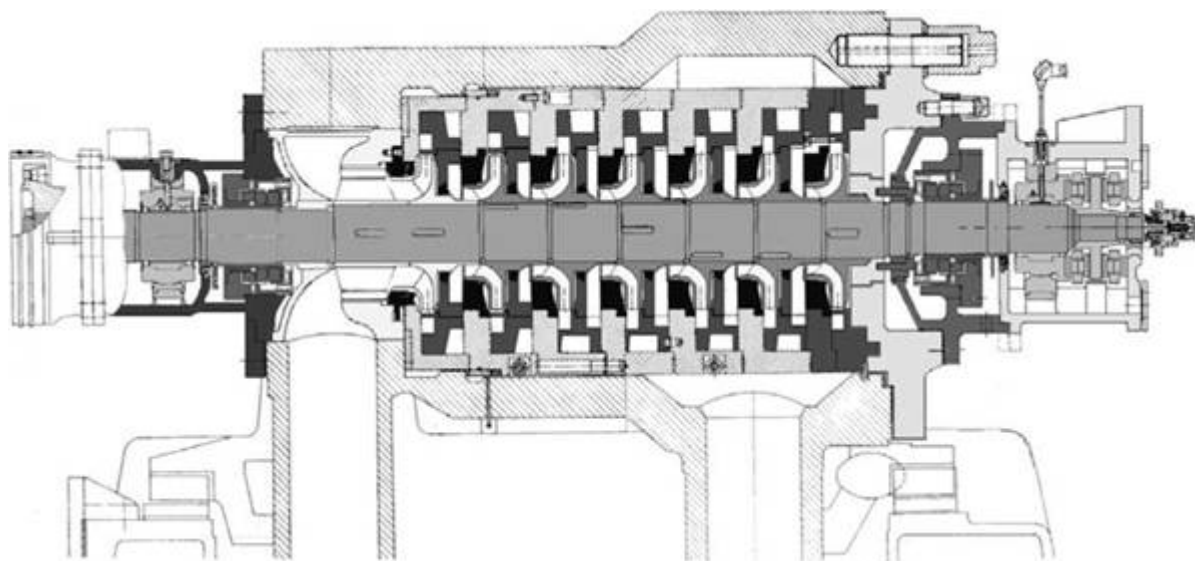


Рис. 4. Питательный насос ПН 1500 – 350

Однако, вместе с высокими кавитационными качествами, предвключенный шнек имеет ряд существенных недостатков. Во время работы, при подаче меньше 50% от оптимальной, во входной части шнека образуются обратные потоки жидкости, которые только усиливаются с уменьшением подачи. Обратные потоки приводят к тому, что повышаются вибрации, работа насоса становится неустойчивой, возникают низкочастотные пульсации давления, имеющие характер автоколебаний. Кавитационные автоколебания достигают большой амплитуды и могут привести к выходу насоса из строя.

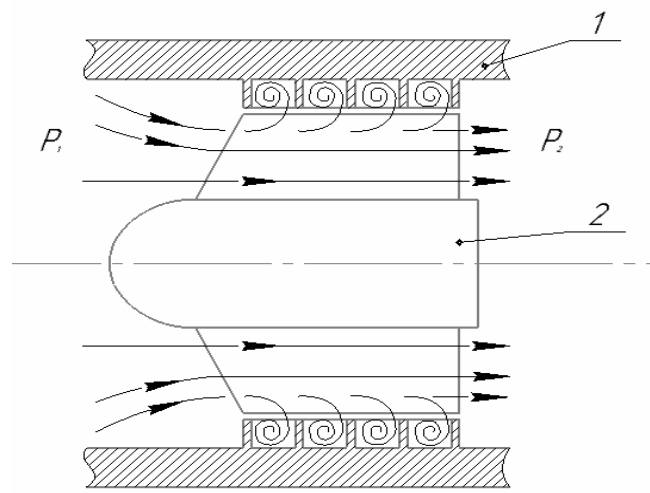


Рис. 5. Схема ОВС и течение жидкости в каналах:
1 – неподвижная решётка; 2 – осевое колесо (шнек)

Для повышения кавитационных качеств насоса, снижения шума, вибрации и низкочастотных пульсаций давления и подачи рекомендуется на входе в рабочее колесо питательных насосов установить осевихревое устройство (ОВС) (рис. 2). Это один из наиболее перспективных способов улучшения

данных качеств насоса [3]. ОВС не только имеет высокие кавитационные качества, но и повышает устойчивость работы системы, что делает возможным исключить в ряде энергоблоков бустерные насосы. Это существенно упрощит схему и повысит надежность.

ОВС представляет собой ступень, которая состоит из осевого колеса и, размещенной на его периферии, неподвижной винтовой решётки, у которой расположение лопастей противоположно ходу лопастей шнека. Течение жидкости в ОВС имеет непростой пространственный характер с вихревым течением на периферии. В центральной части каналов неподвижной решетки развиваются вихри, имеющие форму жгута. Наиболее ярко достоинства ОВС перед шнеком выражаются при подачах, меньших оптимальных. Из-за того, что каверны большого объёма делятся на огромное количество мелких, снижается вероятность появления кавитационных автоколебаний. Благодаря демпфирующему эффекту парогазовых образований в центральной части вихрей, уменьшаются уровни пульсаций и вибраций в широком спектре частот.

Список литературы

[1]. *Кучеров Ю.Н., Волков Э.П.* Стратегические направления и приоритеты развития электроэнергетики // Эффективное оборудование и новые технологии в российскую тепловую энергетику: Сб. докладов / Под общ. ред. Г.Г. Ольховского. 2-е изд., доп. (Международная конференция 8–10 октября 2001г.) М.: АООТ «ВТИ». 2001. С. 4-14

[2]. *Кирюхин В.И., Циммерман С.Д., Семенов Ю.М. и др.* Модернизация питательных насосов энергоблоков 150 – 1200 МВт на ОАО КТЗ // Электрические станции. 2003. № 6. С. 42–47.

[3]. *Анкудинов А.А., Туркова Л.А.* Применение предвключенной осевихревой ступени в насосах Калужского турбинного завода / Современное состояние и перспективы развития гидромашиностроения в XXI веке // Труды МНТК. СПб: Изд-во СПбГПУ. 2003. С. 20 - 25

Богатырёв Андрей Андреевич – студент, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Кафедра: «Тепловые двигатели и гидромашин». E-mail: bogatyrгов.andrew@yandex.ru

Анкудинов Анатолий Александрович – КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ankudinov051@yandex.ru

Научный руководитель: Анкудинов Анатолий Александрович. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, E-mail: ankudinov051@yandex.ru

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ДИФFUЗОРАХ

Каналы, в которых происходит торможение газового потока при одновременном росте статического давления, называются диффузорами.

В зависимости от применения диффузоры могут иметь различную форму. Так, например, для снижения скорости потока за рабочей частью аэродинамических труб и турбин используют конические диффузоры. В осевых и центробежных компрессорах, а также в насосах применяют диффузоры более сложной формы – щелевые и с криволинейными межлопаточными каналами.

Одним из важных параметров диффузора является изменение давления по его длине. Это распределение, в конечном итоге, определяет КПД диффузора. Для определения распределения давления, применяется натурный эксперимент. Его проведение даёт возможность получения наиболее достоверных данных. Проблемой данного метода исследования являются большие материальные и временные затраты.

Альтернативой натурному эксперименту является численный эксперимент, в котором производится расчет характеристик течения приближенным решением уравнений, описывающих движение газа или жидкости – уравнений движения, энергии, состояния и неразрывности:

$$\begin{cases} \frac{dc_x}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 c_x + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \bar{c} \\ \frac{dc_y}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 c_y + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} \bar{c} \\ \frac{dc_z}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 c_z + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div} \bar{c} \end{cases}$$

$$h^* = \text{const}$$

$$p / \rho = RT$$

$$G = \rho c F = \text{const}$$

где X , Y и Z – проекции массовых ускорений на координатные оси x , y и z соответственно, c - скорость, p - давление, T – температура, ρ - плотность, ν - коэффициент кинематической вязкости.

Проведение численного газодинамического эксперимента позволяет, в перспективе, получить требуемый результат без затрат времени и средств на изготовление экспериментальных моделей и их исследование в аэродинамической трубе. Однако, используемые в численном эксперименте математические модели и граничные условия требуют верификации.

В данной работе проведена верификация результатов численного эксперимента натурным на примере исследования течения газа в диффузоре, схема которого представлена на Рис. 1.

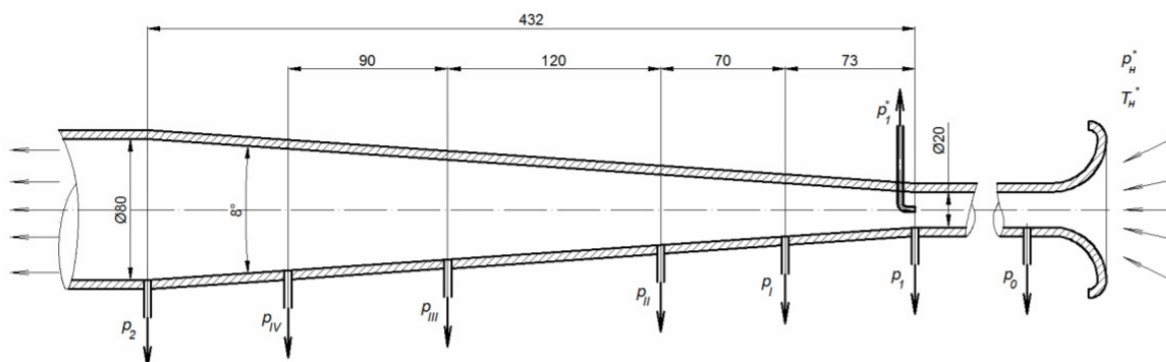


Рис. 1. Дозвуковой диффузор с углом раскрытия $\gamma = 8^\circ$

Натурный эксперимент проводился с помощью аэродинамического стенда ТМЖ-1 [1]. Расход воздуха через диффузор был равен $G=0,0121$ кг/с. В ходе эксперимента регистрировалось распределение давления по длине диффузора, согласно рис. 1. Результаты распределения давления по длине диффузора представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты натурального эксперимента

№	p , Па	Δp , Па
1	99 823	0
I	100 166	343
II	100 235	412
III	100 264	441
IV	100 303	480
2	100 274	451

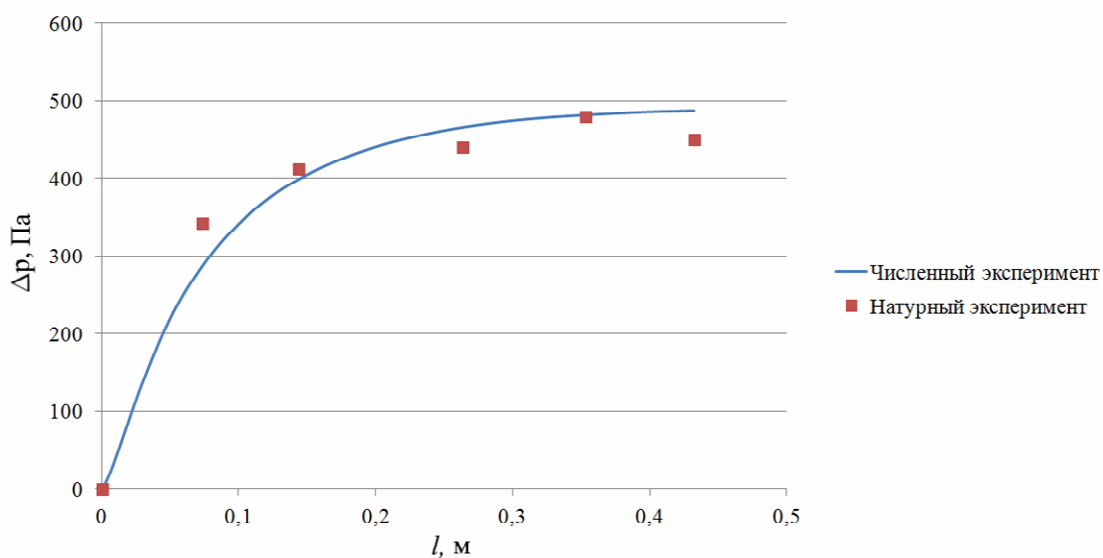


Рис. 2. Результаты численного и экспериментального исследования

Численный эксперимент проводился в CFD модуле FlowSimulation, САЕ пакета SolidWorks [2]. В качестве модели течения была выбрана модель турбулентного течения вязкого сжимаемого газа. Основным граничным условием было условие обеспечения расхода воздуха, соответствующего расходу воздуха определенному в ходе натурного эксперимента. Как результат численного эксперимента, произведено определение распределения статического давления по длине диффузора. Сопоставление результатов численного и натурного эксперимента приведено на рис. 2.

Данные, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод, что результаты численного эксперимента хорошо коррелируют с результатами натурного эксперимента при дозвуковом течении газа в безотрывном диффузоре.

Список литературы

[1] АО «Завод ПРОТОН». Официальный сайт. URL:

<http://www.zproton.ru/index.php> (дата обращения: 6.04.2021)

[2] SolidWorks. Официальный сайт. URL: <https://www.solidworks.com/ru> (дата обращения: 6.04.2021)

Ганков Максим Сергеевич – студент МКЗ-41Б КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gankovms@student.bmstu.ru

Шевелев Денис Владимирович – доцент кафедры, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

СЕКЦИЯ 5.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧНСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗА ГРАНИЦАМИ ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ АТТРАКТОРА ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В диагностике технических систем, как правило, выполняется прогноз состояния некоторого объекта диагностирования, которое основывается на телеметрических данных, получаемых в ходе работы. Полученная информация анализируется, определяются изменения, возникающие с течением времени под влиянием внешних воздействий и необратимых процессов изнашивания отдельных компонентов системы. Прогноз развития дефектов и своевременная оценка технического состояния на некоторый приближенный период позволяет повысить эффективность управления систем в целом [1].

Методика предсказания поведения системы

Основная задача, решаемая при проведении анализа информации, заключается в определении динамики изменения процессов функционирования сформированной информационной модели, что позволяет описывать поведение объектов, из которых состоит сложная система, в настоящем и будущем времени. Таким образом, необходимо формировать модели систем, которые позволят предсказывать поведение сложных технических объектов в условиях стабильной и изменяемой среды, при номинальных нагрузках и за их пределами.

Для сложных технических объектов можно использовать различные подходы к построению математических моделей разной степени подробности [2]:

- построение формальных функциональных описаний системы (статических или динамических), что требует понимания процессов протекающих в системе и их влияния друг на друга при условии физического разнообразия вариантов исполнения отдельных элементов систем;
- построение имитационных моделей на основании известных свойств и функций системы, что предполагает понимание характера связей входных, выходных и внутренних параметров;
- построение моделей на основе обучения и анализа экспериментальных данных без заранее известной функциональной связи, что требует огромного количества примеров работы системы в различных условиях.

Цель любого варианта моделирования состоит в достаточно точном описании процессов протекающих в моделируемом объекте для предсказания последствий. Однако следует отметить, что номинальные режимы обычно изучены хорошо, а аварийные редки и не имеют полного описания. Это приводит к тому, что формируемая модель объекта должна обеспечивать прогнозирование поведения не только в рамках номинальных ситуаций, но и выходить за их границы.

Анализ динамики поведения модели вентильного двигателя

Рассмотрим предсказание развития процесса для модели вентильного двигателя. Вентильный двигатель представляет собой бесколлекторный синхронный двигатель с тремя статорными обмотками и ротором с постоянными полюсными магнитами, создающими магнитное поле. Математическая модель которого во вращающейся системе координат $d-q$ имеет вид: [3]:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d}(u_d - Ri_d + \omega L_q i_q), \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q}(u_q - Ri_q + \omega L_d i_d - \omega \psi_r), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J}(n_p \psi_r i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q - \beta \omega - \tilde{M}_H \cdot \text{sign}(\omega)). \end{aligned} \quad (1),$$

где u_1, u_2 – составляющие управляющего напряжения в с.к. $d-q$; M_H – момент нагрузки; $L_d = L_q = 14,25 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ – индуктивности статорной обмотки по осям; $R = 0,9 \Omega$ – активное сопротивление статорной обмотки; $\psi_r = 0,091 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$ – потокосцепление, создаваемое магнитами ротора; $J = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$ – приведённый к валу ротора момент инерции; $\beta = 0,0162 \text{ N / rad / c}$ – коэффициент вязкого трения;

Введение переменных состояний: $(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3)^T = (i_d i_q \omega)^T$ и $(\tilde{u}_1 \tilde{u}_2)^T = (u_d u_q)^T$, позволяет, сделав невырожденную замену переменных, $\tilde{x} = Tx$ и изменив временной масштаб, получить систему уравнений в безразмерных переменных: [3]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + x_2 x_3 + u_1 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 - x_1 x_3 + \gamma x_3 + u_2 \\ \dot{x}_3 &= \sigma(x_2 - x_3) - M_H \cdot \text{sign}(x_3) \end{aligned}, \quad (2)$$

где $b = 1$; $\tau = 0,0158$; $k = 11,2435$; $\gamma = -0,568$; $\sigma = 5,4574$.

Область устойчивости данного аттрактора достигается в интервале управляющего напряжения $u_1 \in [-9,3 - 0,1]$. Развитие процесса во времени относительно координат x_1, x_2, x_3 приобретает траекторию, представленную на рис.1.

Для прогнозирования используем последовательность состояний системы на предшествующих n шагах моделирования. Предсказываемое значение отстоит на $n\omega$ шагов моделирования. Таким образом, примеры для обучения содержит следующие элементы:

- входной набор данных - значения вектора состояния в момент времени t и n предшествующих состояний:

$$X = \langle x_1(t-n), x_2(t-n), x_3(t-n) \dots x_1(t), x_2(t), x_3(t) \rangle;$$

- зависимая переменная: $T = \langle x_1(t+nw), x_2(t+nw), x_3(t+nw) \rangle$.

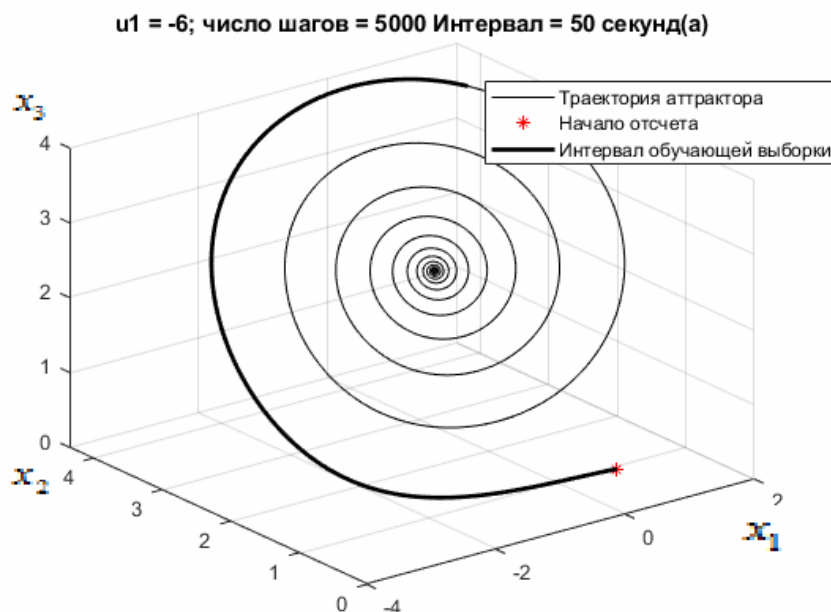


Рис. 1. Траектория изменения состояния системы

Рассмотрим 3 различные архитектуры решения задачи прогнозирования. В качестве обучающей выборки используем первые 1000 шагов аттрактора с управляющим напряжением $u_1 = -6$ (рис. 1.).

Эксперимент 1. Использование деревьев решений. Решаем задачу предсказания при $nw=1$ и $n=200$. Ансамбль деревьев позволяет формировать структуру ансамбля регрессий на основе результатов работы более простых моделей.

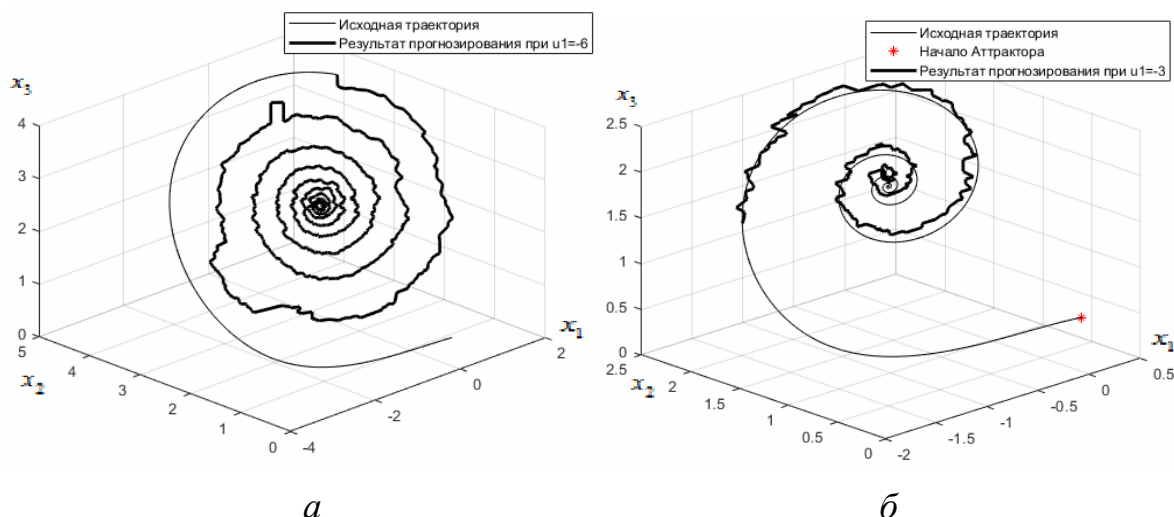


Рис. 2. Результат прогнозирования, используя деревья решений при
 $a - u_1 = -6$; $b - u_1 = -3$

Эксперимент 2. Построение трёх двухслойных сетей прямого распространения с 1м выходом и сигмодалными нейронами на скрытом слое. Каж-

для сеть строится для соответствующей координаты. На вход подаются вектора, размером 1×200 , ставящиеся в соответствие координате x_n в момент времени $t + 1$.

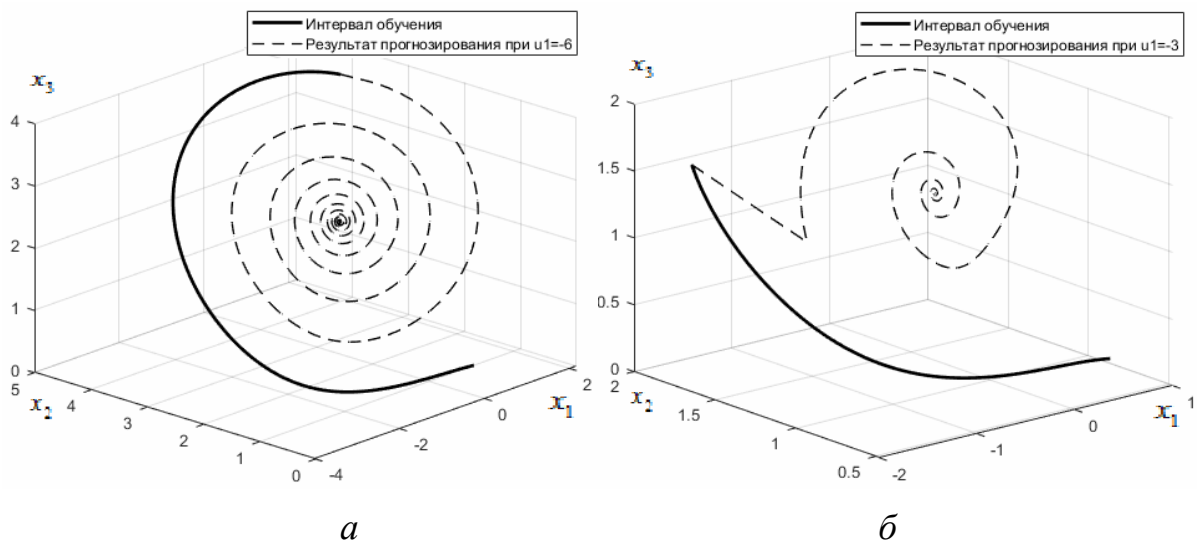


Рис. 3. Результат прогнозирования, используя разделение на сети прямого распространения при $a - u_1 = -6$; $b - u_1 = -3$

Эксперимент 3. Сеть прямого распространения с одним выходом, в котором обучающая выборка подаётся на вход в виде вектора 600×1 , где интервалы вектора: 1-200, 201-400, 401-600 ставятся в соответствии целевым значениям координат x_1, x_2, x_3 в момент времени $t + 1$.

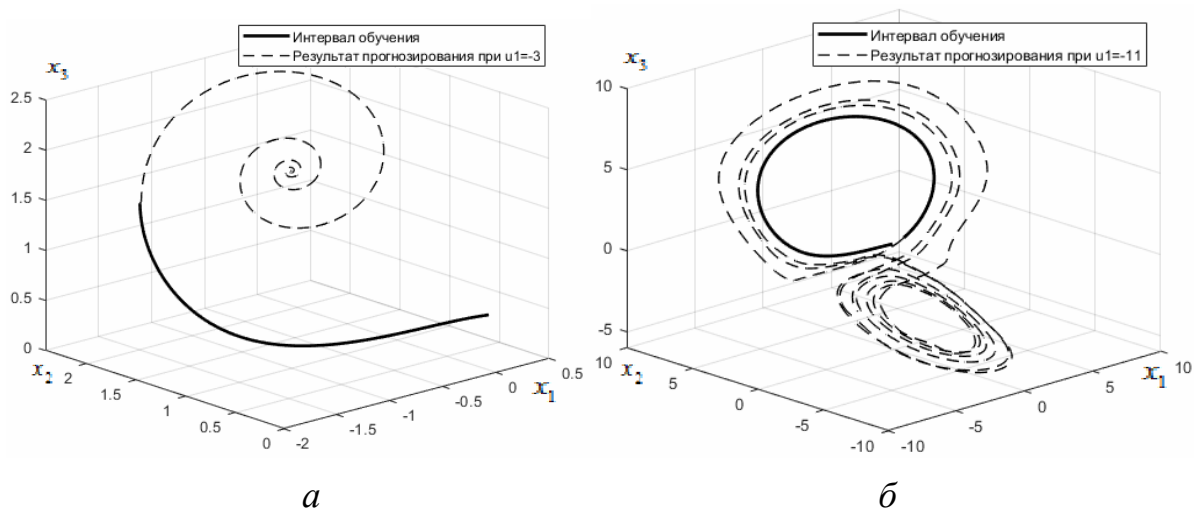


Рис. 4. Результат прогнозирования, общую единую сеть прямого распространения при $a - u_1 = -3$; $b - u_1 = -11$ (неустойчивость)

Построим графики ошибок для рассмотренных экспериментов. Интервал анализа $u_1 \in [-13 - 1]$. Ошибка:
$$Eps = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (x_i - x_i^T)^2}$$
.

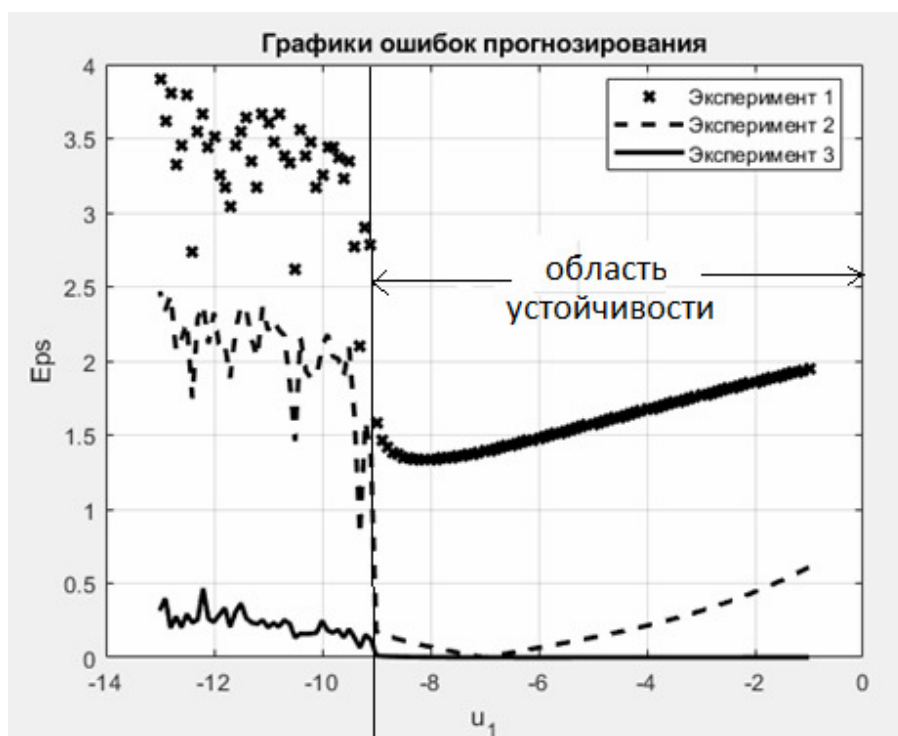


Рис. 5. Графики ошибок прогнозирования в интервале $u_1 \in [-13 - 1]$

Подход №2 достигает хорошего качества прогнозирования только в окрестности управляющего параметра, при котором производилось обучение. Корректная динамика отслеживается только в диапазоне устойчивости. Подход эксперимента №3 демонстрирует лучшее качество прогнозирования, максимальную точность в области устойчивости управляющего параметра, кроме этого позволяет очень точно прогнозировать поведение даже при выходе за диапазон устойчивости, информации о котором в обучающей выборке не содержалось. Ансамбль деревьев способен предсказывать общую динамику поведения, однако, не такую гладкую как результаты, полученные используя другие подходы.

Список литературы

[1] *Тоноян С.А., Балдин А.В., Елисеев Д.В.* Прогнозирование технического состояния электронных систем с адаптивными параметрическими моделями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2016. – №6 (111).

[2] *Чучуева И.* Модели и методы прогнозирования // Математическое Бюро. Прогнозирование на ОРЭМ. 2011. [Электронный ресурс] URL: <http://www.mbureau.ru/blog/modeli-i-metody-prognozirovaniya> (дата обращения: 21.11.2018).

[3] *Chu J., Hu W.* Control Chaos for Permanent Magnet Synchronous Motor Base on Adaptive Backstepping of Error Compensation // International Journal of Control and Automation vol.9, №3 (2016), pp.163-174.

Брынза Андрей Андреевич – аспирант, студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы Автоматического Управления» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

ПОИСК ЛЮДЕЙ НА АЭРОФОТОСНИМКАХ

Поиск и распознавание людей в коптерах является актуальной и важной задачей, так как это позволит проводить поисковые работы на больших территориях в режиме удаленного взаимодействия. Однако важно, обеспечить непрерывную и быструю обработку наблюдаемого с коптера видеопотока на его борту, поскольку это позволит снизить интенсивность обменов между летательным аппаратом и наземными службами. Кроме этого, размеры коптера и его энерговооружение не позволяют нести на борту значительные вычислительные ресурсы. По условиям функционирования подобных систем необходимо ограничиться вычислительной базой в объеме одноплатных компьютеров класса Raspberry. Таким образом стоит задача, сформировать алгоритм детектирования человека на аэрофотоснимке в бортовом режиме с ограниченными ресурсами.

Методы решения

Признаки Хаара

Классификатор формируется на примитивах Хаара путём расчёта значений признаков. Для обучения на вход классификатора сначала подаётся набор «правильных» изображений с предварительно выделенной областью на изображении, дальше происходит перебор примитивов и расчёт значения признака. Вычисленные значения сохраняются в файле в формате xml.

Каскад Хаара это один из простейших способов распознавания классов объектов с большой скоростью работы. К ним относятся лица и руки людей, номера автомобилей, пешеходы. Детектором Хаара просто находить животных в кадре

Сегодня не следует использовать каскады Хаара для детектирования чего бы то ни было. Появилось масса нейронных сетей которые работают быстрее и лучше. На телефонах появилась аппаратная поддержка исполнения нейронных сетей. Масса простых и удобных фреймворков для тренировки и исполнения нейронных сетей. Тот же OpenCV, о котором тут речь, умеет исполнять практически любую заранее обученную нейронную сеть[1].

Детектор CNN

CNN хорошо показывали себя в классификации изображений, и в данной сети они по сути были применены для того же самого. Для этого на вход CNN подавалось не всё изображение целиком, а предварительно выделенные другим способом регионы, на которых предположительно имеются какие-то объекты. На тот момент таких подходов было несколько, авторы выбрали Selective Search, хотя они указывают, что особых причин для предпочтения именно его нет. Между тем, детектор на основе CNN способен обнаруживать лица практически во всех ракурсах. К сожалению, он не подходит для видео в реальном времени. Он предназначен для выполнения на GPU. Чтобы полу-

чить ту же скорость, что и детектор на основе HOG, вам может потребоваться запустить мощный графический процессор Nvidia [2].

Semantic segmentation

Определение всех пикселей объектов определённого класса или фона на изображении. Если несколько объектов одного класса перекрываются, их пиксели никак не отделяются друг от друга; Целью сегментации семантического изображения является маркировка каждого **пикселя** изображения с соответствующим **учебным классом**.

U-Net Архитектура и обучение

Архитектура содержит два пути. Первый путь - это путь сжатия (также называемый кодером), который используется для захвата контекста в изображении. Кодировщик - это просто традиционный набор сверточных и максимальных уровней пула. Второй путь - это симметричный путь расширения (также называемый декодером), который используется для обеспечения точной локализации с использованием транспонированных сверток. Таким образом, это сквозная полностью сверточная сеть (FCN), то есть она содержит только сверточные слои и не содержит какого-либо плотного слоя, из-за чего может принимать изображение любого размера.

Построение Каскада Хаара

С помощью интегрального представления изображения можно быстро рассчитать суммарную яркость произвольной прямоугольной области на изображении. Признак Хаара вычисляется по смежным прямоугольным областям. В стандартном методе Виолы–Джонса используются прямоугольные примитивы

Использование признаков Хаара дает точечное значение перепада яркости по оси X и Y соответственно.

Поскольку признаки Хаара мало подходят для обучения или классификации, для описания объекта с достаточной точностью необходимо большее число признаков. Поэтому признаки Хаара поступают в каскадный классификатор, служащий для быстрого отбрасывания окон, где не найден требуемый объект, и выдачи результата «истина» или «ложь» относительно нахождения объекта.

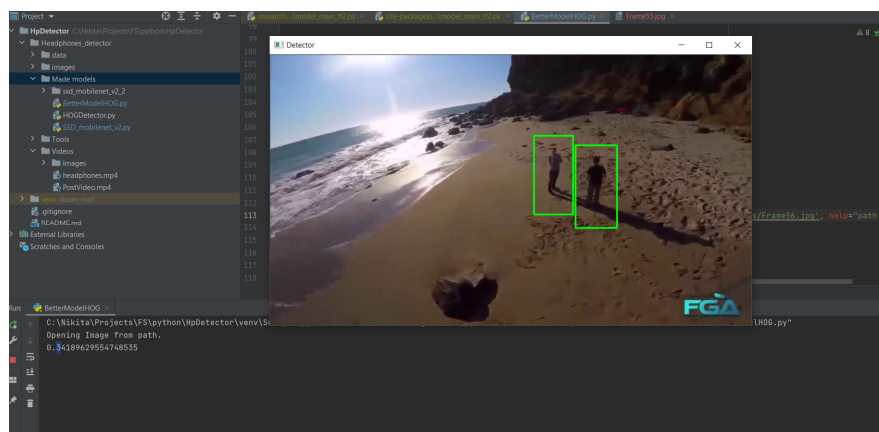


Рис. 1. Результат работы детектора Хаара

Построение Каскада CNN

Обнаружение объектов

Алгоритм **Object Proposals** выводит список из нескольких сотен ограничивающих прямоугольников в разных местах, масштабах и соотношениях сторон. Большинство этих ограничивающих прямоугольников не содержат никаких объектов. Предварительно обученная более быстрая модель R-CNN ResNet-50, которую мы собираемся использовать, ожидает, что входной тензор изображения будет иметь форму $[n : \text{число объектов}, c : \text{класс}, h : \text{высота}, w : \text{ширина}]$ и минимальный размер 800px.

Модель вернет:

- Ограничительные рамки $[x_0, y_0, x_1, y_1]$ все все предсказанные классы формы $(N, 4)$, где N-число классов, предсказанных моделью, которые будут присутствовать на изображении.
- Метки всех прогнозируемых классов.
- Оценки каждой предсказанной метки.

```
1 | object_detection_api('./people.jpg', threshold=0.8)
```

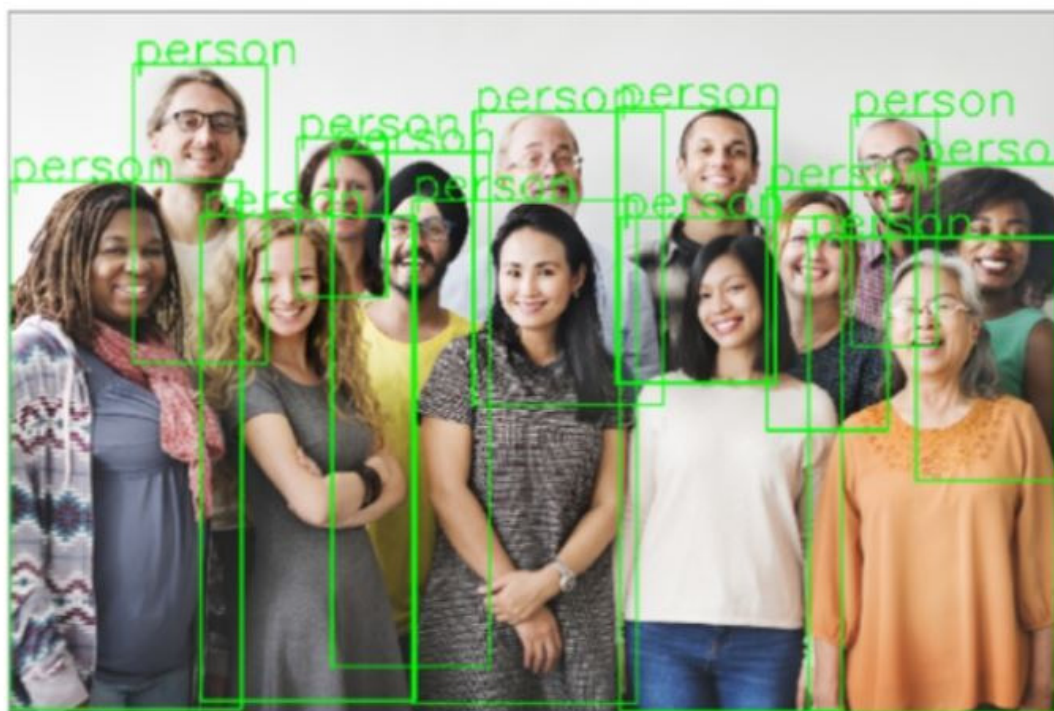


Рис. 2. Детектор CNN

Построение Semantic segmentation

Рассмотрим сегментацию изображения через обучение модели приписывать класс каждому пикселю. В случае, если модель не идеальна, можно получить результаты с зашумленной сегментацией, что зачастую невозможно в природе.

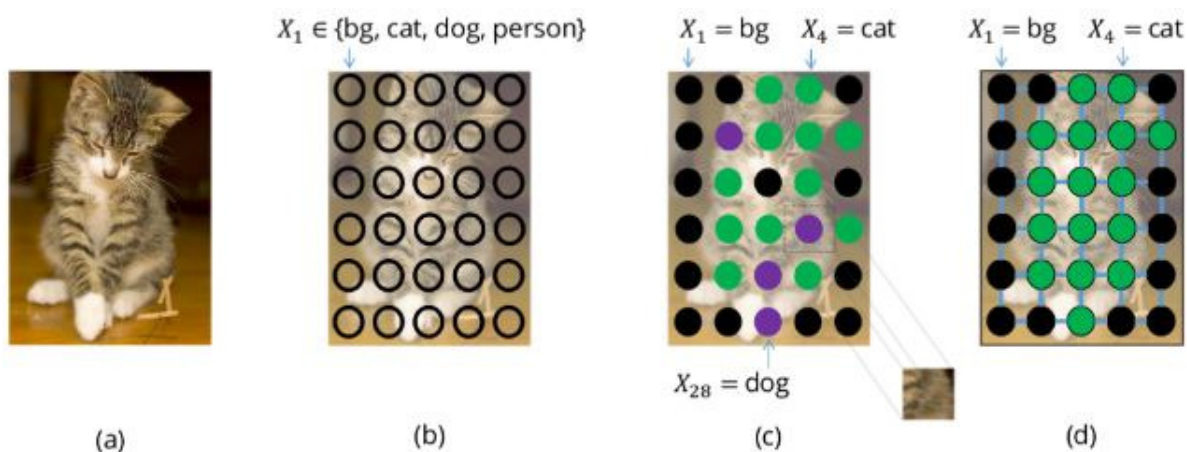


Рис. 3. Пиксели с метками собак смешанные с метками котиков.

U-Net

Сеть U-Net представляет собой улучшение простой FCN архитектуры. Сеть skip-связи между выходами с блоков свертки и соответствующими им входами блока транспонированной свертки на том же уровне. Skip-связи позволяют градиентам лучше распространяться и предоставлять информацию с различных масштабов размера изображения. Информация с больших масштабов (верхние слои) может помочь модели лучше классифицировать. В то время как информация с меньших масштабов (глубокие слои) помогает модели лучше сегментировать.

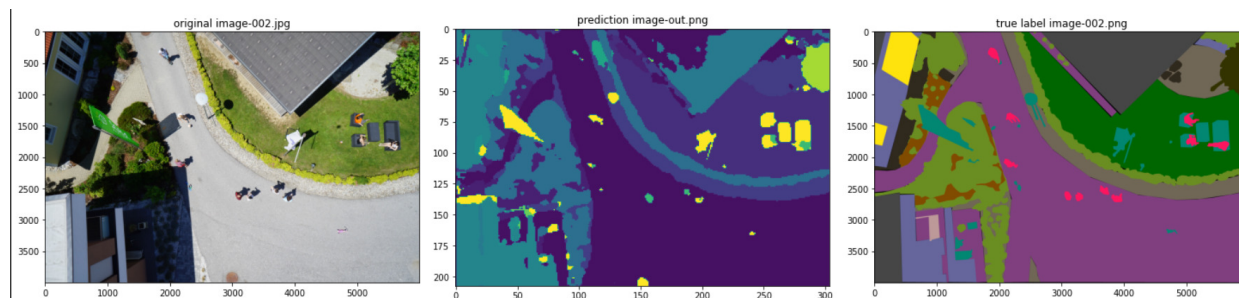


Рис. 4. Результат работы Semantic segmentation

Датасет для работы с методами был взят с официального сайта Tensorflow [3]. В дальнейшем планируется собрать свой Датасет (изображения с квадрокоптера). И аннотировать с помощью камеры тепловизора.

Заключение.

Рассмотрев три основных подхода к решению задачи определения человека на аэрофотоснимках, по итогам экспериментов было показано, что точность метода Виолы-Джонса весьма мала, а детектор CNN требует много ресурсов и времени. В дальнейшем в качестве основной платформы предлагается использовать Semantic segmentation, так как этот метод не требует много ресурсов, работает быстрее, чем CNN и точнее чем метод Хаара.

Список литературы

[1]. *Кулаков К.* Обучение каскада Хаара на примере поиска символов автомобильного номера OpenCV// URL: <https://kostyakulakov.ru/opencv> (дата обращения 7.04.2021).

[2]. *Детектор* лица на основе CNN от dlib // Machinelearning: Интернет-портал. – URL: <https://www.machinelearningmastery.ru/cnn-based-face-detector-from-dlib-c3696195e01c/>. (дата обращения 7.04.2021).

[3]. *Aerial Semantic Segmentation Drone Dataset* // Kaggle/Tensorflow: Интернет-портал. – URL: <https://www.kaggle.com/bulentsiyah/semantic-drone-dataset> (дата обращения 7.04.2021).

Литовченко Даниил Михайлович – студент ИУКЗ-41 КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Сайфудинов Никита Александрович – студент КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Щербаков Н. В., Корлякова М. О.

ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА SLAM

Автономные подвижные системы требуют применения эффективных методов ориентирования в пространстве. Рассмотрим формирование вероятностной карты на основе решения задачи SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Данный подход активно используется в различных областях техники, поскольку является достаточно экономичным и позволяет получать представление о местности с помощью небольшого числа датчиков.

Модели на основе SLAM. Задача SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) заключается в одновременной оценке местоположения и построения карты местности, где оказывается робот. Рассмотрим математическое описание задачи SLAM: пусть, в некотором пространстве существует некий робот с известным вектором управления в каждый момент времени (в случае с vSLAM вектор может быть неизвестен):

$$u_{1:T} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_T\},$$

где T - время моделирования.

На роботе установлены датчики, позволяющие тем или иным образом предоставлять данные об окружающей среде робота. С помощью этих датчиков получены следующие наблюдения (сканы окружающей среды):

$$z_{1:T} = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_T\}.$$

По текущим наблюдениям и известному вектору управления требуется построить карту окружающей среды и определить траекторию движения робота за время моделирования (с учетом начальных условий):

$$x_{0:T} = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_T\}.$$

Построение вероятностной карты на основе SLAM. Данный подход к построению карты основан на технике эпиполярного поиска (Epipolar Search). Каждый пиксель p на кадре $K_i \in \kappa$, модуль градиента изображения в котором больше порогового значения λ_G ограничен сегментом между ρ_{\min} и ρ_{\max} . Пиксель p характеризуется значением интенсивности I_p , модулем градиента G_p и положением градиента в пространстве Θ_p . Задачей поиска является нахождение наиболее подходящего положения точки, соответствующей пикселю p на проекции эпиполярной линии l_j j -го кадра.

Обозначим условия поиска точки в пространстве:

1) p_j (проекция точки в пространстве, соответствующей пикселю p) должна лежать в области, где значение градиента выше порогового значения $G(u_j) > \lambda_G$.

2) Направление градиента не должно быть перпендикулярным к эпиполярной линии.

3) Ориентация градиента p_j должна соответствовать ориентации градиента на p_i кадре:

$$\left| \Theta(u_j) - (\Theta_{p_i} + \Delta\theta_{j,i}) \right| < \lambda_\theta,$$

где $\Delta\theta_{j,i}$ – слагаемое, отвечающее за преобразование ориентации вектора градиента от i -го кадра к j -му.

Вышеперечисленные условия позволяют избавиться от наибольшего числа неподходящих точек, что существенно ускоряет процесс построения карты местности. Для сравнения оставшихся точек, введем ошибку $e(u_j)$:

$$e(u_j) = \frac{r_I^2}{\sigma_I^2} + \frac{r_G^2}{\sigma_G^2}, \quad r_I = I_p - I(u_j), \quad r_G = G_p - G(u_j),$$

где r_I – фотометрическая ошибка, а r_G – ошибка модуля градиента. Используя последовательность действий, описанных в [2], получаем выражение для поиска наиболее вероятного положения пикселя p_i на j -ом кадре, при котором ошибка $e(u_j)$ принимает наименьшее значение:

$$u_0^* = u_0 + \frac{g(u_0)r_I(u_0) + \frac{1}{\theta}q(u_0)r_G(u_0)}{g^2(u_0) + \frac{1}{\theta}q^2(u_0)}.$$

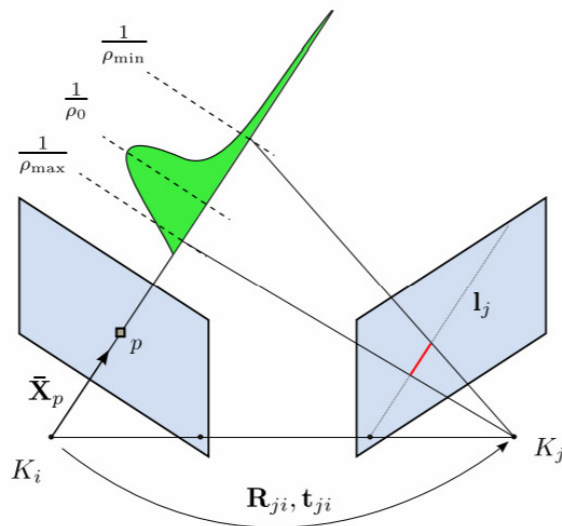


Рис. 1. Визуализация процесса построения карты

Построение вероятностной карты местности с использованием реальных данных. При проведении исследования построения вероятностной карты местности использовался алгоритм, реализованный в проекте с открытым исходным кодом ORB SLAM [1]. Входные данные для алгоритма были получены с помощью камеры смартфона Huawei P20 Lite (16 МП). Внутренние параметры камеры (Intrinsic Parameters) при записи с расширением

640x480 (стандарт 480p), полученные с помощью библиотеки OpenCV [3], представлены в таблице ниже.

Таблица 1.

Значения внутренних параметров камеры

Параметр	Значение
f_x	478.075
f_y	475.223
c_x	315.466
c_y	239.369
k_1	0.261
k_2	-1.691
p_1	-0.004
p_2	-0.002
k_3	3.774

Исследование качества работы алгоритма при различном числе кадров в секунду (FPS). При запуске алгоритма на реальных данных, собранных с помощью камеры смартфона, было проведено исследование с целью установления зависимости между качеством работы алгоритма и числом кадров в секунду записи видеопотока. Результаты исследования приведены в таблице ниже:

Таблица 2.

Влияние FPS на качество работы алгоритма

FPS, кад./с	Число особых точек извлекаемых из кадра	Работоспособность SLAM	Работоспособность в реальном времени	Трек потерян	Среднее время обработки кадра, с
30	1200	Да	Нет	Нет	0.05
15	1200	Да	Да	Нет	0.045
10	1300	Да	Да	Да	0.043
6	1300	Да	Да	Да	0.041
5	1300	Да	Да	Да	0.04
3	1300	Да	Да	Да	0.045
2	2500	Нет	Нет	Да	-

Из результатов исследования видно, что при числе кадров меньше 2 кадров в секунду алгоритм не работает. Также стоит отметить, что при уменьшении частоты записи, число извлекаемых из кадра особых точек ORB детектором должно увеличиваться для поддержания работоспособности системы. Было установлено, что при текущей конфигурации ЭВМ (процессор Intel Core i5, 8 Гб RAM) алгоритм может обрабатывать видеопоток в реальном времени при числе кадров в секунду не более 15. При FPS меньше 15

кадров в секунду наблюдается явление потери трека слежения. Следовательно, для обработки видеопотока оптимальной оказалась частота в 15 кадров в секунду.

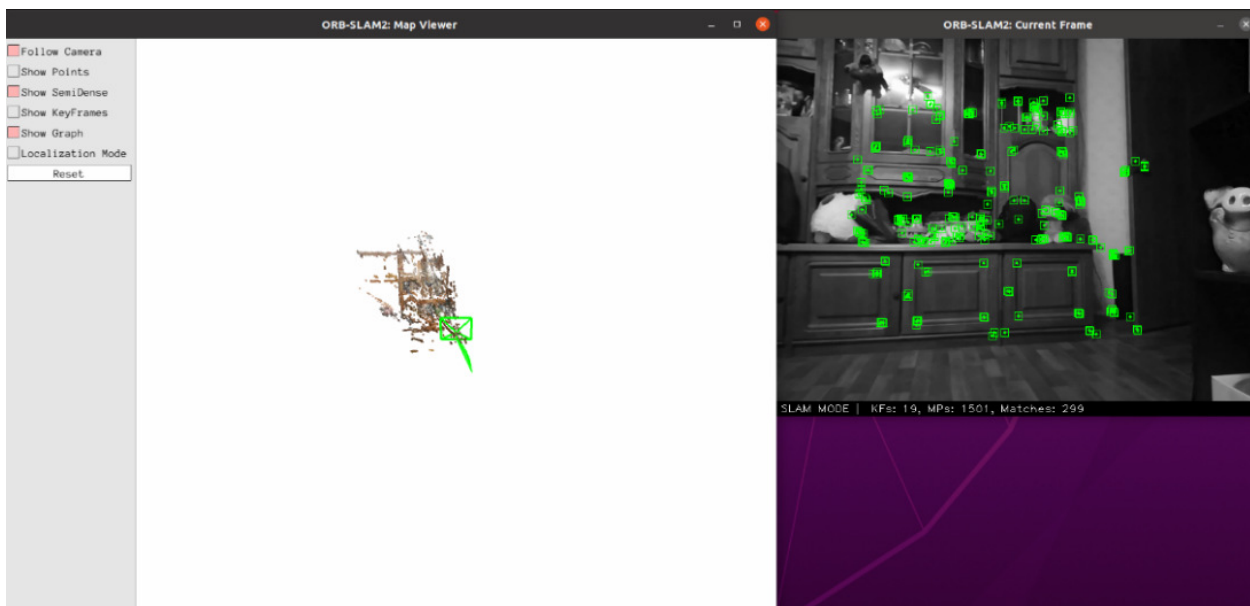


Рис. 2. Процесс построения вероятностной карты местности с помощью ORB SLAM

Исследование ресурсоемкости алгоритма. Алгоритм запускался на виртуальной машине на базе ОС Linux Ubuntu. Параметры хост-машины (на базе ОС Windows были приведены в разделе выше). Для гостевой машины были выделены следующие вычислительные ресурсы: RAM 7 Гб, процессор 4 ядра. При этом в результате экспериментов были получены показатели производительности системы (на гостевой машине), приведенные на рисунке ниже.

Process Name	User	% CPU	ID	Memory	Disk read tot	Disk write tot	Disk read	Disk write	Priority
mono_tum	hjj	47	17258	1.8 GiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-shell	hjj	1	14942	139.9 MiB	8.5 MiB	140.0 KiB	N/A	N/A	Normal
Xorg	hjj	2	1526	42.0 MiB	7.3 MiB	132.0 KiB	N/A	N/A	Normal
vimtcolord	hjj	0	1893	18.1 MiB	10.3 MiB	779.1 MiB	N/A	N/A	Normal
seahorse	hjj	0	14535	16.6 MiB	3.1 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-system-monitor	hjj	1	15079	15.4 MiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
evolution-alarm-notify	hjj	0	1883	15.4 MiB	544.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-calendar	hjj	0	14533	14.6 MiB	5.5 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-terminal-server	hjj	0	2804	14.0 MiB	1.6 MiB	4.0 KiB	N/A	N/A	Normal
gsd-media-keys	hjj	0	1829	11.1 MiB	220.0 KiB	72.0 KiB	N/A	N/A	Normal
ibus-extension-gtk3	hjj	0	14960	10.3 MiB	804.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-xsettings	hjj	0	1866	10.3 MiB	704.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-power	hjj	0	1831	10.0 MiB	12.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-color	hjj	0	1814	9.9 MiB	16.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-wacom	hjj	0	1860	9.9 MiB	8.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-keyboard	hjj	0	1824	9.7 MiB	12.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
update-notifier	hjj	0	2637	9.3 MiB	5.3 MiB	14.3 MiB	N/A	N/A	Normal
ibus-xt11	hjj	0	14962	9.0 MiB	16.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
tracker-miner-fs	hjj	0	1477	6.9 MiB	1.4 MiB	N/A	N/A	N/A	Very Low
goa-daemon	hjj	0	1536	5.2 MiB	4.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gjs	hjj	0	14993	5.1 MiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
evolution-calendar-factory	hjj	0	1761	3.9 MiB	5.5 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal
evolution-source-registry	hjj	0	1753	3.8 MiB	3.9 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal
pulseaudio	hjj	0	1475	3.5 MiB	520.0 KiB	8.0 KiB	N/A	N/A	Very High
evolution-addressbook-factory	hjj	0	1774	3.4 MiB	2.4 MiB	36.0 KiB	N/A	N/A	Normal
ibus-daemon	hjj	0	1480	3.2 MiB	112.0 KiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-session-binary	hjj	0	1679	2.7 MiB	7.3 MiB	4.0 KiB	N/A	N/A	Normal
(sd-pam)	hjj	0	1470	2.6 MiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-shell-calendar-server	hjj	0	1744	2.6 MiB	5.1 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-datetime	hjj	0	1819	1.9 MiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
gsd-printer	hjj	0	1940	1.9 MiB	N/A	N/A	N/A	N/A	Normal
gnome-session-binary	hjj	0	1576	1.7 MiB	6.8 MiB	N/A	N/A	N/A	Normal

Рис. 3. Скан процессов системы при работающем алгоритме (первая строчка mono_tum является целевой)



Рис. 4. Потребление вычислительных ресурсов при запуске алгоритма

Из рис. 3, 4 видно, что алгоритм требует порядка 1.8–2 Гб оперативной памяти для корректной и бесперебойной работы.

Заключение. В результате проведенного исследования удалось установить, что алгоритм является достаточно требовательным к вычислительным ресурсам для обработки видеопотока в реальном времени. Экспериментально удалось установить, что оптимальная кадровая частота для выбранного алгоритма составляет 15 кадров в секунду. Следует отметить, что данный подход к построению карты местности является достаточно эффективным с экономической точки зрения, однако, требования к вычислительным ресурсам накладывают ограничения на применение его непосредственно на базе мобильной автономной платформы.

Список литературы

[1]. *Raul Mur-Artal, Juan D. Tardos, и др.* ORB-SLAM2 open-source project. - Текст: электронный // ResearchGate: Интернет-портал. – URL: https://github.com/raulmur/ORB_SLAM2 (дата обращения: 01.04.2021).

[2]. *Raul Mur-Artal, Juan D. Tardos.* Probabilistic Semi-Dense Mapping from Highly Accurate Feature-Based Monocular SLAM. - Текст: электронный // ResearchGate: Интернет-портал. – URL: https://www.researchgate.net/publication/282807894_Probabilistic_Semi-Dense_Mapping_from_Highly_Accurate_Feature-Based_Monocular_SLAM (дата обращения: 03.04.2021).

[3]. *Teja Kummarikuntla.* Camera Calibration with OpenCV. - Текст: электронный // Medium: Интернет-портал. – URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/camera-calibration-with-opencv-f324679c6eb7> (дата обращения: 02.04.2021).

Щербаков Никита Владиславович – студент, бакалавр КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: shcerbackow@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы Автоматического Управления» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИБКОГО ОДНОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗОК СХВАТА

Введение. Целью данной работы является анализ динамических свойств гибкого однозвеного манипулятора (ГОЗМ), составление его математической модели и определение собственных частот. Для заданной конфигурации однозвеного манипулятора были получены собственные частоты изгибных колебаний при различных нагрузках на схвате и определены передаточные функции между входным управляющим моментом двигателя и угловым движением схвата с нагрузкой.

ГОЗМ обладают рядом преимуществ перед манипуляторами с абсолютно жёсткими звеньями, однако они имеют более сложную математическую модель, учитывающую их гибкость.

Разработка математической модели. Рассмотрим схематическое изображение движения ГОЗМ в горизонтальной плоскости (рис. 1),

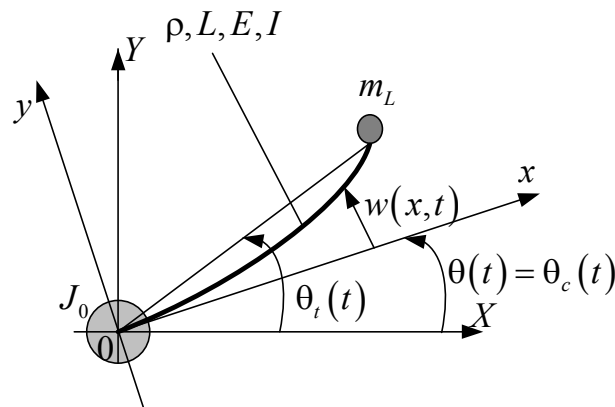


Рис. 1. Схематическое изображение движения ГОЗМ в горизонтальной плоскости

На рис. 1 X_0Y – неподвижная система координат (СК); x_0y – локальная (подвижная) СК (ось $0x$ является касательной к деформируемому ГОЗМ в месте его крепления к приводу; ось $0y$ является осью вращения абсолютно жесткого недеформируемого звена); J_0 – момент инерции привода ГОЗМ [$\text{кг} \cdot \text{м}^2$]; m_L – точечная масса нагрузки схвата (т.е. считаем момент инерции нагрузки нулевым) [кг]; $\theta(t) = \theta_c(t)$ – текущий угол поворота ГОЗМ как абсолютно жесткого тела, угол поворота привода [рад]; $\theta_i(t)$ – текущий угол поворота схвата с нагрузкой [рад]; $w(x, t)$ – величина гибкого отклонения ГОЗМ от оси $0x$ в текущей точке x манипулятора $x \in [0, L]$ и перпендикулярного к данной оси [м].

Свободные колебания упругой балки для данной системы описываются уравнением Эйлера-Бернулли

$$\rho \ddot{w}(x,t) + EI w''''(x,t) = 0, \quad (1)$$

Полученное уравнение в частных производных используется для нахождения собственных частот и гибких мод изгибных колебаний, для этого оно решается с применением метода Фурье (метод разделения переменных) [1]. Решение ищется в виде суммы бесконечного ряда

$$w(x,t) = \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t), \quad (2)$$

где $\phi_i(x), i=1,2,\dots$ – формы собственных колебаний ГОЗМ, $q_i(t), i=1,2,\dots$ – обобщённые координаты, т.е. решение уравнения (1) определяется разложением по собственным функциям [1].

В результате можно получить уравнение формы собственных колебаний ГОЗМ

$$\phi_i(x) = A_i \sin(\beta_i x) + B_i \cos(\beta_i x) + C_i \operatorname{sh}(\beta_i x) + D_i \operatorname{ch}(\beta_i x), i=1,2,\dots, n_f, \quad (3)$$

где n_f – конечное число форм собственных колебаний (гибких мод).

Для заданной конфигурации манипулятора рассмотрим сначала определение частот и форм колебаний свободного ГОЗМ. При поиске решений было введено ограничение $n_f = 2$, а также задана возможная масса нагрузки схвата $m_L \in [0; 0,5]$ кг. В результате были найдены неизвестные коэффициенты A_i, \dots, D_i , отвечающие заданным требованиям, а также входящие в уравнение формы собственных колебаний ГОЗМ (3).

После подстановки найденных значений были получены гибкие моды (искомые формы собственных колебаний) ГОЗМ, представленные на рис. 2 [2].

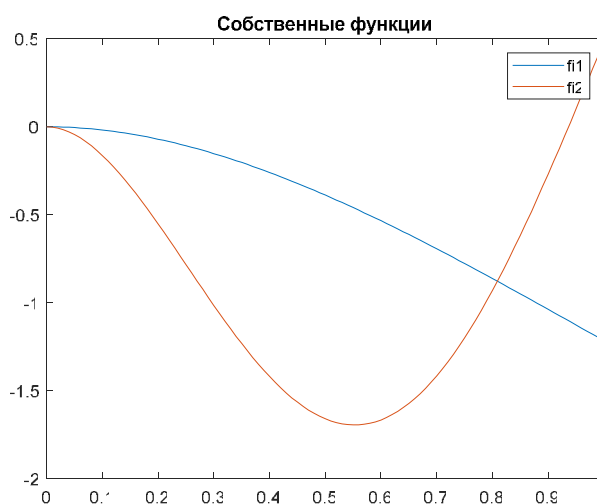


Рис. 2. Собственные функции ГОЗМ для нагрузки $m_L = 0,5$ кг

Затем, используя полученные значения частот β_i и подставляя их в формулу 4, находим собственные частоты свободных колебаний ГОЗМ [3].

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}}, i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим собственные частоты первых двух гибких мод ГОЗМ для нагрузки схвата $m_L = 0,5$:

$$\omega_1 = 14,6 \text{ рад} / \text{с} \text{ и } \omega_2 = 133,1 \text{ рад} / \text{с}.$$

После этого переходим к рассмотрению углового перемещения звена манипулятора под действием вращающего момента. Необходимо решить систему уравнений динамики ГОЗМ, в которых учтены диссипативные составляющие реальных систем

$$\Sigma: \quad J_\Sigma \ddot{\theta}(t) + \gamma \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^{n_f} a_i \ddot{q}_i(t) = \tau(t),$$

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) + a_i \ddot{\theta}(t) = 0, i = 1, 2, \dots, n_f \quad (5)$$

где $q_i(t)$ – обобщённые координаты из уравнения (2) (решение уравнения (1));

$$J_\Sigma = J_0 + \frac{\rho L^3}{3} + m_L L^2; \quad (6)$$

$$a_i = a_{i1} + a_{i2} = \rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + m_L L \phi_i(L), i = 1, 2, \dots, n_f;$$

γ – коэффициент вязкого трения в приводе; $0 < \xi_i < 1$ – коэффициент демпфирования упругих деформаций для i – й гибкой моды.

Введём замену переменных:

$$x_1 = \theta \quad x_2 = \dot{\theta} \quad x_3 = q_1 \quad x_4 = \dot{q}_1 \quad x_5 = q_2 \quad x_6 = \dot{q}_2 \quad (7)$$

при этом вектор

$$X = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6)^T \quad (8)$$

Тогда решение системы (5) относительно вторых производных после замены переменных (7) в пространстве состояний будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,276 & -1799 & -0,0246 & -17900 & -0,268 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,236 & -1755 & -0,024 & -15300 & -0,23 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0,0282 & -183 & -0,00252 & -19500 & -0,294 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 9,85 \\ 0 \\ 8,44 \\ 0 \\ 1,01 \end{pmatrix} \tau. \quad (9)$$

Для данной системы можно получить передаточные функции от управляющего момента τ к измеряемой θ_c и регулируемой θ_i переменной [4].

Для нагрузки $m_L = 0,5$ кг

$$W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s) = \frac{9,85s^4 + 2,65s^3 + 1,76 \cdot 10^5 s^2 + 1088s + 9,7 \cdot 10^7}{s(s^5 + 0,593s^4 + 2,13 \cdot 10^4 s^3 + 5844s^2 + 3,13 \cdot 10^7 s + 1,03 \cdot 10^6)},$$

$$W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s) = \frac{0,0759s^4 - 0,0793s^3 - 5100s^2 + 1088s + 3,7 \cdot 10^7}{s(s^5 + 0,593s^4 + 2,13 \cdot 10^4 s^3 + 5844s^2 + 3,13 \cdot 10^7 s + 1,03 \cdot 10^6)}.$$

Нули и полюса для обеих передаточных функций приведены в табл. 1 [5]

Таблица 1

Полюса и нули передаточных функций $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s), W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$

Нули $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$	Нули $W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$	Полюса $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s), W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$
$-0,13 \pm j133,1$ $\pm j14,6$	242,84 -241,9 91,09 -90,98	$-0,16 \pm j140,3$ $-0,12 \pm j39,9$ -0,03; 0

Из результатов видно, что нули передаточной функции $W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$ являются правыми, это означает неминимальную фазовость этой передаточной функции, что приводит к несогласованности угловых перемещений θ_c и θ_t , которая обусловлена гибкостью звеньев манипулятора.

Для полученных ПФ построены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) (рис. 3, 4):

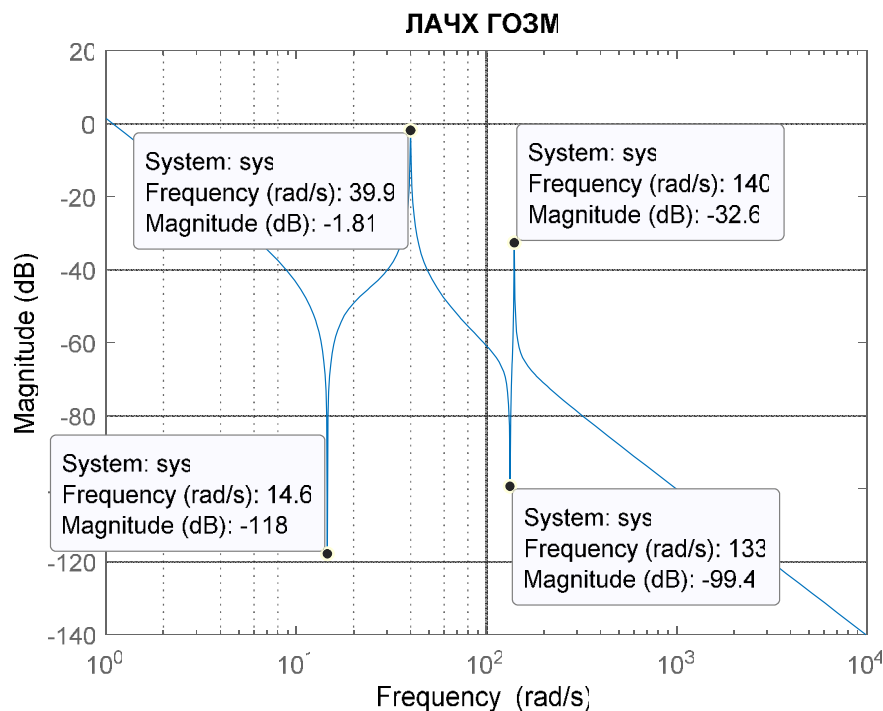


Рис. 3. ЛАЧХ ГОЗМ: канал $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$

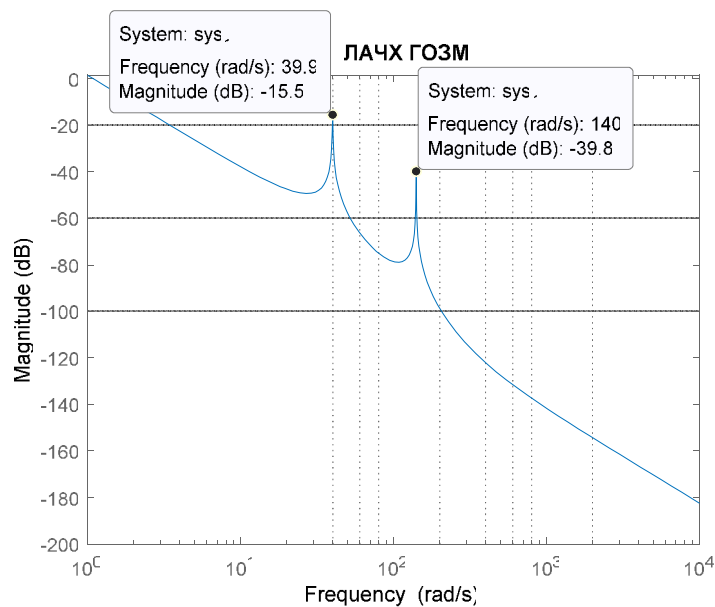


Рис. 4. ЛАЧХ ГОЗМ: канал $W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$

Заключение. В результате данных исследований была получена математическая модель ГОЗМ в пространстве состояний, найдены собственные частоты изгибных колебаний и изгибные формы.

Список литературы

[1] Краснощеченко В.И. Разработка и исследование математической модели гибкого однозвенного манипулятора с использованием принципа наименьшего действия Гамильтона. Мехатроника. Автоматизация. Управление. Т.18, № 6, 2017. – С. 383-390. (дата обращения: 25.02.21)

[2] Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: Учебное пособие. 3-е изд., стер / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев и др. - СПб.: Лань, 2016. - 464 с (дата обращения: 11.03.21)

[3] Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. URL: <https://www.books.ru/books/matlab-polnyi-samouchitel-4476428/> (дата обращения: 15.03.21)

[4] Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие. 4-е изд., стер / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. - СПб.: Лань, 2016. - 224 с. (дата обращения: 26.03.21)

[5] Юревич Е.И. Теория автоматического управления. 4-е изд., пер. и доп. Е.И. Юревич. - СПб.: ВHV, 2016. - 560 с. (дата обращения: 6.04.21)

Савина Олеся Игоревна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: mega.oliesia@inbox.ru

Краснощеченко В.И. – КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kvip@yandex.ru

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ БИОИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА В ВИДЕОПОТОКЕ

Модели оценки действий человека на основе применения OpenPose и DensePose позволяют решить вопрос классификации эффективно и довольно быстро, их производительность недостаточна для решения задачи оценки поведения в видеофрагментах.

Рассматривались такие подходы как:

- 1) Моментальный анализ позы (OpenPose + CNN);
- 2) Анализ позы во времени (OpenPose + LSTM).

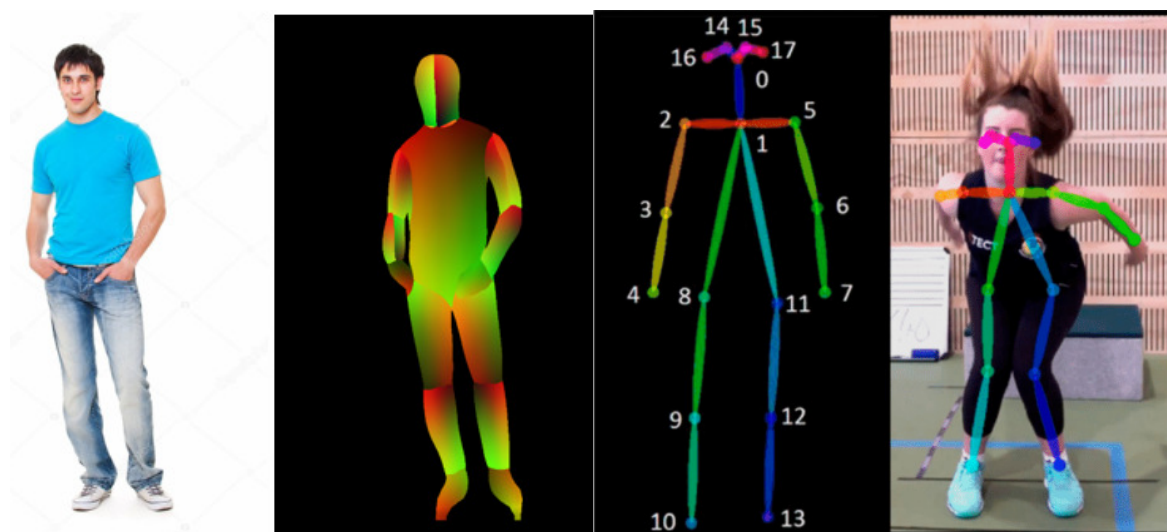


Рис. 1. Пример обработки кадров с помощью DensePose (слева) и OpenPose (справа)

Рассмотрим варианты анализа и классификации видеофрагментов в форме обработки видеопотока в "одно касание" – без промежуточной оценки поз. Существует 3 основных подхода к классификации видео [1]:

1. Трёхмерная свёртка;
2. Свёртка + LSTM;
3. ConvLSTM.

Рассмотрим самый современный из них – ConvLSTM, попробуем оценить его достоинства.

Рекуррентная нейронная сеть на самом фундаментальном уровне – это просто тип плотно связанной нейронной. Однако ключевым отличием от обычных сетей с прямой связью является введение времени – в частности, выходные данные скрытого слоя в рекуррентной нейронной сети возвращаются в себя [2].

В данном типе слоев LSTM свёртка происходит на каждом этапе обработки последовательности и её состояния сохраняются как при прохождении от входа на выход слоя, так и при переходе между кадрами [4].

Данный подход рассчитан на то, что кадры подаются в сеть не пачкой, а последовательно, и при проходе изображения через сеть уже дается результат классификации, с дальнейшим его учетом при проходе следующего изображения через сеть.

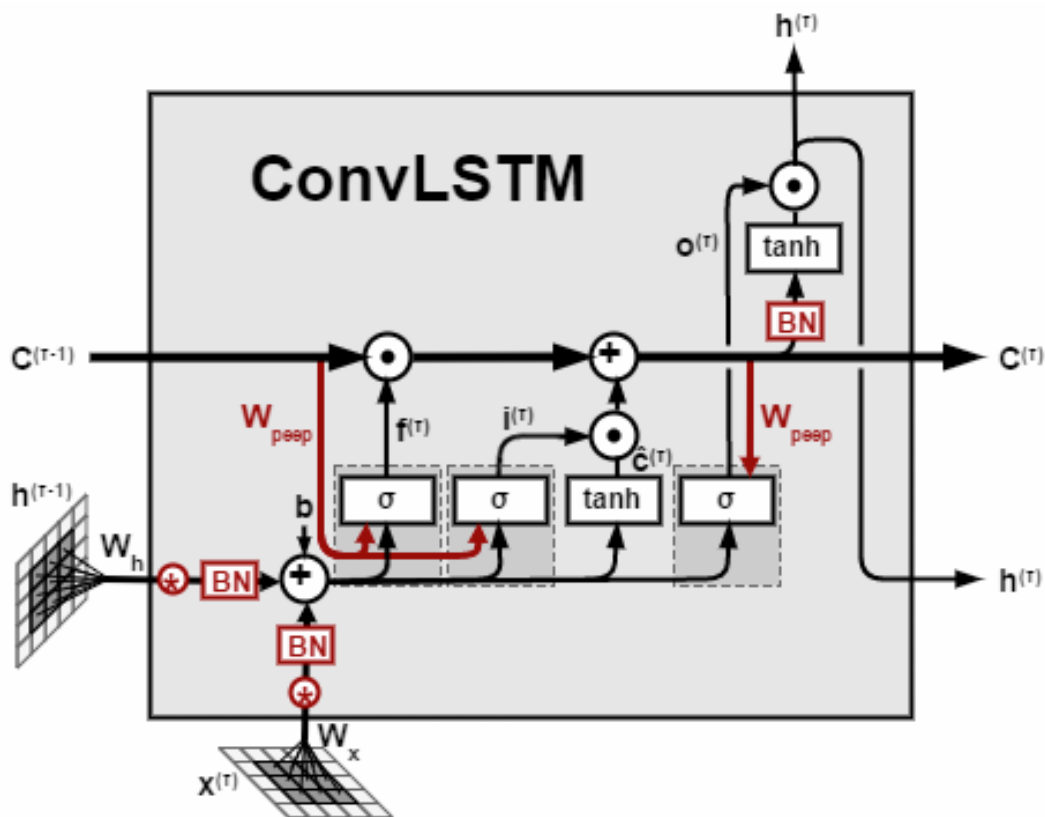


Рис. 2. Ячейка ConvLSTM

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv_lst_m2d_4 (ConvLSTM2D)	(None, 62, 62, 64)	154624
dropout_7 (Dropout)	(None, 62, 62, 64)	0
flatten_4 (Flatten)	(None, 246016)	0
dense_7 (Dense)	(None, 256)	62980352
dropout_8 (Dropout)	(None, 256)	0
dense_8 (Dense)	(None, 6)	1542

Рис. 3. Вид выбранной сети

Анализ необходимости использования переноса обучения при обучении модели

Transfer Learning (трансферное обучение) – это подраздел машинного обучения, целью которого является применение знаний, полученные из одной задачи, к другой целевой задаче [3].

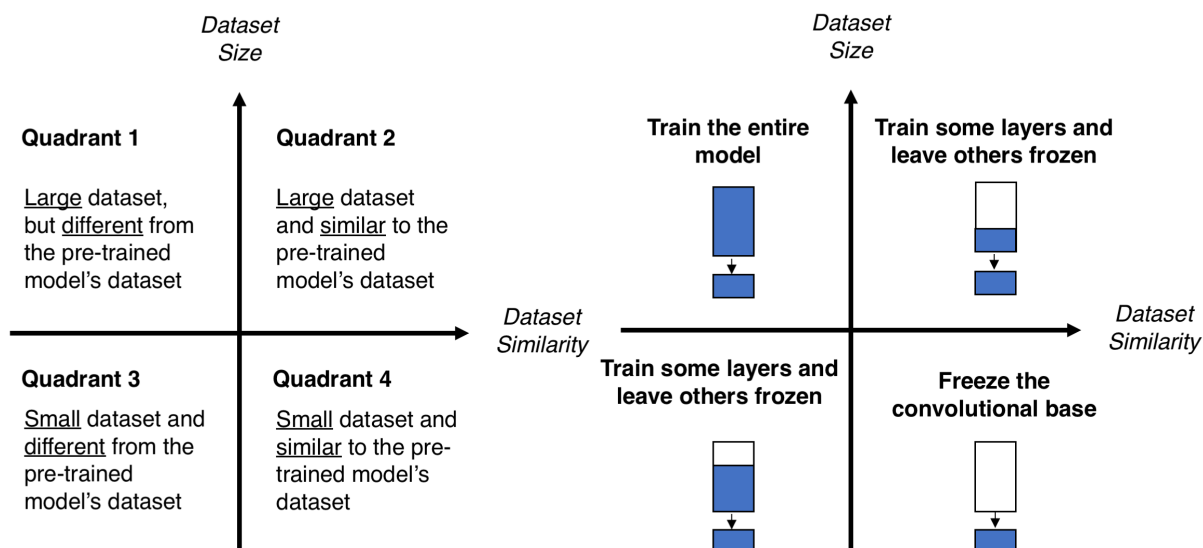


Рис. 4. Матрица сходства размеров

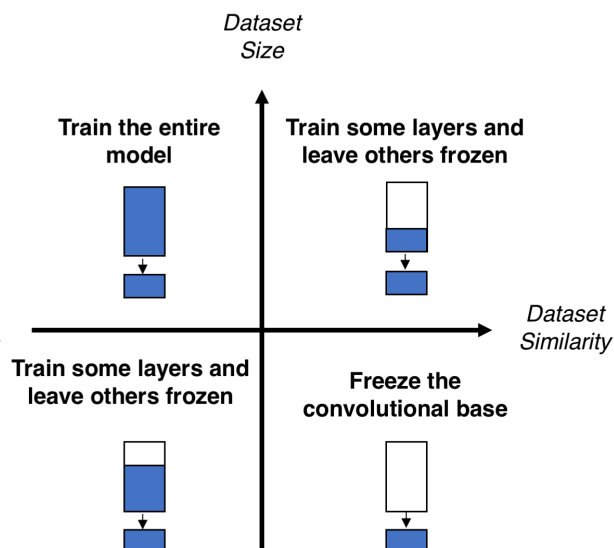


Рис. 5. Карта решений для тонкой настройки предварительно обученных моделей

Рассмотрим 4 варианта развития событий [3].

1. У вас имеется обученная модель и большой набор данных, при этом датасет, на котором обучена модель сильно отличается от вашего. В данном случае нет необходимости в переносе обучения.

2. У вас большой набор данных и модель обученная на схожем с вашим датасете. В данном случае имеет смысл использовать перенос обучения. Лучшей стратегией в данном случае является обучение классификатора и верхних слоев сверточной сети.

3. У вас имеется небольшой набор данных и модель, которая обучена на датасете, который сильно отличается от вашего. Результаты будут зависеть от правильности того, сколько слоев сверточной сети вы будете обучать.

4. У вас имеется небольшой набор данных и модель, которая обучена на датасете схожем с вашим. В данном случае при переносе обучения замораживаются все сверточные слои и обучается только классификатор.

Из данных 4 вариантов выбираем 4, так как наша модель обучена на схожем наборе данных, а наш набор данных имеет недостаточный объем для полного обучения модели.

В табл. 1 приведены результаты обучения сети без использования переноса обучения и с использованием переноса обучения, из них видно, что точность при использовании переноса обучения значительно повышается (в нашем случае на ~10%), а также значительно снижается время обучения (в 5 раз).

После обучения данной модели можно сравнить ее результаты с результатами, полученными при использовании других моделей (см. табл. 2).

Таблица 1

Сравнение алгоритмов обучения

Алгоритм обучения	Время обучения	Полученная точность
Без переноса обучения	~22000 сек	0.81000
С переносом обучения	~4000 сек	0.91333

Таблица 2

Сравнение моделей распознавания действий человека

Модель	Точность	Скорость (разрешение видео 300x300)	Размер модели
MobileNet-Thin	84%	0.02 сек	~15 Мб
LSTM + OpenPose	93%	0.31 (+ 0.22) сек	~205 Мб (без OpenPose)
ConvLSTM	91%	0.07 сек	~61 Мб

Как видно, по результатам точности данная модель не сильно уступает модели с системой детектирования позы, зато сильно выигрывает у неё во времени обработки. Время обработки 1 кадра сократилось в несколько раз – пропорционально весу модели.

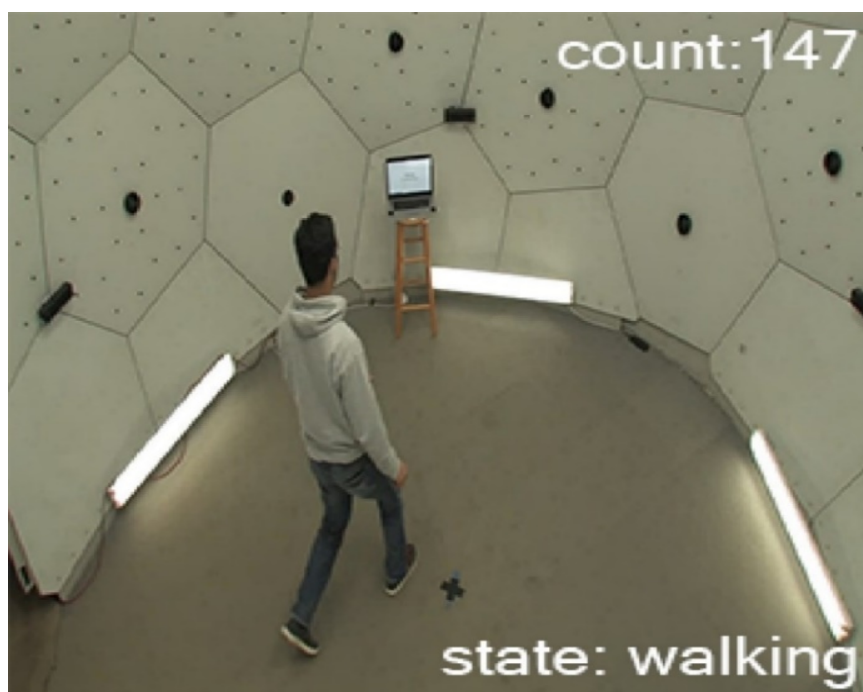


Рис. 6. Пример обработки

Можно сделать вывод о том, что сети ConvLSTM справляются с задачей определения действия человека (как классификации видео) и имеют точность на уровне LSTM моделей с использованием систем детектирования позы. Так же, в нашем случае имеет место использование алгоритма переноса обучения – повышается точность и скорость обучения ConvLSTM сети.

Список литературы

[1]. Du Tran, Lubomir Bourdev, Rob Fergus, Lorenzo Torresan, Manohar Paluri. Learning Spatiotemporal Features with 3D Convolutional Networks. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.0767.pdf> (дата обращения: 07.04.2021).

[2]. Alexandre Xavier. An introduction to ConvLSTM. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://medium.com/neuronio/an-introduction-to-convlstm-55c9025563a7> (дата обращения: 07.04.2021).

[3]. Lebo Wang, Kaiming Li, Xu Chen, Xiaoping P. Hu. Application of Convolutional Recurrent Neural Network for Individual Recognition Based on Resting State fMRI Data. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2019.00434/full> (дата обращения: 07.04.2021).

[4]. Andrew Giel, Ryan Diaz. Recurrent Neural Networks and Transfer Learning for Action Recognition. – [Электронный ресурс]. – URL: http://cs231n.stanford.edu/reports/2015/pdfs/giel_diaz.pdf (дата обращения: 07.04.2021).

Холостунина Виктория Сергеевна – студентка, магистрант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vika-stone@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы Автоматического Управления» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ С ДАТЧИКА АКСЕЛЕРОМЕТРА

Использование акселерометров стало популярным в различных сферах нашей жизни, например, в области медицины, безопасности, спорте и развлечениях. Теоретически работа акселерометра заключается в том, что мы можем рассчитать траекторию движения тела, зная его ускорение в каждый момент времени [1].

Задача распознавания человеческой деятельности – это задача классификации последовательностей данных, поступающих с датчика – акселерометра, в четко определенные движения. Эта задача сложная ввиду большого количества наблюдений, которые производятся каждую секунду, а также из-за отсутствия четкого способа сопоставления данных акселерометра с простейшими движениями.

Основной подход к решению данной проблемы состоит в том, чтобы вручную обрабатывать данные временного ряда, которые основываются на окнах фиксированного размера и на моделях машинного обучения. Методы глубокого обучения, а именно рекуррентные нейронные сети и одномерные нейронные сети, обеспечивают правдоподобные результаты по распознаванию действий человека.

Чтобы в дальнейшем работать с данными акселерометра и разрабатывать универсальные алгоритмы по определению действий человека на основе данных датчика акселерометра, необходимо проверить различаются ли данные, снятые с разных устройств.

Проведем эксперимент и снимем показания с датчика акселерометра двух разных смартфонов – Apple iPhone 7 и Xiaomi Redmi 4X. В качестве экспериментального действия было выбрано самое простое – ходьба вперед, при этом смартфоны держались в руках одинаково, и было пройдено одинаковое расстояние. Измерения были проведены с учетом и без учета гравитации.

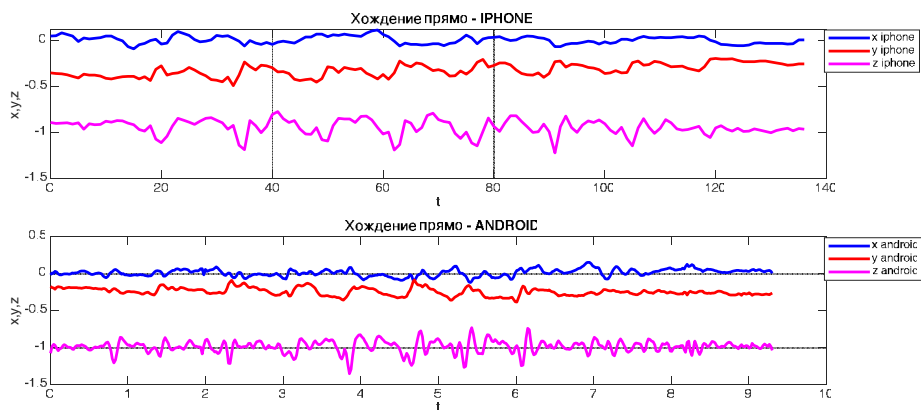


Рис. 1. Эксперимент с учетом гравитации

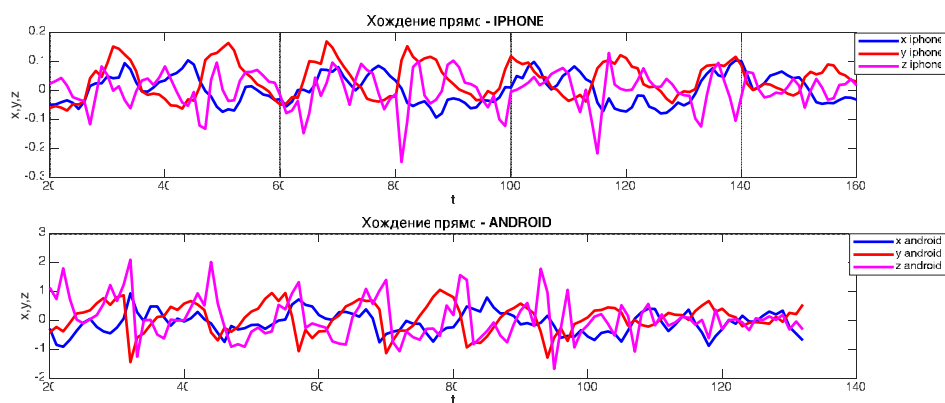


Рис. 2. Эксперимент без учета гравитации

Исходя из рисунка 1, сделаем вывод, что экспериментальные данные акселерометра с учетом гравитации с разных смартфонов находятся примерно в одном диапазоне, и графики схожи между собой. Исходя из рисунка 2, мы видим, что экспериментальные данные акселерометра без учета гравитации с Android-смартфона почти в пять раз больше данных, снятых с iPhone-смартфона.

Из всего этого сделаем общий вывод, что измерения с учетом гравитации более точные и не зависят от смартфона. Следовательно, алгоритм по определению действий человека на основе данных акселерометра будет иметь универсальный характер.

Показания акселерометра на смартфоне имеют большую зашумленность, вследствие чего возникает необходимость борьбы с шумом. Существует множество способов борьбы с шумом, которые мы будем оценивать по степени сглаживания и по скорости реакции, например:

1. метод средних значений (вычисляется среднее значение, получается неплохое сглаживание, но при этом большую задержку в значениях за счет вычисления среднего значения) [2].

2. фильтр нижних частот (фильтрация сигналов выше указанной частоты при маленьком коэффициенте фильтрации, так же будет присутствовать задержка) [3].

3. фильтр Калмана (рекурсивный фильтр, то есть для вычисления оценки состояния системы на текущий шаг работы ему необходима оценка состояния на предыдущем шаге) [4]

Помимо возникновения шумов в показаниях акселерометра существует проблема неоднородности деятельности человека, например, если человек шел и остановился на несколько секунд и продолжил свое движение. Для задачи распознавания такой участок «остановки» будет мешать обучению и классификации. В рамках данной задачи такие участки необходимо будет удалить.

При распознавании деятельности человека важно, чтобы наш алгоритм был независим от конкретного пользователя. То есть, чтобы не нужно было каждый раз производить настройку и можно было сразу проводить классификацию на новых данных.

Для визуализации работы алгоритма классификатора будем использовать матрицу ошибок, в которой строки соответствуют истинным классам, а столбцы – решениям классификатора. Имея матрицу ошибок, мы легко сможем рассчитать точность и полноту для каждого класса [5].

Таким образом, сделаем общий вывод, что для распознавания действий человека по данным с датчика акселерометра необходимо провести предварительную обработку данных для обучения модели классификатора, а именно: бороться с зашумленностью, убирать неинформативные участки, нормировать данные.

Дальнейшая работа будет направлена на выбор метода классификации данных для распознавания активности человека и оценку построенной модели.

Список литературы

[1]. *Цыкунов И.* Применение акселерометров в задачах локации мобильных объектов. [Электронный ресурс] – URL: <https://kit-e.ru/sensor/primenenie-akselerometrov-v-zadachah-lokaczii-mobilnyh-obektov/> (дата обращения 28.03.21)

[2]. *Rafael C.Gonzalez, Richard E.Woods* Digital image processing. [Электронный ресурс] – URL: <http://masters.donntu.org/2007/kita/gett/library/12.htm> (дата обращения 02.04.21)

[3]. *Евсегнеев О.* Фильтр низких частот. [Электронный ресурс] – URL: <https://robotclass.ru/articles/low-pass-filter/> (дата обращения 25.03.21)

[4]. *Катков О.* Снижаем погрешность GPS на Android с помощью фильтра Калмана и акселерометра. [Электронный ресурс] – URL: <https://medium.com/maddevs-io/ru-reduce-gps-data-error-on-android-with-kalman-filter-and-accelerometer-b81f1026e06c> (дата обращения 25.03.21)

[5]. Как понять матрицу ошибок (Confusion Matrix). [Электронный ресурс] – URL: <https://hranalytic.ru/kak-ponyat-matrica-nesootvetstvij-confusion-matrix/> (дата обращения 25.03.21)

Папкина Маргарита Павловна – студентка КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: parpkova.margarita@yandex.ru

Трушков Д.С., Корлякова М.О.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ ПО РАССТОЯНИЮ ДО ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ

Продолжительное развитие компьютерных технологий открывает всё больше возможностей для создания интеллектуальных и эффективных систем компьютерного зрения. Они направлены на решение проблем, связанных с обработкой цифровых изображений и распознаванием объектов. В свою очередь, данные алгоритмы направлены на решение задач автопилотирования, распознавания рукописных символов, слежения за объектами, детектирования лиц, проверки на подлинность и других [1].

Мобильной автономной платформе необходимо ориентироваться в среде, для этого необходимо в реальном времени строить карту глубины, потому что на ней основаны современные системы поиска пути и ориентации. Построить карту глубины можно с помощью лидара, однако он не позволяет распознавать объекты и является слишком дорогим, поэтому вместо него будем использовать камеру. Однако, известные системы построения карты глубины основаны на стереопаре и требуют калибровки и точной настройки. Попробуем избежать калибровки и обучим автоэнкодер на данных со стереопары без предобработки.

Автоэнкодеры – это нейронные сети прямого распространения, которые восстанавливают входной сигнал на выходе, то есть в них происходит отображение пикселя входного изображения на пиксель выходного изображения.

В рамках задачи реализации на мобильной автономной платформе системы построения карты глубины в реальном времени была реализована нейросетевая модель построения карты глубины [2]. Схема реализованной модели представлена на рис. 1.

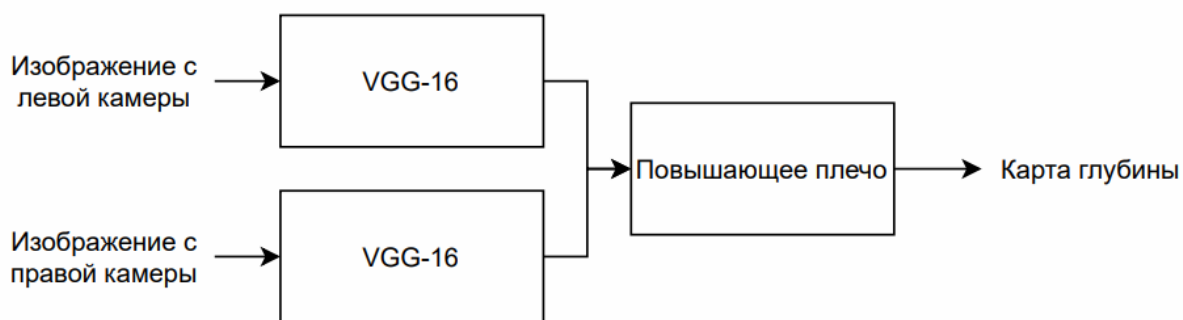


Рис. 1. Схема сети.

Для разработанной модели был реализован перенос обучения, то есть обучение происходило на датасете Apollo Scape stereo dataset [3], в котором есть как фотографии, снятые на стереопару, так и соответствующая им карта глубины.

В дальнейшем после обучения модели можно будет сделать переобучение только нескольких (возможно всего одного) слоёв сети на изображениях со стереопары робота. Таких изображений понадобится существенно меньше, чем для полного обучения сети [4].

В процессе построения модели для вычисления глубины встретилась следующая сложность: отношение интенсивности пикселя на изображении к реальному расстоянию до соответствующей точки не линейно [5]. Обычная для построения регрессионных моделей функция потерь по средней квадратичной ошибке не учитывала функцию связи интенсивности пикселя и расстояния до соответствующей точки пространства, поэтому дальние объекты были плохо различимы на изображениях, полученных на выходе обученной сети.

В данной работе рассматривается задача сравнения стандартного обучения по среднеквадратичной функции потерь и обучения по разработанной функции потерь. Если будет определено преимущество обучения по разработанной функции потерь, это позволит получить преимущество во всех задачах построения карты глубины с помощью нейронных сетей.

Изображение с картой глубины хранится в формате uint-16, оно было подвергнуто нормализации.

Пример реальных изображений и изображений с нанесённой картой глубины из датасета представлены на рис. 2.

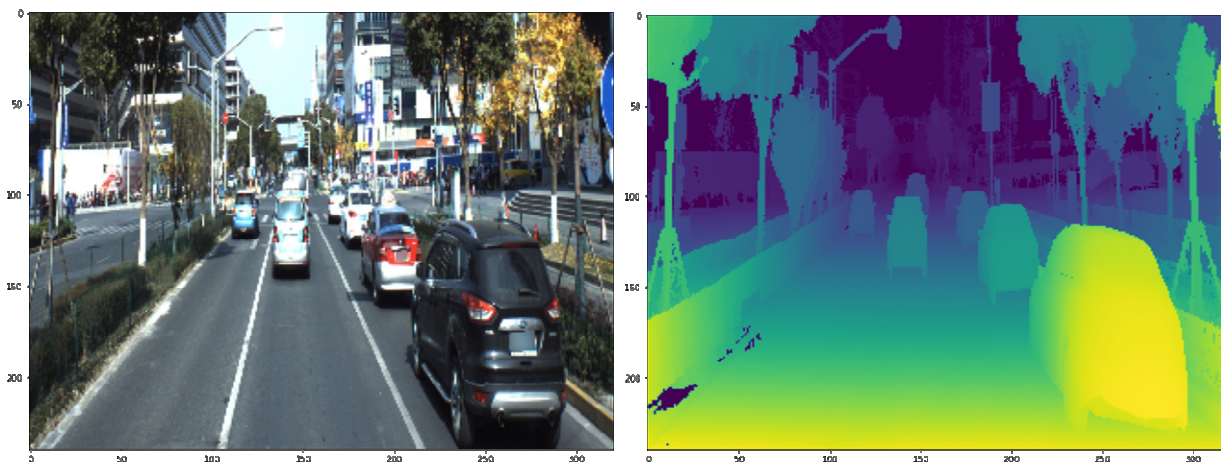


Рис. 2. Реальное изображение и изображение с нанесённой картой глубины

В ходе изучения способа построения карты глубины было получено следующее соотношение между интенсивностью пикселя и реальным расстоянием до точки:

$$Range = \frac{\tan\left((1 - pix) \frac{\pi}{2}\right)}{coef},$$

где pix – интенсивность пикселя; $coef$ – коэффициент, связывающий функцию тангенса с реальным расстоянием; $Range$ – расстояние до соответствующей пикселю точке

Однако, возникла проблема с функцией тангенса, поскольку для $\frac{\pi}{2}$ он принимает значение ∞ , соответственно pix не может быть равен 0, поэтому на него было наложено условие:

$$\forall pix < 0,02 \rightarrow pix = 0,02 .$$

А именно все значения пикселей меньше 0.02 округляются до 0.02. На практике это значит, что на расстояниях больше 132 м мы перестаём различать объекты.

Значение *coef* было получено экспериментально и составило 0.00024.

В ходе реализации и обучения модели для построения карты глубины использовались следующие параметры сети:

При обучении сети использовалась среднеквадратичная ошибка (Mean Square Error) *функция потерь*.

среднеквадратичная ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 ,$$

где \tilde{y}_i - значение на выходе модели, y_i - истинное значение, n - количество пикселей изображения.

Также производилось обучение с использованием разработанной функции потерь, связанной с реальным расстоянием до точки. Для этого в функции вычисляли реальное расстояние до точки и расстояние до точки на выходе модели и находили среднюю абсолютную ошибку. Будем называть эту функцию потерь средней абсолютной ошибкой по расстоянию

Средняя абсолютная ошибка по расстоянию:

$$MAER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\tan\left(\left(1 - y_i\right) \frac{\pi}{2}\right)}{coef} - \frac{\tan\left(\left(1 - \tilde{y}_i\right) \frac{\pi}{2}\right)}{coef} \right| ,$$

где \tilde{y}_i – значение на выходе модели, y_i – истинное значение, n – количество пикселей изображения; *coef* – коэффициент, связывающий функцию тангенса с реальным расстоянием

Использовался адаптивный *метод обучения RMSprop* (root mean square propagation). В основе RMSprop лежит метод градиентного спуска, однако используется только знак градиента, а шаг адаптируется в ходе обучения.

Сравним модель, обученную по функции потерь MSE и сравним её с моделью, обученной по функции потерь средней абсолютной ошибке расстояний.

После 5 перезапусков процесса обучения сети для функции потерь mse и maer были получены графики, представленные на рис. 3, 4

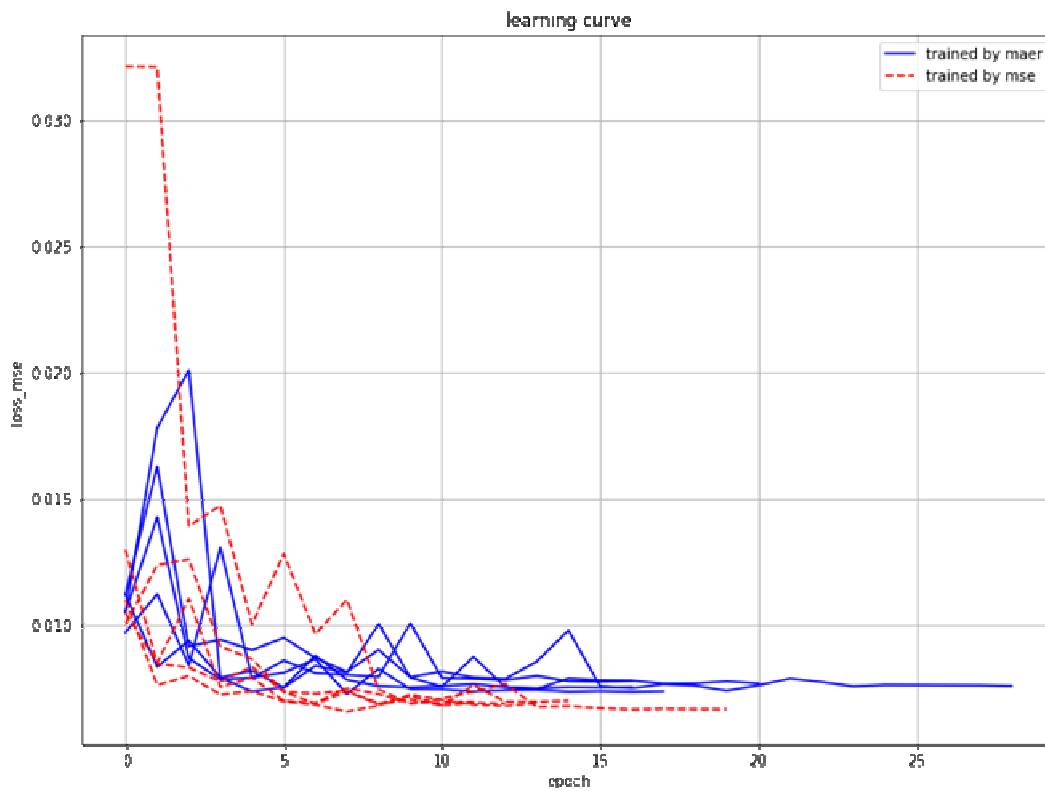


Рис. 3. Кривая обучения для метрики MSE

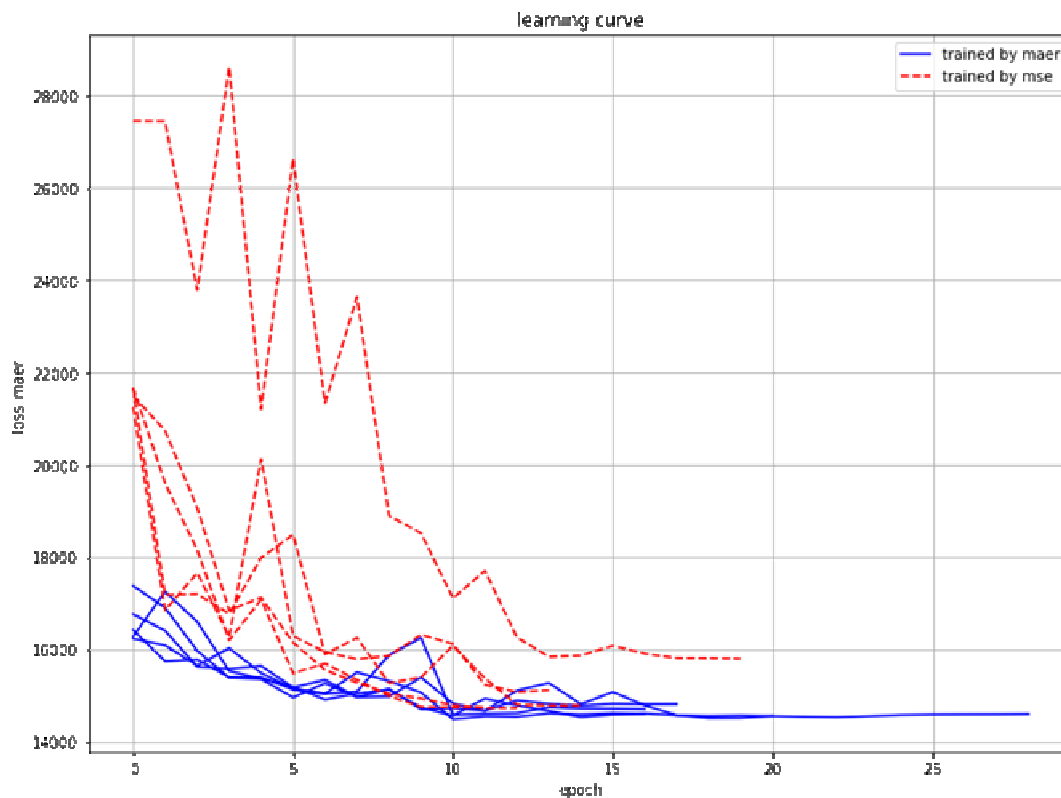


Рис. 4. Кривая обучения для метрики MSE

Статистические характеристики полученного обучения для 5 реализаций на каждую функцию потерь представлены в табл. 1.

Статистические характеристики полученного обучения

Функция потерь, используемая при обучении	MSE	MAER
Среднее значение метрики MSE для валидационной выборки	0.006879	0.007589
СКО метрики MSE для валидационной выборки	0.000128	0.000154
Процент отклонения СКО от среднего значения метрики MSE для валидационной выборки	1.87%	2.04%
Среднее значение метрики MAER для валидационной выборки	15032.09	14652.79
СКО метрики MAER для валидационной выборки	455.4082	105.2184
Процент отклонения СКО от среднего значения метрики MAER для валидационной выборки	3.03%	0.72%

Таким образом, на основании рисунков 3,4 и таблицы 1 можно прийти к выводу, что обучение по предложенной функции потерь MAER даёт преимущество по среднему значению метрики MAER, что позволяет достичь большей точности карты глубины для дальних точек пространства.

Список литературы

[1] Корлякова М.О., Трушков Д.С., Лохмачев Н.В. и др. Анализ моделей распознавания образов в системах технического зрения для мобильных автономных платформ // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 13 – 15 ноября 2018 г. Т. 2. –Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – С. 13–17.

[2] Pedoeem, Jonathan & Huang, Rachel. (2018). YOLO-LITE: A Real-Time Object Detection Algorithm Optimized for Non-GPU Computers

[3] <http://apolloscape.auto/stereo.html>. (дата обращения 20.03.2021)

[4] Chao, Ping & Kao, Chao-Yang & Ruan, Yu-Shan & Huang, Chien-Hsiang & Lin, Youn-Long. (2019). HarDNet: A Low Memory Traffic Network

[5] He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R.B. (2017). Mask R-CNN. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2980-2988.

Трушков Дмитрий Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия. E-mail: dim.alex@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы Автоматического Управления» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	3
<i>1. Вишневецкий М.С.</i> ВЛИЯНИЕ НАСТРОЙКИ СБОРНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	4
<i>2. Русанов В.Д.</i> ВЫБОР ВИДА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	6
<i>3. Фадеев Р.Р.</i> ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТНОГО НАКЛОНА ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ	10
<i>4. Ковалева Н.Л.</i> ВЫБОР МЕТОДА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН	13
<i>5. Максимов Д.Е.</i> ВЫБОР МЕТОДА И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	15
<i>6. Родионов Д.А.</i> ВЫБОР МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	20
<i>7. Тоиржонов О.З.</i> ВЫБОР МЕТОДА НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧЕРВЯКОВ.....	24
<i>8. Трегубов А.В.</i> ВЫБОР МЕТОДА ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ СТАЛИ	28
<i>9. Куликова В.Р.</i> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ.....	31
<i>10. Морозова Д.Д.</i> ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	34
<i>11. Старкова Е.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТИ ШЛИЦЕВ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ НА ПРИМЕНЯЕМОСТЬ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	37
<i>12. Касумов Н.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ТОЧНОСТЬ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	40

13. Лагутова С.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ.....	42
14. Штокал А.О., Рыков Е.В., Артемьев А.В., Шаталов В.К., Богачев В.А., Баженова О.П., Рожкова Т.В., Солдатова И.В., Демина В.Д.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОЩАДОК ИЗНОСА КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПОРА УЗЛОВ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	45
15. Антипин В.А.	
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ПОДШИПНИКИ.....	53
16. Платонов В.В.	
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАЛАДКИ СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ.....	56
17. Пулин П.А.	
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ.....	58
18. Мартынов Д.Э.	
ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТЕ В УСЛОВИЯХ АО «КНИИТМУ».....	62
19. Марочкин В.В.	
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ.....	65
20. Яшкин К.В.	
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	68
21. Насевич И.Р.	
СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНАЛАДКИ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С СИСТЕМОЙ НУЛЕВОГО БАЗИРОВАНИЯ	72
СЕКЦИЯ 2.	
ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	74
1. Фирсов И.В., Чернова Т.Г.	
ВЫБОР ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ.....	75
2. Ботников В.Е., Зыбин И.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	77
3. Антохин М.С., Труханов К.Ю.	
ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИВАРКИ ЛЮКОВ К ОБЕЧАЙКЕ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ	81

4. *Артеменко С.А., Орлик А.Г., Орлик Г.В.*

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ШНУРОВОГО МАТЕРИАЛА ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИЗНОШЕННЫХ ЗУБЬЕВ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА	86
--	----

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА 90

1. *Гришина А.И., Андреев В.В.*

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОСХЕМА ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА	91
--	----

2. *Корнев С.А., Андреев В.В.*

ЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ RISC-V ПРОЦЕССОРНОГО ЯДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CADENCE GENUS	95
---	----

3. *Дмитриев А.А.*

МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНА В ОПТИЧЕСКИХ ДИФФУЗНЫХ ДАТЧИКАХ	98
---	----

4. *Корнев С.А., Андреев В.В.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ RISC-V ПРОЦЕССОРА	100
--	-----

5. *Кондратов Д.А., Драч В.Е.*

ОРИЕНТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИК ДАТЧИКА	104
--	-----

6. *Дмитриев А.А., Шахтарин Д.С.*

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ	108
--	-----

7. *Власовский А.И., Мануйлов А.В., Масюк В.М., Андреев Д.В.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ТРЁХФАЗНОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО МОТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА БЕЗ СЕРДЕЧНИКОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ	111
--	-----

8. *Пазенко И.А., Андреев Д.В.*

РАЗРАБОТКА ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДАХ	115
--	-----

9. *Голубков К.Г., Андреев В.В.*

ТРАНЗИСТОРЫ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА	119
---	-----

СЕКЦИЯ 4. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ГИДРОМАШИНЫ 123

1. *Киселев Р.С., Жинов А.А.*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ БАНДАЖА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНИ	124
--	-----

2. <i>Ильдияров Е.Н., Анкудинов А.А.</i>	
АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВОГО НАГНЕТАТЕЛЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	127
3. <i>Малахов В.С., Сизов А.Н.</i>	
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО НАСОСА НА ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	131
4. <i>Каримуллина Е.В., Шитохина О.Г.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ОТВЕРСТИЙ РОТОРА И СТАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕВОГО НАСОСА	135
5. <i>Коваленко А.С., Савин В.Ю.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПЕРТОГО ОБЪЁМА В ШЕСТЕРЕННОМ НАСОСЕ	139
6. <i>Лычагин А.С., Савин В.Ю.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ В ГИДРОМАШИНАХ	142
7. <i>Галкин А.И., Шитохина О.Г.</i>	
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЁМНОМ ГИДРОПРИВОДЕ	146
8. <i>Заболотский И.П., Шитохина О.Г., Чубаров Ф.Л.</i>	
ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	148
9. <i>Антипов В.С., Ильичев В.Ю.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АНТИПОМПАЖНОЙ СИСТЕМЫ НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА	153
10. <i>Волков Г.В., Савин В.Ю.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЛАСТИНЫ НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НЕЕ СИЛ	156
11. <i>Соколов М.И., Шевелев Д.В.</i>	
К ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ.....	161
12. <i>Козырев А.А., Жинов А.А.</i>	
ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ХОЛОДИЛЬНИКА-ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРЫ МАРСА	164
13. <i>Трутнев Д.С., Ильичев В.Ю.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОДЕЛЬНЫХ ТУРБИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОТУРБИНЫ	167
14. <i>Лужецкий А.А., Ильичев В.Ю.</i>	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ.....	171

<i>15. Даньшин М.С., Ильичев В.Ю.</i>	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ.....	177
<i>16. Егоров Е.В., Шевелев Д.В.</i>	
РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	180
<i>17. Мусатов Д.А., Ильичёв В.Ю.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ	182
<i>18. Качурин А.В., Гридчин Н.В.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТУПЕНЕЙ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА.....	185
<i>19. Каньшин К.С., Чубаров Ф.Л., Сизов А.Н.</i>	
ТИПОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПТУ И ТГ	192
<i>20. Ващенко А.В., Анкудинов А.А.</i>	
УЛУЧШЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ОСЕВИХРЕВОЙ СТУПЕНИ.....	199
<i>21. Богатырёв А.А., Анкудинов А.А.</i>	
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНДЕНСАТНО-ПИТАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	203
<i>22. Ганков М.С., Шевелев Д.В.</i>	206
ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ДИФФУЗОРАХ	206

СЕКЦИЯ 5.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

209

<i>1. Брынза А.А., Корлякова М.О.</i>	
ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗА ГРАНИЦАМИ ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ АТТРАКТОРА ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	210
<i>2. Литовченко Д.М., Сайфудинов Н.А.</i>	
ПОИСК ЛЮДЕЙ НА АЭРОФОТОСНИМКАХ	216
<i>3. Щербаков Н.В., Корлякова М.О.</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА SLAM	221
<i>4. Савина О.И., Краснощеченко В.И.</i>	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИБКОГО ОДНОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗОК СХВАТА.....	226

5. <i>Холостунина В.С., Корлякова М.О.</i>	
РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ БИОИДЕНТИФИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА В ВИДЕОПОТОКЕ	231
6. <i>Папкова М.П.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ С ДАТЧИКА АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	236
7. <i>Трушков Д.С., Корлякова М.О.</i>	
РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ ПО РАССТОЯНИЮ ДО ОБЪЕКТА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ.....	239

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ

Материалы
Региональной научно-технической конференции

Том 1

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 28.04.2021.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 15,69. Усл. п. л. 14,59.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен в Редакционно-издательской группе
отдела научной инновационной деятельности
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87