

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**



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      **Научоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе:** материалы региональной научно-технической конференции, 17 – 19 апреля 2018 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 276 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, 2018  
© Калужский филиал МГТУ  
им. Н. Э. Баумана  
© Издательство МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2018

## **СЕКЦИЯ 1.**

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

В.Н. Атрощенко, К.Г. Короходкина

## **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В 21 веке в промышленности важным показателем успешного предприятия является умение рационально использовать имеющиеся ресурсы. Лидерами рынка становятся компании, производящие продукцию высокого качества. Важной качественной характеристикой продукции в машиностроении является износостойкость. Одним из методов увеличения износостойкости является хромирование поверхностей деталей.

Первая информация в истории о возможности получения металлического хрома из электролитов на основе хромовой кислоты относится к 1856 году. Но из-за плохой воспроизводимости процесса эти сведения подверглись критике и считались сомнительными [1]. Развитие возможности хромирования деталей после выдвижения теорий было невозможно еще в течение полувека. В настоящее время этот процесс хорошо исследован и имеется множество исследований в области хромирования деталей.

Хромирование, как правило, осуществляется вакуумным и гальваническим способами. В представляемой работе применялся второй.

К хромируемым поверхностям предъявляют ряд требований по качеству поверхности. Перед хромированием заготовки проходят через следующие операции:

- 1) механическая обработка поверхностей (шлифование, полирование, пескоструйка, алмазное выглаживание и другие методы);
- 2) термическая обработка (при необходимости);
- 3) предварительное обезжиривание для удаления консервационной смазки и основной части органических загрязнений по общепринятой технологии путем промывки органическими растворителями или обработки в горячем растворе щелочи или в моющих растворах;
- 4) заделка отверстий и изоляция участков, не подлежащих хромированию;
- 5) монтаж деталей на подвески;
- 6) обезжиривание;
- 7) промывка в воде;
- 8) подготовка поверхности различных металлов перед хромированием;
- 9) завешивание подвески и анодов в ванну хромирования.

Важной операцией является механическая обработка, ведь от полученной поверхности будет зависеть качество нанесения хрома на поверхность [2-4]. Важными параметрами качества поверхности являются среднее расстояние между местными пиками профиля ( $R_s$ ), число пиков ( $R_{pc}$ ) на единицу длины и среднее арифметическое отклонения профиля ( $R_a$ ) по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS)». По значениям этих параметров определяется число и расстояние между пятнами фактиче-



ского контакта трущихся поверхностей. На пятнах фактического контакта происходят элементарные акты взаимодействия поверхностей, приводящие к возникновению трения и износа. От среднего расстояния между пятнами фактического контакта зависит частота их взаимодействия.

Перед хромированием деталей необходимо получить поверхность с  $Ra=0,16...0,08$  мкм или  $Ra=0,08...0,04$  мкм.

Ставится задача оценки методов механической обработки деталей перед хромированием для увеличения его износостойкости. В ходе исследования планируется провести однофакторный эксперимент, где будет необходимо обработать вал из стали 45 до получения  $Ra=0,16...0,08$  мкм следующими методами: шлифование и алмазное выглаживание. После хромирования заготовки будут установлены в экспериментальную установку для контроля износостойкости [5]. Экспериментальная установка основана на идее предложенной Ю.Г. Шнейдером в работе.

Износ определяется по изменению массы образцов, высоты исходных неровностей и диаметрального размера образцов [2]. Будет установлена зависимость длительности приработки и приработочного износа от способа обработки поверхности перед нанесением покрытий.

Таким образом, теоретически и экспериментально будет определен вклад влияния геометрических параметров шероховатости, полученных разными методами обработки поверхностей, на износостойкость.

### Список литературы

[1] *Солодкова Л.Н.* Электродитическое хромирование // приложение к журналу "Гальванотехника и обработка поверхности" / Л. Н. Солодкова, В. Н. Кудрявцев; под ред. В. Н. Кудрявцева. Москва, 2007.

[2] *Калмыков В.В., Атрощенко В.Н.* исследование влияния методов обработки поверхностей на их износостойкость // В сборнике: Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 20-22.

[3] *Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N.* Experimental research of variability of surface energy value of fe37-3fn, c45 and 41cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[4] *Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В.* Поверхностная энергия и процесс схватывания контактирующих поверхностей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 11. С. 45-51.

[5] *Шнейдер Ю.Г.* Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 247 с.

**Атрощенко Виктор Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: atroshchenkoviktor@gmail.com

**Короходкина Кристина Геннадьевна** – студент ФГБОУ ВО Тульский государственный университет. E-mail: korokhodkina.k@gmail.com

Е.Д. Степанов, В.А. Атрощенко

## **АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА-РЕГУЛЯТОРА**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Насос 8и64 на предприятии «КАДВИ» входит в состав газотурбинного двигателя, выполняющего роль электростанции во время работ на участках с затрудненным доступом к электричеству.

Принцип работы насоса основан на изменении размеров рабочих камер. Изменение объема рабочих камер и перемещение плунжеров по плоскости наклонной шайбы приводит к забору жидкости с входного патрубка и перемещение забранного объема жидкости в выходной патрубке.

В составе изделия насос обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Дозирование топлива на запуске, обеспечивающее автоматический выход изделия на режим холостого хода;
2. Ограничение температуры газов на запуске изделия за счет коррекции подачи топлива в камеру сгорания по электрическому сигналу от электронного блока системы управления изделием;
3. Выдачу релейного электронного сигнала при выходе изделия в процессе запуска на режим холостого хода;
4. Поддержание заданной частоты вращения ротора на рабочих режимах изделия;
5. Коррекцию статической характеристики регулятора частоты вращения на рабочих режимах изделия по электрическому сигналу от электронного блока системы управления изделием;
6. Ограничение максимального давления топлива перед форсункой изделия.

Насос состоит из следующих элементов:

1. Качающего узла;
2. Ротора;
3. Корпуса насоса;
4. Уплотнений.

В качающий узел насоса входит плунжерный блок 34, пять плунжеров 16 со всасывающими клапанами, пять плунжерных пружин 30 с колпачками 31, прокладка 23 и втулка 29, пять комплектов нагнетательных клапанов (детали 19, 20, 22) и наклонная шайба 42. Каждый плунжер 16 имеет седло для всасывающего клапана и четыре отверстия для подвода топлива.

Всасывающий клапан автоматический. Для прижима плунжера к наклонной шайбе установлена пружина 30, опирающаяся на направляющую втулку 29 и колпачок 31, вставленный в плунжер 16.

Плунжерный блок имеет пять цилиндрических расточек (цилиндров) под плунжеры. Крепится блок в корпусе 17 насоса пятью винтами с помощью кольца.

### Принцип работы.

При вращении ротора 13 каждый плунжер 16 совершает возвратно-поступательное движение, делая за один оборот ротора ход всасывания и ход нагнетания. В начале хода всасывания плунжер находится в крайнем верхнем положении. Всасывающий клапан 32 и нагнетательный клапан 22 закрыты (прижаты к седлам). В период хода всасывания плунжер 16 движется в блоке под действием пружины 30 вправо, отслеживая положение наклонной шайбы 42 относительно плунжерного блока. Под действием возникшего при движении плунжера перепада давлений всасывающий клапан 32 открывается, и топливо поступает в цилиндр. Нагнетательный клапан 22 в этот период закрыт и удерживается в закрытом положении давлением топлива в нагнетательной полости «Н».

При повороте ротора на  $180^\circ$  с момента начала всасывания плунжер начинает двигаться в обратном направлении (влево), совершая рабочий ход нагнетания. Всасывающий клапан, вследствие повышения давления в цилиндре, закрывается (прижимается к седлу). Давление в цилиндре растет. При достижении давления, равного давлению в нагнетательной полости «Н», нагнетательный клапан открывается, и топливо из цилиндра начинает вытесняться в нагнетательную полость. Когда давление топлива в цилиндре становится меньшим или равным давлению в нагнетательной полости, нагнетательный клапан 22 закрывается. При этом плунжер снова приходит в свое крайнее левое положение.

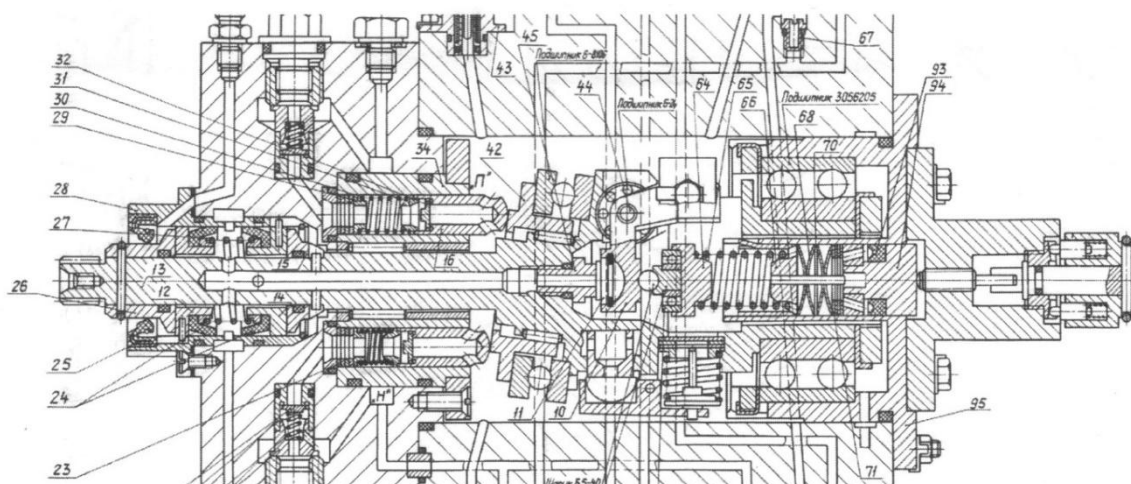


Рис. 1. Схема насосной части насоса-регулятора 8и64

Ввиду большой номенклатуры производимых насосов и большой схожести изделий, имеет смысл написание группового технологического процесса сборки на всю номенклатуру.

### Список литературы

[1] Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1986. – 320 с, ил.

[2] Башта, Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем / Т.М. Башта. - М.: Книга по Требованию, 2012. - 167 с.

[3] Лобачев, П.В. Насосы и насосные станции / П.В. Лобачев. - М.: Стройиздат; Издание 3-е, перераб. и доп., 2012. - 320 с.

[4] Малышев Е.Н., Малышев А.Н. Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 3.

[5] Малышев Е.Н., Бысов С.А. Создание автоматизированных технологических систем на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов // Автоматизация. Современные технологии. 2012. № 4. С. 26-32.

[6] Малышев Е.Н., Калмыков В.В., Золотайкина А.В., Малышев И.Е., Крюков М.В. Проектирование средств оснащения сборочных операций на основе анализа сборочных связей // Фундаментальные исследования. 2016. № 4-3. С. 512-516.

[7] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[8] Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K. Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 24. С. 15621-15626.

**Степанов Евгений Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 20jenya04@mail.ru

**Атрощенко Виктор Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: atroshchenkoviktor@gmail.com

А.В. Лепченков, В.В. Калмыков

## АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЯМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В условиях автоматизированного производства остается актуальным вопрос обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей машин. Для обеспечения требуемых параметров качества поверхностей при механической обработке используют математические модели, предсказывающие их значения в зависимости от режимов обработки [4].

Корреляционная связь представляет собой связь двух величин, где при изменении одной величины, вторая реагирует изменением своего математического ожидания.

Основной задачей корреляционного анализа является установление направления и формы связи между признаками и проверка уровня значимости коэффициентов корреляции.

Проведем эксперимент по выявлению корреляционной связи между поперечной и продольной шероховатостями. Эксперимент проводился по методике, которая представлена в работах [2-3].

В качестве исходных данных возьмем математические модели двух шероховатостей:

1. Математическая модель продольной шероховатости в виде уравнения регрессии имеет вид:

$$Y(Ra^{\text{прод}}) = 0,234 - 0,019 \cdot X_1(\text{СОЖ}) + 0,015 \cdot X_2(\text{R}) + 0,0317 \cdot X_3(\text{HRC}) - 0,011 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_2(\text{R}) - 0,027 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_3(\text{HRC}) - 0,0097 \cdot X_2(\text{R}) \cdot X_3(\text{HRC}) - 0,0051 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_2(\text{R}) \cdot X_3(\text{HRC})$$

2. Математическая модель поперечной шероховатости в виде уравнения регрессии имеет вид:

$$Y(Ra^{\text{попереч}}) = 1,6377 - 0,1397 \cdot X_1(\text{СОЖ}) + 0,538 \cdot X_2(\text{R}) - 0,549 \cdot X_3(\text{HRC}) + 0,026 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_2(\text{R}) + 0,0616 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_3(\text{HRC}) - 0,660 \cdot X_2(\text{R}) \cdot X_3(\text{HRC}) + 0,187 \cdot X_1(\text{СОЖ}) \cdot X_2(\text{R}) \cdot X_3(\text{HRC})$$

Для проведения расчета используем коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные данные для коэффициента Спирмена

$Ra^{\text{попереч}}$	$Ra^{\text{прод}}$	Ранг $Ra^{\text{попереч}}$	Ранг $Ra^{\text{прод}}$	Разность рангов, d	Квадрат разности рангов, $d^2$
1,09977	0,209	5	3	2	4
0,83	0,3343	1	8	-7	49
0,92133	0,231	2	6	-4	16
1,50333	0,2903	6	7	-1	1
3,021	0,229	7	5	2	4
3,747	0,226	8	4	4	16
0,95	0,192	3	2	1	1
1,0291	0,1637	4	1	3	9

Коэффициент ранговой корреляции:

$$r = 1 - \frac{6 \cdot \sum d^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \cdot 100}{8(64 - 1)} = 0,19$$

где

d – разность рангов каждой пары значений;

n – количество опытов.

Руководствуясь общей классификацией корреляционной связи [1, 5]:

– сильная, или тесная при коэффициенте корреляции  $r > 0,70$ ;

– средняя при  $0,50 < r < 0,69$ ;

– умеренная при  $0,30 < r < 0,49$ ;

– слабая при  $0,20 < r < 0,29$ ;

– очень слабая при  $r < 0,19$ .

Из полученного результата видно, что нельзя утверждать об убедительной связи между поперечной и продольной шероховатостями. Полученный результат позволяет производить корректировку факторов для эффективного управления микрорельефом обработанной поверхности деталей.

### Список литературы

[1] Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова, Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.

[2] Калмыков В.В., Мусохранов М.В. Физические параметры поверхностей металлов // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – № 3 (14). – С. 105–108.

[3] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2016. – № 1 (5). – С. 68–75.

[4] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 8–1. – С. 55–58.

[5] Харченко М.А. Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 31 с.

**Калмыков Вадим Владимирович** – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

**Лепченков Александр Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

И.В. Кузнецов, Д.А. Барина

## **ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ОСАДКИ ПРЕССА НА ТОЧНОСТЬ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ОСАЖИВАЕМЫХ ПОКОВОК**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Осадка штучных цилиндрических заготовок является одной из наиболее распространенных операций увеличения диаметра заготовок посредством уменьшения их высоты перед основной формоизменяющей операцией холодной объемной штамповки (ХОШ) [2].

В зависимости от особенностей процесса осадки к погрешностям формы и точности размеров осаживаемых заготовок предъявляют различные требования [3].

Одним из основных показателей геометрической точности цилиндрических заготовок, наряду с параллельностью торцевых поверхностей, после их осадки, является точность диаметральных размеров, так как именно она определяет точность расположения штучных заготовок в матрице штампа при осуществлении основных формоизменяющих операции ХОШ.

Для анализа точности диаметральных размеров осаживаемых цилиндрических поволоков на основе теории параметрической чувствительности были получены формулы для определения коэффициентов преобразования, численные значения которых показывают, какая часть исходной относительной погрешности преобразуется в погрешность диаметра поволоки [4].

Для установления того, как случайные исходные относительные погрешности влияют на точность диаметра осаживаемых заготовок – в зависимости от типа применяемого пресса для осадки, – выполним сравнительный анализ гидравлического и универсального кривошипного прессов.

На рисунке 1 представлены графики зависимости коэффициента преобразования относительной исходной погрешности объема ( $\delta V$ ) в относительную погрешность диаметра поволоков после их осадки на гидравлическом и кривошипном прессах от соотношения  $d/h$  из стали 10 диаметром 32 мм. Коэффициент контактного трения в расчетах принят  $\mu = 0,15$  (осадка без смазки), жесткость кривошипного пресса со штампом – 90 МН/м и 300 МН/м.

Из анализа графиков на рисунке 1 видно, что при равной величине исходной погрешности объема, погрешность диаметра поволоков, осаживаемых на кривошипном прессе, значительно превышает аналогичный показатель поволоков, осаживаемых на гидравлическом прессе.

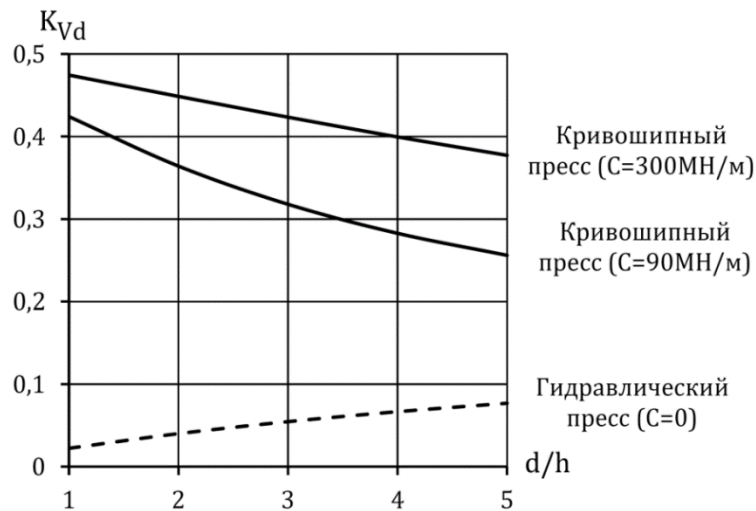


Рис. 1. Зависимости коэффициента преобразования исходной относительной погрешности объема в относительную погрешность диаметра поковки от соотношения  $d/h$

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что штучным заготовкам, изготавливаемым осадкой на гидравлическом прессе, обеспечивается более высокая точность диаметра, по сравнению с осадкой на кривошипном прессе, а также что уменьшение жесткости кривошипного прессы со штампом способствует увеличению точности диаметрального размера поковки. Полученные значения коэффициентов преобразования с высокой степенью точности подтверждаются результатами ранее выполненных экспериментальных исследований [1].

### Список литературы

- [1] *Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г.* Точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КШП. ОМД. – 2000. – № 10. – С. 16-21.
- [2] *Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И.* Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессы // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 6. – С. 13-18.
- [3] *Воронцов А.Л.* Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие: в 2т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [4] *Кузнецов И.В., Барина Д.А., Антонюк Ф.И.* Точность диаметральных размеров осажённых цилиндрических повокков при осадке на прессы // ВНТК 2017 «Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деят. в вузе». – С. 81-82.

**Кузнецов Иван Васильевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru.

**Барина Дарья Андреевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: daria.barina2016@yandex.ru.



Р.О. Ермачков, Ф.И. Антонюк

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА НАЛАДКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОСАДКИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Наиболее рациональным способом получения штучных заготовок является отрезка на ленточнопильных станках, которая исключает искажение формы заготовки присущей резке в штампах. Для получения необходимого размера заготовок их подвергают свободной осадке [12].

Осадка – наиболее распространенный метод увеличения диаметра заготовки и уменьшения ее длины перед основной формоизменяющей операцией холодной объемной штамповки [8].

Точность осадки – проблема, нашедшая отражение в работах многих исследователей. В ходе экспериментов были выявлены ряд факторов, влияющих на точность холодной осадки. К этим факторам относятся: относительная высота исходных заготовок, степень осадки, условия контактного трения, скорость деформирования [1, 3-5].

В работе [2] было исследовано влияние погрешностей высоты и диаметра исходной заготовки, отношения  $d/h$  поковки, а также жесткости пресса на относительную погрешность высоты осаженой поковки  $\delta h = \Delta h/h$ .

Осадка может производиться на различных типах прессов (кривошипных, гидравлических и винтовых).

Перед началом процесса осадки необходимо произвести наладку технологической системы.

Наладкой технологической системы называется процесс подготовки технологического оборудования и технологической оснастки к выполнению определенной технологической операции [10].

Способ наладки – один из менее изученных факторов, влияющих на точность размеров при осадке. При наладке любой технологической системы неизбежно возникает погрешность наладки, так как нельзя каждый раз добиться одного и того же значения регулируемого параметра. Наладка любого пресса заключается в установлении основного параметра, при котором размеры штампуемых поковок находились бы в пределах, ограниченных полем допуска [7].

Исходя из результатов исследований процесса осадки, можно предположить, что способ наладки пресса будет оказывать существенное влияние на точность размеров (как высотных, так диаметральных) заготовок.

Универсальные гидравлические прессы, применяемые для холодной объемной штамповки, уступая кривошипным по производительности, а в некоторых случаях, и по показателям точности изготавливаемых поковок,

вместе с тем обладают рядом несомненных преимуществ. К ним относятся постоянство силы на всей длине рабочего хода, отсутствие возможных перегрузок рабочих деталей штампов, более эффективное использование мощности привода, особенно при выполнении энергоемких операций с большой величиной рабочего хода. Однако, прежде всего при их выполнении, гидравлические прессы уступают кривошипным по точности высотных размеров штампуемых поковок [9].

Таким образом, для реализации в полном объеме преимуществ гидравлических прессов необходим поиск возможных путей повышения точности указанных размеров. Одним из этих путей может выступить способ наладки технологической системы.

В литературе, можно найти редкие примеры исследований в этой области. Так, авторы работы [6] на основе выполненного анализа и экспериментальных исследований операции обратного выдавливания стаканов определили возможность повышения точности толщины их дна настройкой деформирующей силы гидравлического пресса с допустимым положительным отклонением ее величины. В ходе выполнения работы было установлено, что погрешность толщины дна стаканов, изготавливаемых обратным выдавливанием, может быть уменьшена путем установления необходимой для выдавливания деформирующей силы гидравлического пресса с максимально допустимым положительным отклонением.

В условиях производства, как правило, имеется совокупность (партия) заготовок, распределение размеров которых подчиняется закону нормального распределения Гаусса со стандартным отклонением  $\sigma$  (рисунок 1) [11].

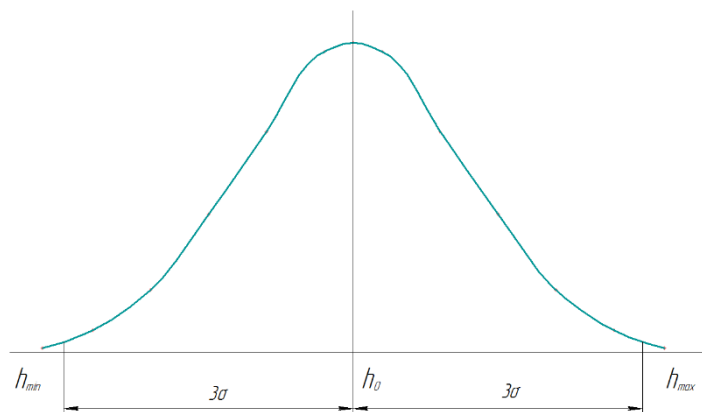


Рис.1. Распределение размеров партии заготовок со стандартным отклонением  $\sigma$

При таком распределении велика вероятность, что настройка будет проводиться от размера  $h_0$ , а вероятность настройки от размеров  $h_{max}$ ,  $h_{min}$  будет минимальной. Но всегда ли это правильно? Не может ли оказаться так, что максимальная точность размеров осажённых заготовок будет достигаться при наладке прессы от крайней левой или крайней точек кривой нормального распределения.

Поиск ответа на данный вопрос не был найден ни в одном из рассмотренных источников, и именно на решение этой проблемы и будет направлен поставленный эксперимент.

### Список литературы

[1] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Анализ факторов, влияющих на точность холодной плоской осадки // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. – № 1. - с. 3-5.

[2] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г., Точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КИШП.ОМД. – 2000. №10. С.16-21.

[3] Антонюк Ф.И., Зенкина И.А., Кузнецов И.В. Повышение точности диаметральных размеров цилиндрических поковок при холодной осадке // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 9-15.

[4] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И., Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессах // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. №6. С. 13-18.

[5] Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В., Малышев А.Н. Анализ точности холодной штамповки выдавливанием стержневых изделий с фланцами на кривошипных прессах // Фундаментальные исследования. 2015. № 4-0. С. 11-15.

[6] Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Повышение точности холодной объемной осадки на гидравлических прессах// КИШП.ОМД. – 2005.

[7] Вяткин А.Г., Матвеев С.В., Влияние погрешности наладки винтового пресса на точность высотных размеров поковки при осадке// Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. №7. С. 22-25.

[8] Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка/ под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.

[9] Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Точность поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой на кривошипных и гидравлических прессах // КИШП. ОМД. – 2002. – №1. – С. 25–29.

[10] Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для студентов вузов. Л.: Машиностроение, 1985. 512с.

[11] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. – 304 с.

[12] Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 1987. – 384 с.

**Антонюк Феликс Иванович** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonyukfi@yandex.ru

**Ермачков Роман Олегович** – студент КФ МГТУ имени Н.Э. Баумана. E-mail: don.ermachckow2015@yandex.ru

В.Н. Атрощенко, К.Г. Короходкина, Е.Д. Степанов

## **ЗАГРУЗКА ОБОРУДОВАНИЯ В БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В связи с развитием рынка и возрастанием конкуренции, компаниям необходимо поддерживать высокий уровень качества производимых товаров и услуг. По этой причине возникла задача создания такого системного подхода к созданию и оптимизации процессов, который позволит непрерывно совершенствовать компанию, позволит устранить всевозможные виды потерь, а также будет стимулировать работников к саморазвитию и стремлению сделать компанию лидером. В 1980-х годах возникла концепция бережливого производства, которая позволяла выполнить требуемые задачи [1-4].

Концепция бережливого производства включает в себя 25 инструментов: Система 5S, Andon (Андон), Bottleneck analysis (поиск бутылочного горлышка или “узкого места”), Continuous flow (выстраивание непрерывного потока), Gemba (the real place или реальное место), Heijunka (level scheduling или выравнивание производства), Hoshin Kanri (policy deployment или развертывание политики), Jidoka (autonomation или автономизация), Just-in-time (JIT или точно в срок), Kaizen (continuous improvement или постоянное улучшение), Kanban (pull system или вытягивающая система), KPIs (key performance indicators или ключевые индикаторы), Muda (waste или потери), Overall equipment effectiveness (OEE или общая эффективность оборудования), PDCA (plan, do, check, act или планируй, делай, проверяй, действуй), Poka-Yoke (error proofing или защита от ошибки), Root cause analysis (анализ коренных причин), Single-minute exchange of dies (SMED или быстрая переналадка), Six big losses (Шесть потерь производительности), SMART Goals (методика постановки целей SMART), Standardized work (стандартизированная работа), Takt time (время такта), Total productive maintenance (TPM или всеобщее предупредительное обслуживание оборудования), Value stream mapping (VSM или создание карты потока создания ценности), Visual factory (визуализация) [5-6]. Каждый из этих инструментов тесно взаимодействует друг с другом и не может быть реализован в полном объеме без их комбинированного применения. Для решения поставленной задачи была поставлена задача, выяснить, какие инструменты бережливого производства подходят.

Данные инструменты широко применяются во всех отраслях. В российском машиностроении можно выделить пример внедрения системы 5S на предприятии ОАО “ЗМЗ”. В результате использования данного инструмента на предприятии в 2011 году были внедрены: визуальный контроль, специаль-

ная маркировка оборудования (цветовая маркировка и маркировка направления движения и вращения), дисциплинарные стандарты. В результате внедрения на производстве средний суточный темп увеличился на 10%, дефектность на автосборочных предприятиях уменьшилась на 70%, а потери от брака в объеме производственной продукции сократились на 60% [7-8].

Для понимания механизма проблемы был сделан анализ данных инструментов бережливого производства.

В качестве объекта исследования рассматривался механо-сборочный цех по производству редукторов. На Рис. 1 показана структура цеха, включающая несколько участков для механической обработки деталей, на которых установлено табло с кнопкой для подачи визуального сигнала о необходимости поставки заготовок со склада на участок. После того как готовые изделия попадают на склад, становится очевидным, что для сборки не хватает изделий 3. Возникает необходимость выявить причину возникшей проблемы и устранить ее, используя инструменты бережливого производства [9-12].

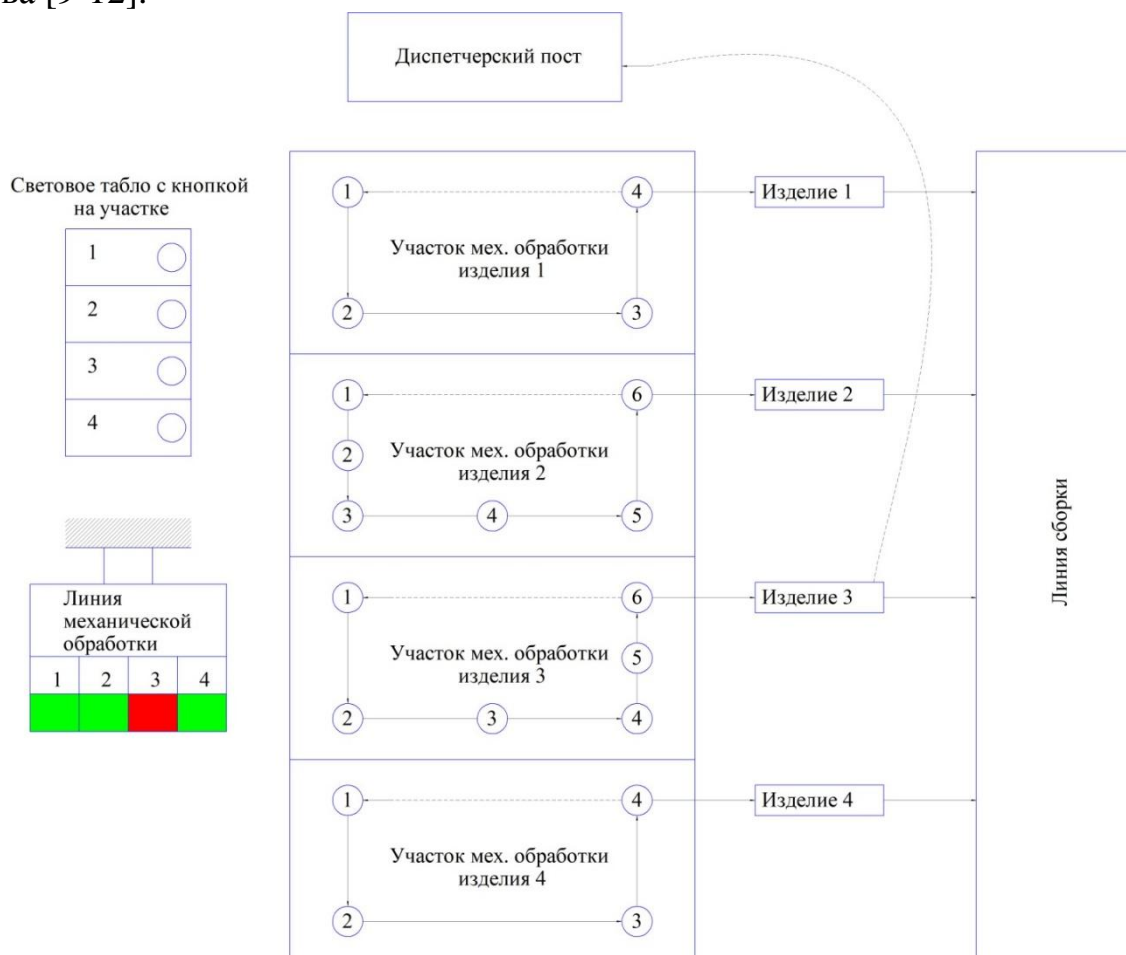


Рис. 1. Схема механо-сборочного цеха

Владея инструментарием бережливого производства легко устанавливается причина несоответствия и вырабатывается руководящее решение по ее оперативному устранению.

## Список литературы

[1] *Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С.* Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[2] *Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н.* Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[3] *Калмыков В.В., Федорова О.С., Малышев И.Е.* Исследование статистических методов анализа технологических факторов при токарной обработке // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 48-52.

[4] *Павлова Т.В., Калмыков В.В.* Методы увеличения эффективности машиностроительного производства // В сборнике: Научно-технические инновации в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе 2013. С. 62-66.

[5] Top 25 lean tools / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.leanproduction.com/top-25-lean-tools.html#25-essential-lean-tools> (дата обращения 07.03.2018)

[6] *Womack J. P.; Jones D. T.* Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Revised and Updated // Publ. Productivity Press. 2013. P. 400.

[7] *Абросимова А.А., Барцев И.А.* Опыт внедрения бережливого производства в машиностроении на примере ОАО «Заволжский моторный завод» // Российское предпринимательство. 2013. №2 (224). С. 73-78.

[8] *Абрамян С.И., Федотов А.А.* Проблемы современного машиностроения России и подходы к их решению // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2015. № 8 (80). С. 3.

[9] *Калмыков В.В., Баринова Д.А., Кузнецов И.В.* Методы оптимизации времени обслуживания рабочего места // В сборнике: Научно-технические инновации в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 29-31.

[10] *Бысов С.А., Малышев Е.Н.* Выявление и анализ организационно-технологических факторов, влияющих на результативность технологических систем, организованных на основе концентрации обрабатываемых и сборочных процессов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3. С. 3.

[11] *Малышев Е.Н., Калмыков В.В.* Обеспечение переналаживаемости бункерных загрузочных устройств // Инженерный вестник. 2013. № 9. С. 1.

[12] *Малышев Е.Н., Бысов С.А.* Реализация комплекса операций обработки и сборки на одном станке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 1. С. 14-21.

**Атрощенко Виктор Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [atroschenkoviktor@gmail.com](mailto:atroschenkoviktor@gmail.com)

**Короходкина Кристина Геннадьевна** – студент ФГБОУ ВО Тульский государственный университет. E-mail: [korokhodkina.k@gmail.com](mailto:korokhodkina.k@gmail.com)

**Степанов Евгений Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [20jenya04@mail.ru](mailto:20jenya04@mail.ru)

К.В. Яшкин

## ЗАДАЧА КОММИВОЯЖЕРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Инженеры на производстве ежедневно сталкиваются с решением технологических задач, требующих отличных знаний математики. Одной из таких задач, является определение кратчайшей траектории движения рабочего органа станка при обработке массива поверхностей. Например, при подготовке управляющих программ для получения множества крепежных отверстий на корпусных деталях, для максимальной производительности следует определить такую последовательность, при которой длина холостых ходов инструмента будет минимальной.

Естественно, что решить подобные задачи без глубоких математических познаний невозможно. В работах [1–7] рассмотрено применение математических методов в инженерных задачах. Человечество с подобными вопросами сталкивалось давно. Еще в 1859 г. У Гамильтон придумал игру «Кругосветное путешествие», состоящую в отыскании такого пути, проходящего через все города, изображенные точками на Рис.1, чтобы посетить каждый город однократно и вернуться в исходный. Говоря математическим языком, это граф, пути в котором, называются гамильтоновыми циклами [8].

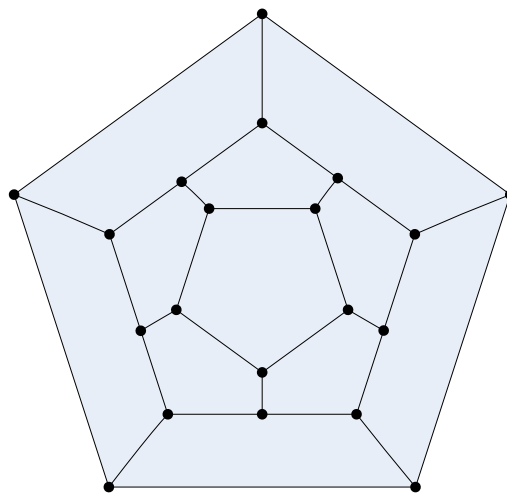


Рис. 1. Гамильтонов граф

Задача о гамильтоновых циклах в графе получила различные обобщения. Одно из этих обобщений – задача коммивояжера, имеющая ряд приложений в исследовании операций, в частности при решении некоторых производственных проблем, приведенных выше. Особенность условия технологической задачи в том, что возвращение к координатам первоначального отверстия не имеет смысла.

Задача Коммивояжера в этом случае формулируется следующим образом: дано  $N$  отверстий, необходимо пройти каждое отверстие только один раз затратив при этом минимальное количество времени.

$$L_{xx} = \sum_{i,j \rightarrow \min} L_{i,j} \quad (1)$$

где  $L_{xx}$  – это минимальная сумма всех перемещений  $L_{i,j}$

Задача коммивояжера может быть решена следующими способами:

- Полный перебор
- Случайный перебор
- Метод ветвей и границ (Алгоритмом Литтла или исключения подциклов)
- Метод ближайшего соседа
- Жадный алгоритм
- Алгоритм самой близкой вставки

В производственных условиях, наибольшее применение получил метод ветвей и границ, так как он легче всего алгоритмируется. Большая эффективность данного метода проявляется в расчетах для поиска обхода девяти и более отверстий. Меньшее количество отверстий легче решается полным перебором вариантов.

### Список литературы

[1] Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С. Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[2] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[3] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 53-55.

[4] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н. Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[5] Калмыков В.В., Малышев А.Н., Покровская М.Э. Анализ способов точного позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 1.

[6] Калмыков В.В., Федорова О.С., Малышев И.Е. Исследование статистических методов анализа технологических факторов при токарной обработке // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 48-52.

[7] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 56-58.

[8] Логинов, Б.М. Лекции и упражнения по курсу «введение в дискретную математику» / Б.М. Логинов. – Калуга: Облиздат, 1998. – 424 с.

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



М.П. Карпов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПАРОНИТА МЕТОДОМ ВЫРУБКИ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Продукция современного машиностроения зачастую эксплуатируется в агрессивных средах и повышенных температурах. Поэтому появляется необходимость использования уплотнительных материалов, способных работать в тяжелых условиях.

В настоящее время широко используются в машиностроении детали из паронита.

Паронит – листовый прокладочный материал. Он имеет сложный химический состав, в который входят преимущественно асбест, синтетический каучук и специальные наполнители. Асбест обеспечивает паронит высокими показателями химической и термической стойкости, синтетический каучук придает дополнительную пластичность, а различный состав наполнителей придает парониту особые исключительные свойства, обеспечивающие стойкость к разным химикатам, в среде которых изделие выполняет свои функции. Кроме этого паронит не подвергается биологическим воздействиям, что позволяет расширить его область применения [5].

ОАО «Калужский двигатель» занимается изготовлением прокладок из паронита. Один из основных методов - вырубка.

Сущность метода заключается в том, что основные конструкционные элементы, а именно отверстия различной формы, иногда контур детали, получаются с помощью пробойников или просечек [6]. Операция вырубки, как правило, выполняется вручную, но есть и перспективы автоматизации.

Качество деталей, полученных этим методом, непосредственно зависит от квалификации рабочего и, в свою очередь, от диаметра отверстий (общий случай – окружность) и ширины стенок между ними [3].

С целью определения степени влияния этих факторов на качество обрабатываемых поверхностей было проведено сравнение этих поверхностей при различных вариациях величин факторов (рис.1) [1, 2]. Для этого используется паронит марки ПМБ-1 ГОСТ 481-40 с шероховатостью поверхности Ra 40 и толщиной 1 мм, набор просечек круглой формы Ø12 мм и Ø16 мм, фанера и слесарный молоток массой 400 г; допуски на размеры по ОСТ 1 00022-80 для штамповочных деталей [4].

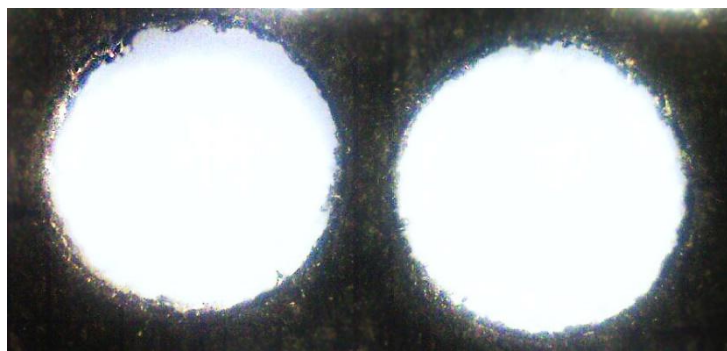
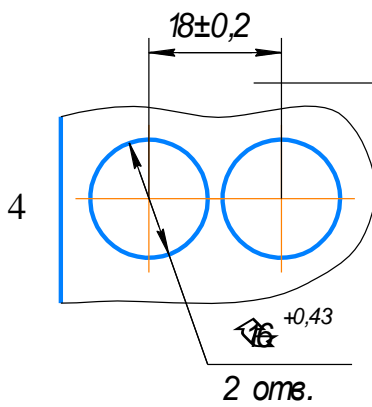
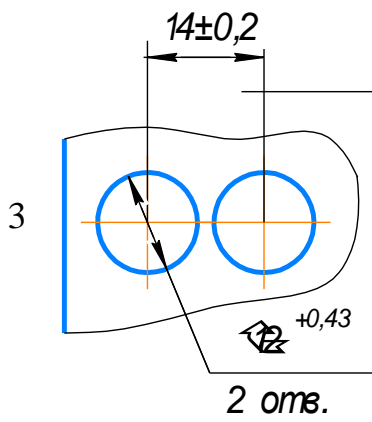
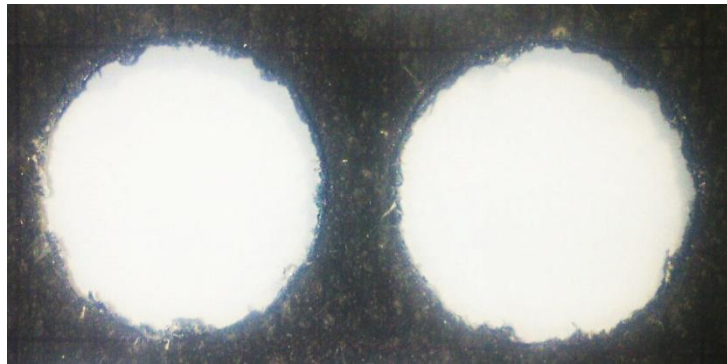
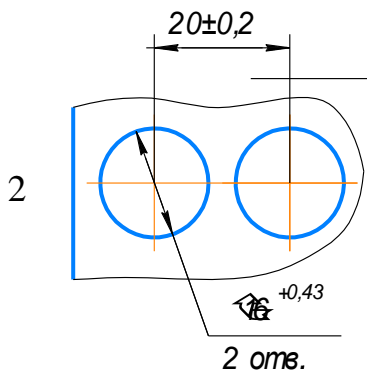
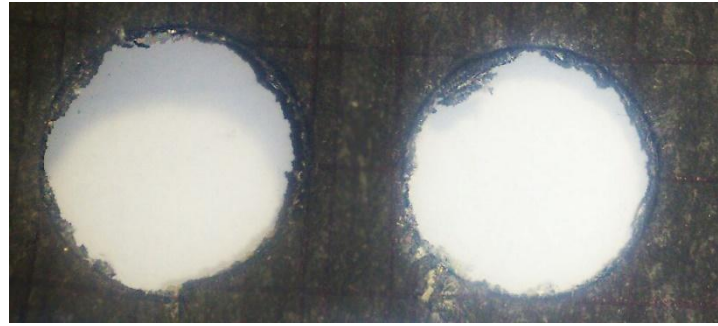
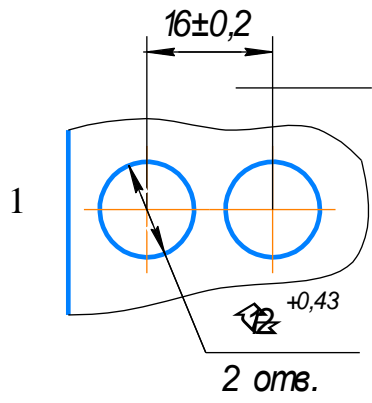


Рис. 1. Сравнение качества поверхностей деталей из паронита при вырубке

Анализ результатов показал следующее:

1. Расслоение материала, искажена форма отверстия, большая величина заусенцев (из всех образцов), разрыв стенки отсутствует.

2. Расслоение материала не наблюдается, искажена форма отверстия (величина меньше, чем в образце №1), небольшая величина заусенцев, разрыв стенки отсутствует.

3. Расслоение материала (величина меньше, чем в образце №1), искажена форма отверстия (самый большой показатель из всех образцов), наблюдается разрыв стенки.

4. Расслоение материала не наблюдается, немного искажена форма отверстия, небольшая величина заусенцев (самая низкая из всех образцов), разрыв стенки отсутствует.

Таким образом, исходя из сравнения образцов, самый качественный образец – это №4 (Ø16 мм и шириной стенки 2 мм), затем образец №2 (Ø16 мм и шириной стенки 4 мм), следующий образец №1 (Ø12 мм и шириной стенки 4 мм), и самый дефектный образец – №3 (Ø12 мм и шириной стенки 2 мм).

### Список литературы

[1] *Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н.* Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // *Современные проблемы науки и образования.* 2014. № 6. С. 162.

[2] *Калмыков В.В., Федорова О.С.* Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // *Электронный журнал: наука, техника и образование.* 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[3] *Бысов С.А., Малышев Е.Н.* Выявление и анализ организационно-технологических факторов, влияющих на результативность технологических систем, организованных на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов // *Машиностроение и компьютерные технологии.* 2012. № 3. С. 3.

[4] *Малышев Е.Н., Малышев А.Н.* Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // *Инженерный вестник.* 2012. № 8. С. 3.

[5] *Карпов М.П., Малышев Е.Н.* Постановка задач исследования технологии изготовления деталей из паронита // В сборнике: *Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе / Материалы Всероссийской научно-технической конференции.* 2017. С. 50-52.

[6] *Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N.* Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // *International Journal of Applied Engineering Research.* 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

**Карпов Максим Петрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: Maks96F@yandex.ru

Д. В. Васильев

## **КИНЕМАТИКА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для выражения абсолютного движения, которое сообщается в процессе резания инструменту и обрабатываемому изделию механизмом станка, используют кинематические схемы резания [2]. Кинематические схемы резания основаны на сочетании прямолинейного и вращательного движения [7]. На основе этого сочетания кинематические схемы можно классифицировать на восемь групп:

1. одно прямолинейное движение;
2. два прямолинейных движения;
3. одно вращательное движение;
4. одно вращательное движение и одно прямолинейное движение;
5. два вращательных движения;
6. два прямолинейных движения и одно вращательное движение;
7. два вращательных движения и одно прямолинейное движение;
8. три вращательных движения.

Также возможно сочетание и большего количества элементарных движений, но их применение ограничено из-за сложности процесса.

Процесс резания, соответствующий тому или иному методу обработки металлов режущими инструментами, возможен, когда одновременно действуют все предусмотренные кинематическими схемами абсолютные движения, которые являются главными движениями процесса резания [5].

Большинство существующих методов обработки основано на реализации только главных движений и в дополнительных движениях не нуждаются. Однако есть и такие методы обработки, осуществление которых основано на реализации, наряду с главными движениями, также и некоторых дополнительных движений, не выраженных принципиальными кинематическими схемами [1].

Одной и той же кинематической схеме могут соответствовать несколько совершенно различных методов обработки [4]. Образование из элементарных движений одной кинематической схемы резания двух и более методов обработки может быть достигнуто:

- а) сообщением либо инструменту, либо изделию тех или иных элементарных движений рассматриваемой кинематической схемы;
- б) установлением вполне определенных соотношений линейных или угловых скоростей сочетаемых элементарных движений схемы, сообщаемых инструменту и изделию [1].

Главные движения, сообщаемые механизмом станка инструменту и изделию, приобретают в процессе резания, в зависимости от соотношения окружных или угловых скоростей, значения:

- а) скорости резания;
- б) непрерывно действующей подачи;

в) вспомогательного движения, определяющего кинематическое соотношение движений инструмента и изделия, преднамеренно устанавливаемое с целью получения надлежащей конфигурации обработанной поверхности изделия (при обкатке зубчатых колес, обработке шкивов, а также обработке других сложных профилей) [1].

Все перечисленные элементарные составляющие главных движений всегда являются абсолютными. Дополнительные движения согласно своему названию действительно дополняют выраженные в принципиальных кинематических схемах резания элементарные составляющие главных движений и увеличивают общее количество движений, необходимых для осуществления определенного метода обработки металлов резанием.

В отличие от главных, дополнительные движения никогда не приобретают в процессе резания значения скорости резания или вспомогательного движения и их действие всегда исчерпывается функциями, равноценными движению подачи.

Дополнительные движения могут быть осуществлены:

а) как абсолютные прерывистые движения подачи, сообщаемые механизмом станка или вручную инструменту, или изделию в промежутках между рабочими циклами;

б) как конструктивные элементы, составляющие специфические особенности конструкции режущих инструментов и приводящие во время рабочего цикла к эффекту скрытого движения подачи.

Из числа подобных инструментов простейшими являются внутренние протяжки, конструкция которых предусматривает возможность реализации в процессе резания принципа скрытого движения подачи. Достигается этот эффект расположением каждого последующего зуба протяжки над предшествующим на величину, равную толщине срезаемой стружки [1].

В более сложном проявлении этот же эффект достигается в работе спиральных протяжек для протягивания тел вращения. На этих протяжках, так же как на предназначенных для внутреннего протягивания, каждый последующий зуб расположен выше предшествующего на толщину слоя, срезаемого одним зубом. Кроме того, все зубья этой протяжки расположены в порядке винтовых линий. В процессе резания разность высот соседних зубьев приобретает значение глубины резания для каждого зуба [1].

В результате, все методы обработки металлов режущими инструментами основаны на сочетании нескольких абсолютных прямолинейных и вращательных движений, сообщаемых в процессе работы инструменту и изделию, и одного или нескольких дополнительных движений.

Технологические возможности, сложность и целесообразность выбранного метода зависят от следующих факторов:

1. от количества и характера проявления дополнительных движений;
2. от количества и направления действия элементарных составляющих главных движений, сочетаемых в рамках одной принципиальной кинематической схемы;
3. от комбинации, в которой сочетаемые элементарные составляющие главных движений сообщаются обрабатываемому изделию и инструменту;
4. от отношения линейных или угловых скоростей сочетаемых движений [6];
5. от равномерности или неравномерности действующих движений [3].

Перечисленные факторы являются предметом кинематического исследования методов обработки металлов режущими инструментами.

### Список литературы

- [1] Грановский Г.И. Кинематика резания. -М.: МАШГИЗ, 1948. -205 с.
- [2] Этин А. О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. – М.: Машиностроение 1964. -321 с.
- [3] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности обработанной фрезами с двумя режущими кромками // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 8. С. 1.
- [4] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 56-58.
- [5] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 53-55.
- [6] Зенкин Н.В., Калмыков В.В., Малышев И.Е. Фрезерование отверстий специальными фрезами // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 76-81.
- [7] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Обработка внутренних поверхностей вращения фрезами с двумя режущими кромками // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 3

**Васильев Денис Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vasilyev.71@yandex.ru

Т.А. Журавлева, А.Ю. Крылов, Н.Л. Ковалева

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В УПРАВЛЕНИИ РИСКАМИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам организации системы управления рисками, как внутренней потребности предприятий, возникающей в ответ на необходимость увеличения конкурентоспособности и устойчивости организаций на рынке, повышения эффективности корпоративного управления, а также роста инвестиционной привлекательности компании и увеличения ее стоимости [1]. Чтобы более ясно представлять механизм проявления того или иного риска, а также последствий его наступления, целесообразно описывать ход и развитие риска на основе модели с использованием математических методов. Каждый из идентифицированных рисков какого-либо процесса следует рассматривать как отдельный элемент системы. Особое внимание следует уделять рискам, природа и характер которых не могут быть определены экспертной оценкой с достаточной степенью адекватности. Задачей является построение модели последствий наступления риска на основе имеющихся данных с помощью определенных математических методов. Для оценки рисков используются количественные и качественные методы оценки. Качественные методы позволяют дать комплексную оценку вероятности наступления риска и ущерба от его реализации, однако недостатком является то, что необходимо привлекать компетентных экспертов. Математическое моделирование относится к группе количественных методов, которые, в свою очередь, являются более трудоемкими, но позволяют определить несколько альтернатив для принятия решений [2]. Методы моделирования, решающие задачу идентификации математической модели, можно классифицировать на четыре основные группы: аналитические, численные, имитационные, вероятностно-статистические.

Аналитические методы предполагают получение характеристик системы как определенные функции параметров ее организации, то есть аналитическая модель является системой уравнений, решение которой позволяет выявить параметры, позволяющие оценить систему. К преимуществам аналитических методов стоит отнести высокую точность получаемых расчетов. Необходимо отметить, что аналитические методы применимы только для узкого класса моделей и задач. Наиболее актуальные аналитические методы оценки рисков, широко применяемые на международном уровне - имитационные оценочные методы, базирующиеся на пошаговом нахождении значения оцениваемого фактора за счет выполнения многократных расчетов с моделью.

В численных методах математическая модель представляется системой линейных и нелинейных уравнений, что предполагает итерационное решение. Решение системы осуществляется постепенным переходом по итерациям до достижения заданной точности решения. Численные методы позволяют задать требуемую степень точности решения.

Имитационное моделирование предполагает имитацию процесса функционирования системы во времени с обеспечением аналогичных пропорций протекания операций как в исходной системе. Следствием имитационного моделирования является получение оценок характеристик системы при использовании принципа «черного ящика». Имитационное моделирование предполагает использование метода статистического моделирования, который развивался как метод статистических испытаний (Монте-Карло) [4]. Этот метод предполагает получение оценок вероятностных характеристик и применяется для имитации процессов, происходящих в системах, которые имеют источник случайности или подвержены случайным воздействиям.

Вероятностно-статистические методы моделирования описывают зависимости между выходными и входными переменными характеристиками системы [5] и основаны на исследовании действия ряда случайных факторов, характеризующихся устойчивой частотой, что позволяет установить их связь.

Вышеописанные методы математического моделирования широко применяются в различных областях жизнедеятельности, в том числе для решения прикладных задач в управлении рисками.

Например, работа современного производственного предприятия подразделяется на процессы, качественное и безопасное функционирование которых, может быть обеспечено с помощью математического моделирования. Другими словами, имея набор исходных данных, создается модель, которая позволит с заданной точностью достичь поставленной цели, учитывая при этом присущие процессу риски [6,7].

Для исследования рисков в сложных системах, которой и является производственное предприятие, зачастую недостаточно использования какого-либо одного конкретного метода математического моделирования, т.к. ни один из методов в отдельности, как правило, не способен смоделировать с достаточной точностью функционирование рассматриваемой системы в целом. Поэтому деятельность производственного предприятия следует разделить на ряд процессов, таких как общее управление предприятием, финансово-экономическая деятельность, управление кадрами, основное производство, конструкторско-технологический блок и вспомогательное производство. Затем, детально проанализировав каждый, создается их математическая модель, на основе более подходящего для конкретного процесса метода моделирования. В итоге, создается ряд математических моделей, с высокой степенью точности описывающих ход ключевых процессов структуры производственного предприятия. Появляется возможность проследить как риск (рис-



ки) начинает проявляться, развиваться и каковы будут последствия его наступления, а значит, и возможность для разработки и принятия мер по управлению им (ими). По предложенной схеме можно строить модели любых наиболее значимых процессов системы, а также комбинаций процессов. Это позволит рассматривать механизм проявления того или иного риска с учетом всех воздействующих на него факторов.

### Список литературы

[1] Белозерский А.Ю., Гавриленко Н.И., Иванова И.В. Математические методы управления рисками металлургического предприятия // Научно-аналитический журнал «Вестник Международного института экономики и права», №4, 2011. С. 51-56.

[2] Уродовских В. Н. Управление рисками предприятия: Учеб. пособие. – М.: ВЗФЭИ, 2009. – 130 с.

[3] [Электронный ресурс] Характеристика наиболее используемых методов анализа рисков. Страхова Н.А., Карамзин С.А. URL:<https://naukovedenie.ru/PDF/22ergsu313.pdf> (дата обращения: 30.03.2018г).

[4] Войтишек В.В., Основы метода Монте-Карло: учебное пособие // Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т - 2010. - 108 с.

[5] Ширяев А.Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. – 2-ое изд., - новое – М.: МЦМНО, 2014. - 144 с.

[6] Калмыков В.В., Иевенко Л.А. Исследование взаимосвязи экономических показателей регионов России // Инженерный вестник. 2012. № 9. С. 4.

[7] Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K. Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 24. С. 15621-15626.

**Журавлева Татьяна Александровна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

**Крылов Алексей Юрьевич**, аспирант НОУ ВПО «Институт управления, бизнеса и технологий». E-mail: krylov-alex1986@yandex.ru

**Ковалева Надежда Леонидовна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

А.В. Барков, Н.В.Зенкин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных погрешностей механической обработки является погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы. По данным работы [2], доля погрешности, вызванной деформациями технологической системы, может достигать от 20% до 70% от общей погрешности обработки. Схема, приведенная на рис.1. иллюстрирует влияние упругих деформаций технологической системы на точность обрабатываемой детали.

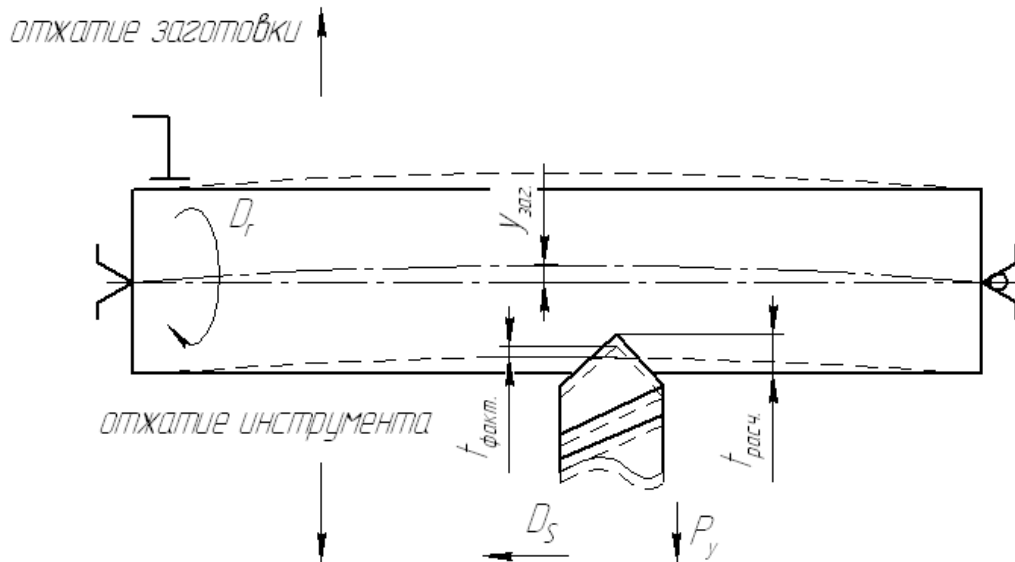


Рис. 1. Появление погрешностей размера и формы под действием деформации ТС

В общем случае величина погрешности рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{P_y}{j} \quad (1)$$

где  $P_y$  – величина силы резания,  $J$  – жесткость технологической системы.

Большое влияние на возникновение этой погрешности оказывает жесткость технологической системы. Эта величина может быть определена по расчетным зависимостям, но такой способ не очень точен (поскольку не учитывает изменение сил резания в ходе процесса) и трудоемок. Поэтому чаще на практике чаще используют экспериментальные способы, описанные в работе [1]. Всего можно выделить четыре экспериментальных способа определения жесткости технологической системы:

- статический метод

- метод копирования погрешностей обработки (метод Соколовского А.П.)
- метод, основанный на определении разности заданной и фактической глубин резания (метод Корсакова В.С.)
- метод прямой и обратной подач (метод Кораблева П.А.).

Три последних метода относят к группе производственных, то есть измерение жесткости происходит при обработке заготовки. Статический же метод основан на измерении жесткости ТС на неработающем оборудовании.

Компромиссным решением между экспериментальным и теоретическим расчетом может стать моделирование процесса с использованием вычислительной техники, например, среды Matlab/Simulink.

Пример расчетной модели процесса приведен на рис. 2.

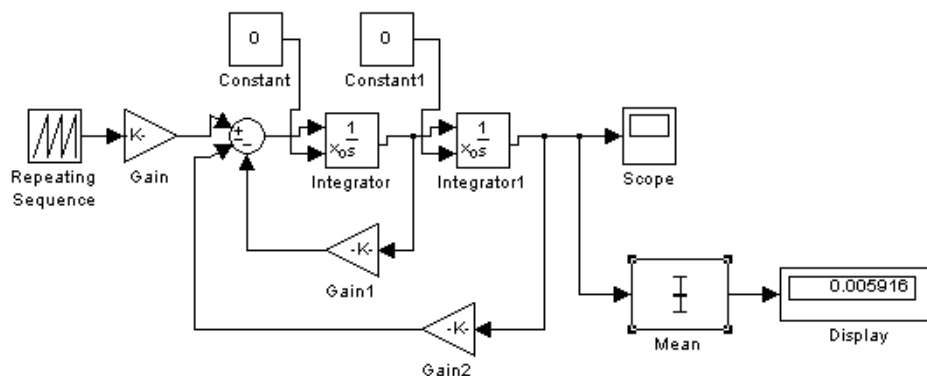


Рис. 2. Модель нахождения упругой деформации инструмента

При построении модели процесса были приняты следующие допущения:

1. Наименее жестким звеном технологической системы считается инструмент; деформации остальных элементов считаются незначительными и не учитываются.

2. Инструмент рассматривается как консольно закрепленная балка, на которую действует изменяющиеся во времени силы резания. Тогда перемещения точек инструмента, имеющих наибольший вылет (т.е. деформации инструмента), можно определить из уравнения колебаний:

$$m \cdot \ddot{y} + h \cdot \dot{y} + c \cdot y = P \quad (2)$$

где  $m$  - масса инструмента,  $h$  - коэффициент демпфирования,  $c$  - коэффициент жесткости,  $P$  - суммарная сила резания,  $y$  - упругие деформации инструмента.

3. При решении дифференциального уравнения приняты нулевые начальные условия.

4. Результирующая сила резания принимается направленной по нормали к геометрической оси инструмента и прикладывается в точке на ее конце.

5. Допускается, что расхождения в результатах расчета и экспериментальных данных будут компенсированы допуском на обрабатываемый размер.

В дальнейшем планируется проведение эксперимента и сравнительный анализ результатов, полученных в ходе моделирования и экспериментально.

### Список литературы

[1]. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

[2]. Технология машиностроения: учеб. для вузов: в 2 т. / [В. М. Бурцев и др.]; под ред. Г. Н. Мельникова. – 3-е изд., испр. и перераб. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 551 с.

[3]. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

**Барков Александр Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: cbzst@yandex.ru

**Зенкин Николай Васильевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

О.О. Смирнов

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Поверхностная энергия может считаться одним из основных параметров качества поверхностных слоев контактирующих деталей машин, наряду с такими качественными показателями, как твердость и шероховатость поверхности [1]. Поэтому при оценке качества сопрягаемых поверхностей необходимо учитывать ее значение.

Одним из важнейших требований к отысканию метода определения поверхностной энергии для практического применения является простота его реализации и достигаемая точность измерений [2].

Как известно, наиболее удобными с точки зрения непрерывного неразрушающего контроля энергетического состояния поверхностей деталей машин являются методы определения работы выхода электрона по контактной разности потенциалов.

Измерение контактной разности потенциалов осуществляется с помощью прибора, разработанного на основе метода невибрирующего конденсатора. Принципиальная схема прибора для измерения контактной разности потенциалов изображена на рисунке 1: поверхности металлов, между которыми необходимо измерить контактную разность потенциалов, располагают друг напротив друга, и размещают между ними диэлектрик. При замыкании цепи измеряют на резисторе значения импульса напряжения, по которому и определяют величину контактной разности потенциалов [3].

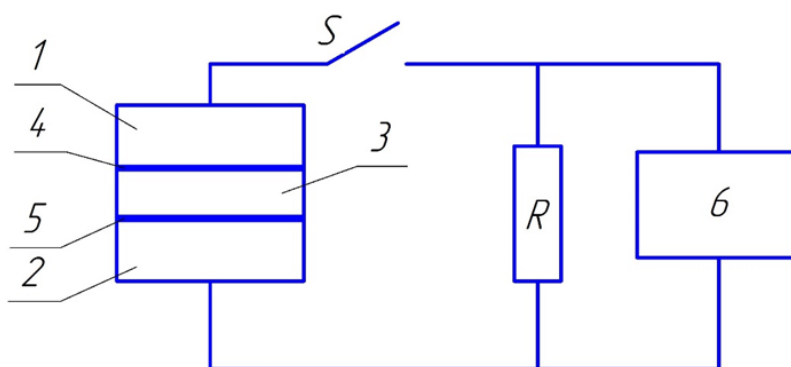


Рис.1. Схема измерения КРП:

- 1 – эталонный электрод; 2 – измеряемый образец; 3 – диэлектрик;
- 4,5 – поверхности, между которыми измеряется КРП;
- 6 – измерительный прибор

Также одним из важных элементов прибора для измерения контактной разности потенциалов является генератор импульсов, который генерируют импульсные сигналы определенной формы и с определенной частотой.

Был проведен эксперимент с целью исследования влияния формы импульсного сигнала и его частоты на воспроизводимость результатов измерений значения контактной разности потенциалов. Прибор для выполнения эксперимента был разработан на основе схемы, изображенной на рисунке 1, где в качестве эталонного электрода использовалась медная пластина с напыленным слоем диэлектрика, а в качестве измеряемого образца выбрана заготовка из стали 45.

Измерение контактной разности потенциалов проводилось с установлением последовательно синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной форм импульсного сигнала на частотах от 100 до 1000 Гц (с шагом в 100 Гц) и от 1000 до 10000 Гц (с шагом в 1000 Гц). На каждом значении частоты выполнялось по 20 замеров.

Обработка результатов проведенного эксперимента осуществлялась в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.736-2011 [4]. Оценка измеряемой величины (контактной разности потенциалов) представлена в следующем виде:

$$x_{cp} \pm \varepsilon \quad (1)$$

где  $x_{cp}$  – среднее арифметическое значение результатов измерений,

$\varepsilon$  – доверительные границы случайной погрешности.

В результате статистической обработки экспериментальных данных была установлена следующая зависимость значения контактной разности потенциалов от частоты импульса для всех форм импульсного сигнала: с ростом частоты от 100 до 500 Гц значение КРП плавно возрастает, начиная с 600 Гц устанавливается на постоянном уровне, после 1000 Гц начинает убывать (рисунок 2).

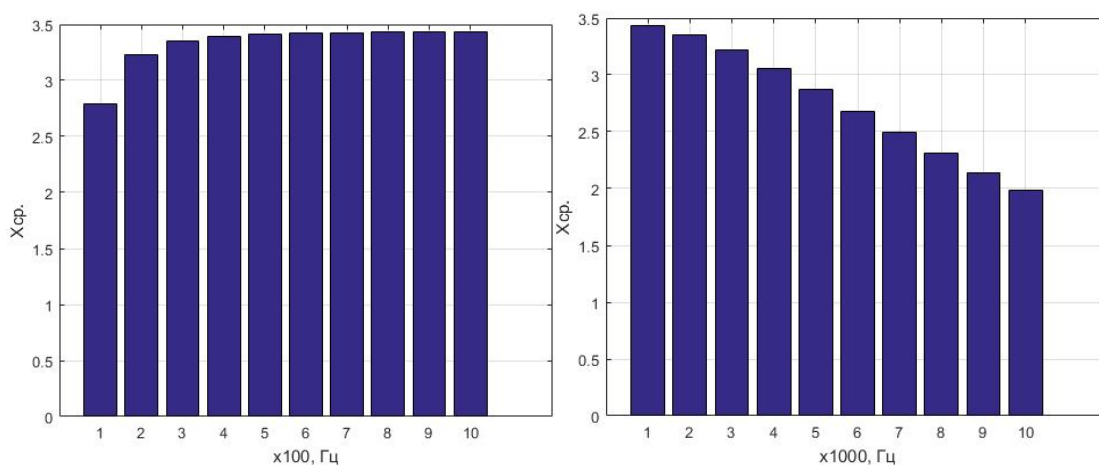


Рис. 2. Зависимость значения КРП от частоты сигнала при использовании треугольной формы импульса

Также было установлено, что при треугольной форме сигнала наблюдается наименьшая величина случайной погрешности, т.е. при таком сигнале более высокая воспроизводимость результатов измерений.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента можно дать следующие рекомендации:

- для получения наибольшей точности значений КРП проводить измерения на частотах от 600 до 1000 Гц,
- использовать генератор импульсов с треугольной формой сигнала.

### Список литературы

[1] Смирнов О.О. Электронная теория поверхностной энергии твердых тел. В сборнике: Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе Материалы Региональной научно-технической конференции. 2017. С. 65-66.

[2] Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В. Определение значения поверхностной энергии через работу выхода электрона // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16036> (дата обращения: 20.03.2018).

[3] Патент Николин С.В., Тимашев М.Ю., Волков С.С., Суворов Д.В., Гололобов Г.В. Способ измерения контактной разности потенциалов // FindPatent.ru - патентный поиск: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2532590.html> (дата обращения: 20.03.18).

[4] ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

**Смирнов Олег Олегович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: [olegsmirnov2010@yandex.ru](mailto:olegsmirnov2010@yandex.ru).

Я.С. Мельников, В.Н. Атрощенко

## ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТНОГО УГЛА ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

С первого января 2016 года в России впервые введен новый национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 4287-2014, который устанавливает термины, определения и параметры для оценки структуры поверхности. Он регламентирует параметры шероховатости, волнистости и первичного профиля с помощью методов профилирования. Суть данных методов заключается в анализе показаний контактных приборов, наибольшее распространение среди которых получили щуповые приборы, работающие по методу ощупывания контролируемой поверхности алмазным стилусом. Принцип работы профилографа заключается в последовательном ощупывании поверхности иглой, перпендикулярной к контролируемой поверхности, преобразовании колебаний иглы оптическим либо электрическим способом в сигналы, которые записываются на носитель. Для удобства расшифровки профилограмма вычерчивается в увеличенном масштабе. Современные профилографы позволяют измерять неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм. Погрешность вертикального увеличения профилографа для разных видов приборов от  $\pm 5$  до  $\pm 10$  %, а горизонтального – не более  $\pm 10$  % [1].

Суть профильного метода исследования параметров шероховатости заключается в разделении профиля на коротковолновые и длинноволновые компоненты с помощью фильтра профиля.

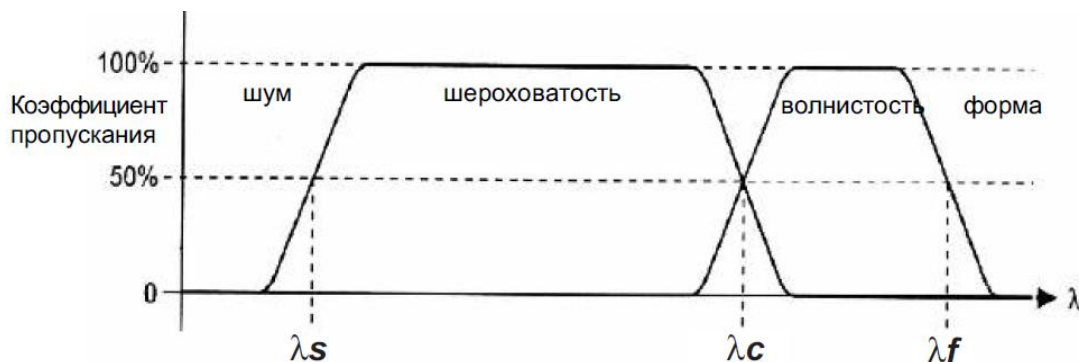


Рис. 1. Разделение текстуры поверхности на шероховатость, волнистость и профиль

В данном случае необходимо использовать фильтр профиля  $\lambda_s$  для оценки первичного (исходного) профиля.

Фильтр профиля  $\lambda_s$  - фильтр, который определяет пересечение между шероховатостью и еще более коротковолновыми компонентами, имеющимися на поверхности [2].



Первичный профиль определяется, как полный профиль после применения коротковолнового фильтра с отсечкой шага  $\lambda_s$  [3].

Одним из параметров, определяющих эксплуатационные свойства [3] является местный угол наклона  $dz/dx$ , наклон оцениваемого профиля в положении  $x_i$ , который определяется по формуле Лагранжа:

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

где

$z_i$  – высота  $i$ -ой точки профиля;

$\Delta X$  – расстояние между смежными точками профиля.

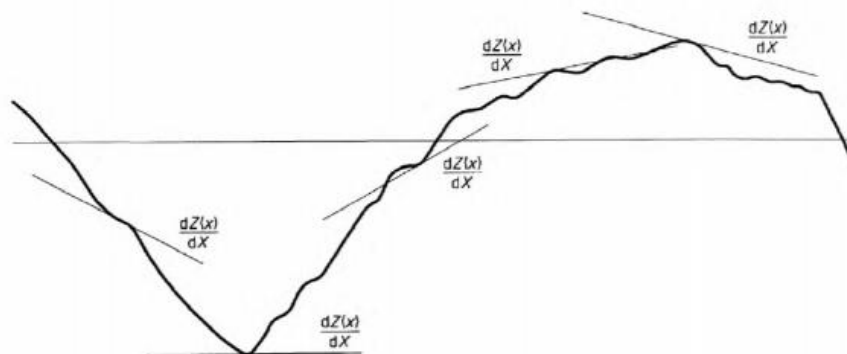


Рис. 2. Местный угол наклона профиля

При обзоре литературных источников, посвященных анализу профиля поверхности до пропускания его через коротковолновый фильтр, были определены исследования, установившие прямопропорциональную зависимость местного угла наклона от величин высотных параметров шероховатости и обратную пропорциональность от величин шаговых параметров [4]. Авторами было выявлено влияние местного угла профиля на кривизну пиков профиля. Коэффициент корреляции составил около 0,99.

В литературных источниках отсутствует информация описывающая степень влияния местного угла наклона на конкретные эксплуатационные свойства. Кроме того, нет данных какие технологические параметры формируют конкретные значения местного угла наклона профиля. Проведение исследований для решения этих вопросов является актуальным. Результаты исследований будут востребованы при производстве деталей с заданными эксплуатационными характеристиками.

### Список литературы

[1] *Макеев А.В.* Об оптических методах контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 5. № 1. С. 147-151.

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

[3] Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт/ Под редакцией канд. т.н. Табачниковой Н.А. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2007, 136с.

[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] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Савина Ю.А. Математическое моделирование качественных характеристик при обработке конструкционных материалов на основе железа // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 5. С. 74-77.

[6] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Герасимова Н.С., Малышев Е.Н. Остаточные напряжения в энергетической теории процесса схватывания поверхностей деталей машин // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 311-314.

[7] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Антонюк Ф.И. Влияние технологического воздействия на энергетическое состояние поверхностного слоя деталей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 59.

[8] Калмыков В.В., Мусохранов М.В., Логутенкова Е.В., Герасимова Н.С. Энергия поверхностей в формировании сопряжений при сборке изделий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 5-2. С. 249-252.

[9] Логутенкова Е.В., Мельников Я.С. Анализ геометрических характеристик изделий // В сборнике: Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 4-6.

[10] Калмыков В.В., Атрощенко В.Н. исследование влияния методов обработки поверхностей на их износостойкость // В сборнике: Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 20-22.

[11] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности обработанной фрезами с двумя режущими кромками // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 8. С. 1.

[12] Мусохранов М.В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя направляющих элементов машиностроения: дисс. канд. техн. наук – М. 2006. – С. 65.

**Мельников Ярослав Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov.yar2017@yandex.ru

**Атрощенко Виктор Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: atroshchenkoviktor@gmail.com

А.А. Бурмистров

## ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ЦЕЛЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Холодная объемная штамповка (ХОШ) – один из наиболее эффективных и ресурсосберегающих способов изготовления заготовок, которых характеризуется высокой степенью точности поковок (8...9 качество). Одной из типовых операций ХОШ является холодная осадка цилиндрических заготовок плоскопараллельными плитами. В сочетании с последующими операциями обрезки и зачистки, осадка может применяться для изготовления различных деталей с односторонними и двусторонними выступами [1].

Экономическая эффективность холодной объемной штамповки, выполняемой на прессах, в полной мере реализуется, если точность размеров поковок позволяет исключить последующую механическую обработку либо свести ее к минимуму. Именно поэтому встает вопрос о возможностях повышения точности холодной осадки.

Одним из основных критериев точности холодной осадки плоскопараллельными плитами является погрешность высоты поковки  $\Delta h$ . В работах [2] и [3], в которых рассматривались вопросы точности выполнения различных операций холодной объемной штамповки, были установлены факторы, влияющие на погрешность высоты поковки. В частности для поковок, изготавливаемых осадкой на гидравлическом прессе, эти факторы делятся на 2 группы:

1) факторы, характеризующие исходную заготовку: погрешности ее высоты  $\Delta h_3$  и диаметра  $\Delta d_3$ , возможные колебания напряжения текучести материала заготовки  $\Delta \sigma_s$ , а также параметры, влияющие на величину коэффициента контактного трения  $\Delta \mu$ ;

2) факторы, отражающие силовой режим процесса деформирования поковки: степень деформации исходной заготовки по высоте  $\varepsilon$  и отношение диаметра поковки к ее высоте  $d/h$ .

При этом факторы первой группы имеют случайный неконтролируемый характер, а факторы второй группы – контролируемые.

Для оценки характера влияния данных факторов на точность осадки был выполнен ряд однофакторных экспериментов [4]. При анализе экспериментальных данных, показывающих зависимость относительной погрешности высоты поковки от относительных объемных погрешностей исходной заготовки  $\delta h_3$  и  $\delta d_3$ , сделан вывод, что погрешность высоты  $\delta h_3$  исходной заготовки существенно сильнее влияет на точность высотного размера. Однако с увеличением степени деформации  $\varepsilon$ , влияние  $\Delta d_3$  возрастает, что говорит о наличии сложного взаимодействия факторов между собой. Последующие многофакторные эксперименты [5] показали, что с

уменьшением степени деформации  $\varepsilon$  точность повышается, а увеличение жесткости поковки ( $d/h$ ) также способствует уменьшению погрешности  $\Delta h$  [6]. Так как данные эксперименты проводились для заготовок из алюминиевого сплава АД1, нельзя точно сказать, что данные выводы будут справедливы для стальных заготовок. Именно поэтому встает вопрос об экспериментальном изучении точности холодной осадки на гидравлическом прессе для стальных заготовок.

Целью планируемого многофакторного эксперимента является изучение влияния ряда факторов на точность высотного размера поковок из стали, изготавливаемых на гидравлическом прессе.

Исходные данные.

Оборудование: гидравлический пресс П481А с номинальной силой  $P=400\text{кН}$ .

Материал заготовок: сталь 10 в отожженном состоянии.

Отклик: относительная погрешность высоты поковки  $\delta h$ .

В качестве факторов, влияющих на точность осадки, выбраны:

- относительная погрешность высоты заготовки  $\delta h_3$ ;
- степень деформации  $\varepsilon$ ;
- отношение диаметра поковки к ее высоте  $d/h$ .

Факторы заданы на двух уровнях (таблица 1).

Таблица 1

Уровни варьирования факторов и интервалы их варьирования в натуральном масштабе

N	Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
		+1	0	-1	
1	$X_1 (\delta h_3), \%$	10	7,5	5	2,5
2	$X_2 (\varepsilon)$	0,36	0,23	0,1	0,13
3	$X_3 (d/h)$	3	2,25	1,5	0,75

В таблице 2 представлена матрица планирования для расчета коэффициентов уравнения регрессии многофакторного эксперимента  $2^3$ .

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

$N_{оп}$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y (\delta h)$		
1	+	+	+	+	+	+	+	+			
2	+	+	+	-	+	-	-	-			
3	+	+	-	+	-	+	-	-			
4	+	+	-	-	-	-	+	+			
5	+	-	+	+	-	-	+	-			
6	+	-	+	-	-	+	-	+			
7	+	-	-	+	+	-	-	-			
8	+	-	-	-	+	+	+	+			

Таким образом, результаты данного эксперимента позволят сделать выводы о способах повышения точности осажденных поковок из стали.

### Список литературы

[1] *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

[2] *Антонюк Ф. И.* Анализ и обеспечение высокой точности холодной объемной штамповки на прессах научно обоснованным выбором жесткости элементов технологической системы: Дис. д-ра техн. наук: 05.03.05: Москва, 2004 356 с. РГБ ОД, 71:05-5/311.

[3] *Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г.* Точность поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой на кривошипных и гидравлических прессах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 1.

[4] *Вяткин А. Г., Вяткин А. А.* Факторы, влияющие на точность осадки при штамповке на гидравлическом прессе [Электронный ресурс] // Наука и образование. – Электрон.журн. – 2012. – №2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/500313.html>

[5] *Вяткин А.Г.* Сравнительный анализ точности холодной объемной штамповки на кривошипных и гидравлических прессах: Дис. к-та техн. наук: 05.03.05: Москва, 2004 201 с. РГБ ОД, 64:04-5/4016.

[6] *Вяткин А.Г., Матвеев С.В.* Сравнительная оценка влияния факторов на точность высотных размеров поковок, получаемых на винтовых и кривошипных прессах // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010. № 2. С. 112.

**Бурмистров Алексей Алексеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alex200811burmistrov@yandex.ru

Д.А. Барина, И.В. Кузнецов

## **РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В условиях современного, нацеленного на импортозамещение, производства, приоритетной задачей машиностроения является систематическое увеличение производительности труда. Сущность технического нормирования [3] на промышленном предприятии заключается в установлении технически обоснованных норм на основе изучения производственных возможностей и проектирование наиболее производительного режима работы машин.

Технологические возможности современных станков с ЧПУ позволяют достигнуть небывалых прежде значений производительности путем абсолютной автоматизации комплексной обработки деталей [1, 2, 6]. Дальнейший рост производительности возможен за счет сокращения времени обслуживания оборудования.

Для эффективного использования режущего инструмента и оптимизации времени обслуживания станка следует назначать такие режимы резания, чтобы максимально использовать стойкость режущего инструмента [4-7]. Кроме того, время смены режущего инструмента является одной из главных составляющих времени обслуживания.

С целью оптимизации времени обслуживания рабочего места, связанного со сменой инструмента при обработке на фрезерных станках с ЧПУ, была предложена методика, позволяющая автоматизировать замену полного комплекта инструментов одновременно. При этом стойкость каждого инструмента будет рационально использована.

Для проверки методики был разработан технологический процесс изготовления базовой детали «Плита» (рис. 1) из Стали 45, с годовой программой выпуска 5000 шт.

Используемый комплект инструментов включает: фреза торцовая Ø50 мм T15K6; фреза концевая Ø20 мм T15K6, фреза концевая Ø10 мм T15K6, фреза концевая Ø10 мм BK8, сверло спиральное с коническим хвостовиком Ø10 мм P6M5.

Оборудование: Вертикальный фрезерный станок с ЧПУ DMG MORI серии NMV 3000 DCG.

Для всего технологического процесса были рассчитаны режимы резания и произведено нормирование, а также определено количество заготовок, обрабатываемых одним режущим инструментом в зависимости от его стойкости. В результате было определено, что на замену затупившегося

инструмента для обработки всей партии деталей требуется значительное количество времени, негативно отражающееся на производительности.

Для того чтобы увеличить эффективность использования режущего инструмента и оптимизировать время обслуживания станка скорректированы режимы резания таким образом, чтобы была возможность производить смену всех инструментов в инструментальном магазине одновременно, с помощью специального приспособления. Для этого потребовалось рассчитать режимы таким образом, чтобы комплект инструментов утрачивал свою стойкость после изготовления  $n$ -го количества деталей.

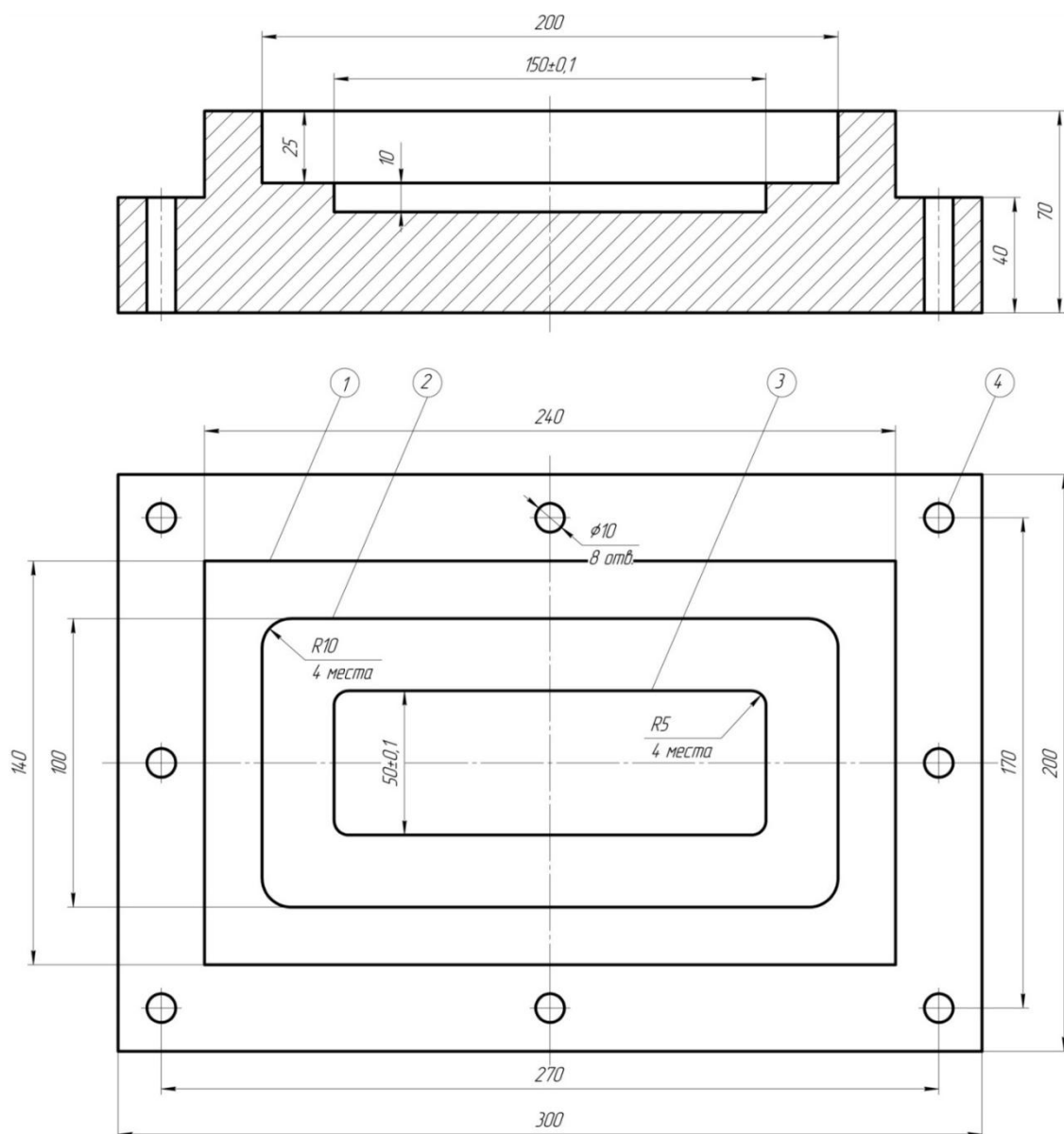


Рис. 1. Эскиз детали

В результате проведенной работы было получено, что наиболее рационально будет заменять весь комплект инструментов, после обработки 36 деталей.

Итоговый комплект инструментов состоит из торцевой фрезы Ø50 мм T15K6,2 концевой фрезы Ø20 мм T15K6, 2 концевой фрезы Ø10 мм T15K6,2 концевой фрезы Ø10 мм BK8, 3 спиральных сверла с коническим хвостовиком Ø10 мм P6M5.

Таким образом, с помощью подобных манипуляций с режимами резания, после обработки определенного количества деталей, в данном случае 36 шт., удалось сократить часть штучного времени на 3500 мин и в 1,4 раза уменьшить количество необходимого инструмента.

### Список литературы

[1] *Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С.* Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[2] *Калмыков В.В., Малышев А.Н., Покровская М.Э.* Анализ способов точного позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 1.

[3] *Миллер Э.Э.* Техническое нормирование труда в машиностроении // Машиностроение. – 1972. С. 6.

[4] *Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N.* Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[5] *Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В.* Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 53-55.

[6] *Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н.* Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[7] *Калмыков В.В., Барков А.В.* Аналитическое и статистическое оценивание упругих деформаций при фрезеровании по контуру // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 34-38.

**Баринова Дарья Андреевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru

**Кузнецов Иван Васильевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru



М.В. Крюков, В.М. Попков

## СПОСОБЫ ГИБКИ ПРОВОЛОКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Гибка проволоки является разновидностью гибочных операций листовой штамповки. Различные виды материалов обладают разными свойствами, без их учета невозможно придать необходимую форму. При гибке проволоки на нее действуют радиальные и тангенциальные силы, влияющие на угол и радиус гибки, а также на форму поперечного сечения.

При изготовлении деталей из проволоки возникает ряд проблем. К числу основных проблем относятся:

Сложность получения качественной поверхности при гибке проволоки с радиусом до полутора диаметра проволоки и менее.

### **Гофрообразование на внутреннем радиусе.**

Образование царапин и других дефектов во время гибки, связанных не только с технологическим уровнем оборудования, но и степенью точности используемого инструмента и оснастки.

Невысокая точность радиуса гибки из-за упругого пружинения проволоки.

Изменение формы поперечного сечения, особенно при гибке с малыми радиусами.

На сегодняшний день существуют множество способов гибки проволоки. К основным способам относят: наматывание, обкатка, вальцовка, проталкивание, гибка с калибровкой и свободная гибка.

**Наматывание.** Заключается в том, что проволока прижимается с помощью сухаря к ручью гибочного ролика, который, поворачиваясь вместе с сухарем на заданный угол, тянет за собой проволоку и наматывает ее, формируя необходимый радиус и угол гибки детали. Преимуществами данной технологии является высокая повторяемость, высокая производительность, а также возможность получения гибки малого радиуса (от 1,5 диаметра проволоки). Метод широко распространен в крупносерийном и массовом производствах, однако и при штучном и при экспериментальном производствах этот способ гибки позволяет получить превосходные результаты.

**Обкатка.** Заключается в том, что проволока прижимается к ручью неподвижного ролика с помощью подвижного обкатного ролика. Диаметр ручья неподвижного и обкатного ролика соответствует диаметру проволоки. Фиксация проволоки происходит вне рабочей зоны. Далее обкатной ролик совершая вращательное движение вокруг неподвижного ролика формирует необходимый радиус и угол гибки. Главными недостатками данного метода является низкая точность размеров, а также возникновение овальности в поперечном сечении. Преимуществом является низкая стоимость оборудования. Применяется в единичном и мелкосерийном производстве при отсутствии жестких требований по точности к деталям.

**Вальцовка.** Принцип действия оборудования, работающего по такому методу, можно разделить на два этапа. Вначале проволока проталкивается через трехвалковый блок, формируя начальный радиус гибки. Это достига-

ется приложением усилия центральным роликом на проволоку, опирающуюся на два крайних ролика. Второй этап – это непосредственная гибка проволоки за счет трения между роликами и проволокой. Т.е. валкам придается вращательное движение, и оно преобразуется в поступательное движение проволоки вследствие действия силы трения. Благодаря чему формируется необходимый угол гибки. Применяется для изготовления спиралей, сегментных секторов и колец в массовом и серийном производствах.

**Проталкивание.** Технология гибки данным способом подразумевает зажатие проволоки между подающими роликами и дальнейшее проталкивание через систему роликов, задающих необходимую форму проволоке. Преимуществом данного метода является получение сложного пространственного профиля. При использовании станков с ЧПУ достигается высокая точность и качество гибки. Недостатком такого способа является низкая производительность. Широко распространен во всех типах производства вследствие универсальности.

**Гибка с калибровкой.** Требуется пуансон и матрица, формообразующие поверхности которых соответствуют форме детали. Метод заключается в том, что пуансон, двигаясь поступательно, вдавливают в матрицу проволоку, формируя деталь. Преимуществом данного метода является высокая повторяемость и возможность автоматизации метода. Применяется в серийном и массовом производствах при изготовлении деталей простой формы.

**Свободная гибка.** Данный метод схож с предыдущим. Отличие заключается в том, что матрица и пуансон имеют форму, позволяющую выполнять гибку с различными значениями действительных углов. Начальный угол задается глубиной вдавливания инструмента и шириной между опорами. Преимуществом данного метода является низкая себестоимость и универсальность. Широко распространен в единичном и мелкосерийном производствах, в которых проволока не является основным сортаментом.

Таким образом в крупносерийном и массовом производствах наиболее целесообразно применять гибку с калибровкой, наматывание и вальцовку. Для единичного и мелкосерийного производства хорошие результаты дают такие способы как свободная гибка и обкатка. Способ проталкивания является наиболее универсальным.

### Список литературы

[1] Семенов Е. И. Ковка и штамповка: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 370 с.

[2] Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Пунин В.И., Морозов Ю.А. Гибка профилей на прессах и станах. – М.: МГВМИ, 2005. – 140 с.

[3] Мошнин Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах: Технология и оборудование. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.

[4] Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

**Крюков Максим Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kryukovmaksimvikt@gmail.com

**Попков Вячеслав Михайлович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: slaviclinda@yandex.ru

С.В. Зудин

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С ПРАВО-ЛЕВОЙ РЕЗЬБОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Резьбовые соединения остаются самыми распространенными в машиностроении среди прочих вариантов соединения деталей машин. Они обладают значительными известными преимуществами.

Однако, резьбовым соединениям характерен один существенный недостаток – склонность к самоотвинчиванию, который побуждает конструкторов и технологов искать наиболее рациональные методы по его предупреждению. В периодической литературе и на страницах Internet приведены различные варианты решения этой проблемы.

Одним из малораспространенных и малоизученных методов стопорения резьбовых соединений является нарезание на стержне болта одновременно правой и левой резьб (право-левая резьба) и затягивание соединения «правой» и «левой» гайками. При этом вращение самоотвинчивания «правой» гайки, находящейся под «левой» контргайкой, будет встречать сопротивление со стороны последней, так как их направления вращения для отвинчивания прямо противоположны.

Эффективность такого соединения для предотвращения самоотвинчивания не вызывает сомнений, но изготовление правой и левой резьб на одном стержне болта приводит к «перерезанию» одних витков резьбы другими и, как следствие, к снижению прочности такой резьбы, что в целом приводит к снижению эксплуатационных характеристик резьбового соединения.

Задачей исследования является оценка снижения усталостной прочности резьбы при переходе с соединений с правой резьбой на соединения с право-левой резьбой.

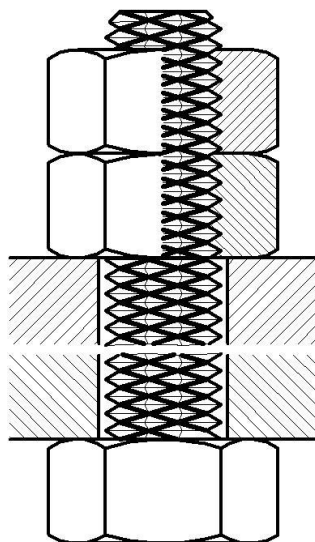


Рис. 1. Болтовое соединение с право-левой резьбой на стержне болта

Усталостное разрушение резьбовых соединений, часто встречающееся на практике, - результат действия многоцикловых переменных нагрузок, а амплитуда и величина переменной нагрузки, приводящих к разрушению, оказываются в 10...20 раз меньшей, чем при статическом разрушении.

Оценить снижение усталостной прочности можно путем сравнения зависимостей между величиной прилагаемой нагрузки и долговечностью резьбы.

Аналитически установлено отношение напряжений среза для обычного болта  $\tau_1$  и болта с право-левой резьбой  $\tau_2$ , которое может быть определено исходя из отношения площадей, по которым происходит срез витков резьбы:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\pi d_1 H K \frac{2zp^2}{\cos^2 2\omega} \sin 2\omega}{\pi d_1 H K} \quad (1)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр резьбы,  $H$  – высота гайки,  $K$  – коэффициент полноты резьбы,  $z = \frac{H}{p}$  – число рабочих витков,  $p$  – шаг резьбы,  $\omega$  – угол подъема резьбы.

Для проверки полученной зависимости был выполнен ряд экспериментов с резьбой М10. К гайке прилагались импульсы силы величиной 12,7, 11,4, 10,4 и 9,7 кг·м/с. Замерялось количество циклов, которые выдерживала резьба на болтах с правой и право-левой резьбой под действием этих импульсов до срыва. Каждый опыт проводился по три раза, результаты усреднялись.

На рис. 2 показаны графики зависимостей между величиной прилагаемой нагрузки (величиной импульса силы) и долговечностью резьбы (количество выдержанных циклов нагрузки), построенные по аналитическим формулам, а маркером отмечены результаты выполненных экспериментов. Как видно из рисунка, аналитические и экспериментальные данные имеют хорошую сходимость.

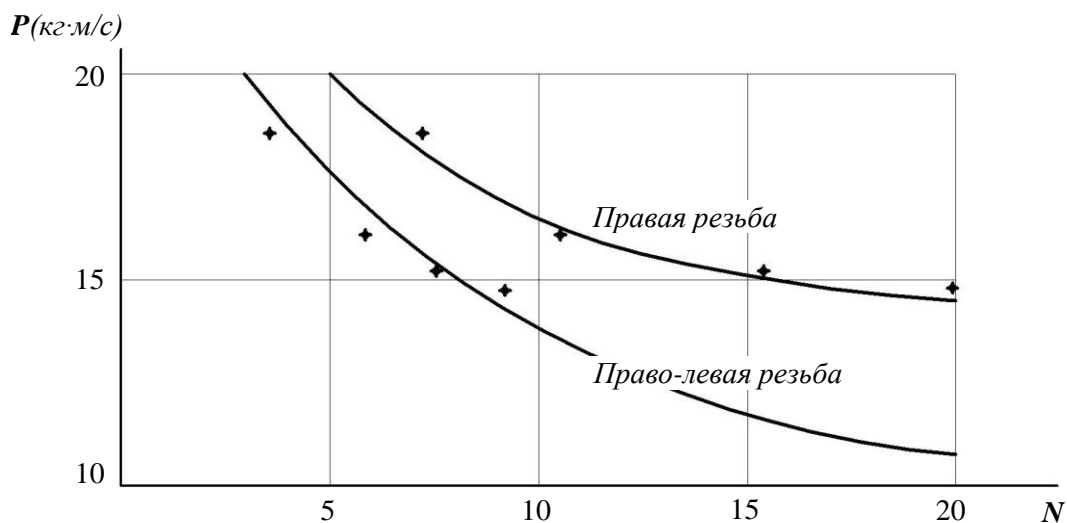


Рис. 2. Зависимости между величиной импульса силы  $P$  и количеством выдержанных циклов нагрузки  $N$

После статистической обработки результатов теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы: при значительных величинах импульсов, нагружающих резьбовое соединение, надежности правой и право-левой резьб отличаются незначительно, а при небольших значениях импульсов – право-левая резьба существенно проигрывает по надежности правой резьбе и не может быть рекомендована к использованию, несмотря на ее способность предотвращать самоотвинчивание гаек.

### Список литературы

[1] *Анурьев В. И.* Справочник конструктора–машиностроителя: в 3 т. Т. 1 / Под ред. И. Н. Жестковой. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2006. 927 с.

[2] *Биргер И. А., Иосилевич Г. Б.* Резьбовые соединения. М.: Машиностроение, 1973. 256 с.

**Зудин Сергей Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: [zudin.sv@yandex.ru](mailto:zudin.sv@yandex.ru)

Р.Ю. Кривов

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

С точки зрения режимов обработки производительность – это объем удаленного материала в единицу времени. Время, как правило, берется машинное, т.е. напрямую связанное с режимами обработки, например, со скоростью. Если снятие припуска выполняется на разных режимах обработки при различной скорости съема, то расчет производят суммированием на каждом из этапов. Поскольку электроэрозионная обработка широко используется в промышленности, целью настоящей работы является определение основных факторов, влияющих на производительность.

Производительность электроэрозионной обработки (ЭЭО) зависит в первую очередь от величины среднего значения рабочего тока, подаваемого в зону обработки. При черновом режиме обработки для обрабатываемой поверхности, силу тока выбирают максимально допустимой. Оптимальное значение среднего тока от площади обрабатываемой поверхности определяют по графику (рис. 1). Заштрихованная область на графике соответствует максимальной производительности при данной площади обрабатываемой поверхности [1].

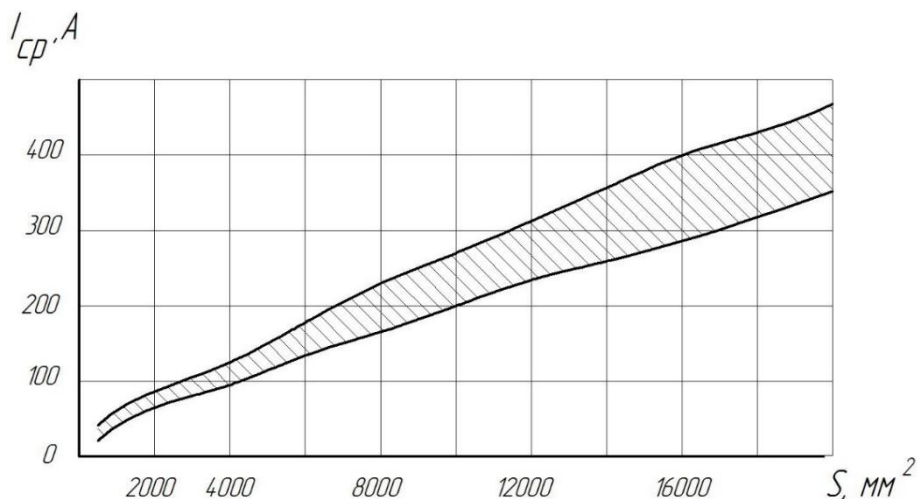


Рис. 1. График зависимости оптимального тока обработки от площади обработки

Кроме того, существуют такие параметры как частота и скважность, которые напрямую влияют на производительность процесса. В таблице 1 представлена связь параметров для наиболее производительных процессов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании ЭЭО с последующим уточнением при обработке изделия. Для полустовых и чистовых режимов, необходимо переходить на меньшие по току режимы и

большие частоты следования импульса. Вследствие уменьшения энергии импульса размеры единичных лунок от этих импульсов уменьшаются, улучшается качество поверхности изделия.

Таблица 1

Режимы обработки, обеспечивающие наибольшую производительность и оптимальную шероховатость [2].

Характеристика режима			Площадь обработки, мм <sup>2</sup>	Параметр шероховатости, Rz мкм
Частота, кГц	Скважность	Средний ток, А		
8	1,25	34-45	1000-2000	80
22-44	1,25	30-35	1000-2000	40
66-100	1,25-1,5	25-30	1000-2000	20
200	1,7-2	12-14	150-250	2,5
440	3-4	До 4	1250-250	1,25

Все физические процессы, сопутствующие ЭЭО, протекают в межэлектродном пространстве, заполненном рабочей жидкостью. По мере удлинения и искажения трассы удаления продуктов эрозии ухудшается процесс обработки, поэтому без принятия специальных дополнительных мер по удалению продуктов эрозии величину тока приходится снижать. Из-за наличия большого количества электропроводных капель застывшего металла, энергия тратится на вторичное их расплавление. Улучшить условия удаления продуктов эрозии можно принудительной прокачкой рабочей среды через межэлектродный зазор или ее отсосом (Рис. 2).

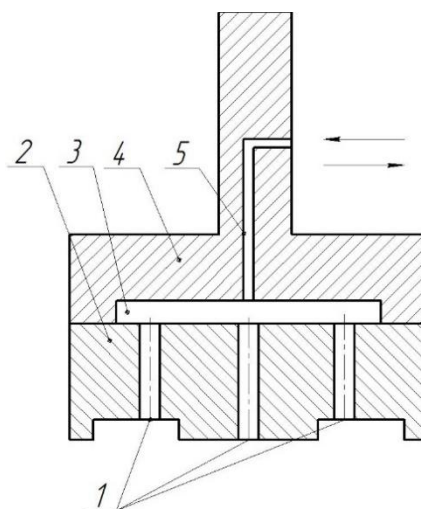


Рис. 2. Электрод с каналами для прокачки и отсоса рабочей жидкости

Прокачку или отсос рабочей среды из межэлектродного промежутка осуществляется через каналы 1, просверленные в теле электрода-инструмента 2, соединяющиеся с общей камерой 3 электрод-держателя 4. Камера соединена с полым хвостовиком 5, который связан с насосом, подающим или отсасывающим рабочую жидкость из межэлектродного промежутка [2]. Количество каналов выбирают так, чтобы обеспечить равномерное распределение рабочей жидкости.

Следует отметить, что такой фактор, как рабочая жидкость, также влияет на производительность обработки на протяжении всего рабочего процесса. Например, для высокой производительности на чистовых режимах обработки используют керосин или дистиллированную воду, а на более грубых режимах применяют вещества с высокой температурой вспышки, такие как масла. Загрязнение рабочей жидкости негативно влияет на работу импульсов, вследствие чего снижается производительность. Для поддержания электроэрозионной обработки следует менять рабочую среду.

Выбор такого фактора, как материал электрода, также влияет на производительность электроэрозионной обработки. Для чистовых операций используют медь без примесей или мелкозернистый графит. Для черновых используют более дешевый с крупным зерном графит или медно-графитовые композиции. Содержание в материале любых примесей резко снижает электроэрозионные свойства и повышает износ электрода.

Таким образом на производительность электроэрозионной обработки влияют такие факторы, как средний ток, частота рабочих импульсов, скважность, рабочая жидкость и материал электрода.

### Список литературы

[1] Левинсон, Е. М. Электроэрозионная обработка: Справочное пособие по электротехнологии / Е.М. Левинсон, В. С. Лев. – Л.: Лениздат, 1972. – 326 с.

[2] Немиллов, Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немиллов. – Д.: Машиностроение, 1983, - 160с.

[3] Малышев Е.Н., Зенкин Н.В., Мусохранов М.В., Калмыков В.В. Нормирование затрат времени на выполнение технологической операции // Методические указания по выполнению домашнего задания по дисциплине "Технология производства машин" / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Калуга, 2015.

[4] Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С. Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[5] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 55-58.

[6] Калмыков В.В., Малышев А.Н., Покровская М.Э. Анализ способов точного позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 1.

[7] Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K. Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 24. С. 15621-15626.

**Кривов Роман Юрьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: roma-gf@yandex.ru



А.Д. Левин

## **ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ И КООРДИНАТНОЙ ШТАМПОВКИ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Известно, что раскрой тонколистовых материалов широко применяется в промышленности, в основном для выполнения заготовительных операций. На данный момент, в результате научно-технического прогресса, станкостроительные предприятия предлагают множество вариантов выполнения разделительных операций. Исходя из этого, при организации современного конкурентоспособного предприятия или же при техническом переоборудовании уже функционирующего, связанного с производством деталей из тонколистовых материалов, организатору необходимо принять решение о покупке того или иного оборудования. При этом следует учитывать, что каждый метод листового раскроя, в зависимости от оборудования, и соответственно механики процесса, обладает своими уникальными возможностями: один предоставляет широкие возможности обработки, а другой, например, выделяется высокой производительностью или способностью обеспечить прецизионную точность обработки.

В современной промышленности наиболее распространен серийный тип производства, при котором для успешной борьбы в условиях жесткой конкуренции необходимо обеспечить возможность максимально быстро модернизировать продукцию, то есть провести НИОКР и перейти непосредственно к производству и реализации. Таким образом, высокая производительность при оптимальном качестве является одним из важнейших требований, предъявляемых к оборудованию. Из всего многообразия методов, для такого типа производства широко применяется лазерная резка и координатная штамповка, эти методы соответствуют изложенному выше требованию.

При исследовании возможностей данных методов использовалась известная методика проведения полных многофакторных экспериментов. Представляет собой опытно-статистический метод, при котором создается матрица планирования, с помощью которой простыми математическими действиями и процедурами, в результате обработки результатов эксперимента, можно получить математическую модель – уравнение регрессионного анализа. Такие модели, в свою очередь, позволяют определить силу и характер влияния каждого из исследуемых факторов, а также всех их взаимодействий на отклик – в данном случае, производительность.

Таким образом, в качестве выходного параметра принимаем время, затрачиваемое на выполнение разделительной операции с учетом холостых ходов и смены инструмента, то есть время с момента запуска управляющей программы до ее завершения.

Известно, что для проведения экспериментов, необходимо подобрать факторы, по предположению влияющие на отклик; в нашем случае – факторы, влияющие на время выполнения управляющей программы. По причине того, что механизм работы оборудования, предназначенного для выполнения лазерной резки и координатной штамповки, основан на совершенно разных физических явлениях, а для достижения поставленных целей требуется обеспечить относительную совместимость варьируемых факторов, возникли определенные ограничения в выборе последних.

При проведении эксперимента, выходным параметром которого является производительность, были выявлены новые факторы, влияющие на время выполнения разделительных операций с применением координатно-пробивного прессы и важное замечание, относящееся к процессу лазерной резки. Кроме того, что были выявлены новые факторы, оказалось также что воздействие, по предположению, влияющих на производительность толщины и марки материала при координатной штамповке являются крайне низкими. Однако, согласно экспериментальным данным, варьирование такими факторами, как наличие общей линии реза и смены инструмента, а также сложность контура оказывает значительное влияние на отклик, то есть производительность. О величине и характере влияния этих факторов на отклик можно будет судить после проведения ряда многофакторных экспериментов. Что касается лазерной резки, следует учитывать, что в состоянии поставки нержавеющей стали марки AISI 430 (российский аналог 12Х17) включает защитную пленку на всей поверхности листа для сохранения декоративных свойств. Таким образом, резка выполняется за два прохода: из которых на первом проплавляется (выпаривается) пленка, и только на втором происходит непосредственно процесс раскроя металла. Причем скорость выполнения обоих проходов приблизительно одинакова. Первый проход следует относить к потерям времени, так как не происходит полезных воздействий на обрабатываемую деталь. В настоящее время данная проблема весьма актуальна для производителей лазерного оборудования, и в ближайшем будущем на рынке появятся полупроводниковые установки для лазерной резки, механизм работы которых позволяет выполнять раскрой металлов и пленки за один проход.

Исходя из этого, были выбраны следующие факторы: толщина материала, сопротивление срезу, вид оборудования, тип контура, необходимость смены инструмента, наличие общей линии реза. Сопротивление срезу в ходе эксперимента изменялось посредством использования тонколистовых сталей двух марок: сталь коррозионноустойчивая жаропрочная AISI 430 (российский аналог – 12Х17) и сталь конструкционная углеродистая

качественная Сталь 08кп. Вид оборудования, по правилам проведения многофакторных экспериментов, допускается отнести к качественным факторам. Под типом контура в данном случае понимается его сложность, то есть наличие множества изменений направления движения лазерной головки или же движений стола в случае с координатно-револьверным прессом, каждое из которых вызывает переход на следующий кадр в управляющей программе и, как известно, в этот момент происходит некоторая временная задержка, сумма которых, в результате, существенно сказывается на общем времени выполнения программы обработки. Необходимость смены инструмента относится только к координатно-револьверному прессу, и этот фактор является весьма важным при проведении данного эксперимента, по причине того, что он относится к недостаткам метода координатной штамповки, и таким образом можно будет установить силу влияния данного фактора на общее время обработки. Наличие общей линии реза также относится только к методу пробивки материала, под этим подразумевается то, что за один удар инструмента образуются кромки сразу двух деталей, что по практическим данным тоже имеет достаточно сильное влияние на общее время обработки.

На основе теоретических данных из анализа литературных источников, практических замечаний, приобретенных на предприятии ООО «Эликор» и результатов проведения нескольких экспериментов были выбраны факторы, влияющие на производительность рассматриваемых методов. В дальнейшем планируется проведение ряда многофакторных экспериментов. После их выполнения и обработки, все собранные данные подлежат структурированию и проведению общего сравнительного над ними анализа, результатом которого предполагается составление рекомендаций по применению того или иного метода для деталей с определенными конструктивными особенностями.

### **Список литературы**

[1] Сапрыкин Л.Г. Лазерное оборудование для обработки материалов. Технический Альманах "Оборудование", 2006, №4.

[2] Вдовин С.И. Исследование очага пластической деформации при вырубке листового материала / С.И. Вдовин, Н.А. Акастелов; изв. вузов: Машиностроение, 1989. - №8. - с. 90-92

[3] Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. - 688 с.

[4] Попов Е.А. Основы листовой штамповки / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 278 с.

**Левин Артем Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: doolciamanti@gmail.com

Е.В. Логутенкова

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Областью исследований физики конденсированного состояния является теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов. Многие процессы, происходящие в кристаллических веществах, зарождаются в поверхностных слоях. Через поверхности эти материалы воспринимают силовое и иное воздействие. С поверхностей происходит рост кристаллов из расплава. Разрушение или изменение формы материалов сопровождается образованием новых поверхностей. Поверхность материала является подложкой для нанесения различного рода покрытий.

В соответствии с представлениями о структуре двойного электрического слоя на границе раздела фаз металл-воздух, основной характеристикой энергетического состояния поверхности является работа выхода электрона (работа выхода) с поверхности металла. Работа выхода – разница между минимальной энергией (измеряемой в электрон-вольтах), которую необходимо сообщить электрону для его «непосредственного» удаления из объема твердого тела, и энергией Ферми.

Согласно классической теории электропроводности свободные электроны совершают непрерывное беспорядочное движение. Электроны, совершая работу выхода, могут отрываться от подложки и удаляться на несколько межатомных расстояний. В связи с этим, над поверхностью материалов, обладающих металлическими свойствами, возникает, так называемое, облако свободных электронов. В соответствии с законом сохранения зарядов, на поверхности материала образуются избыточные положительные заряды, которые в результате кулоновского взаимодействия возвращают на поверхность вышедшие электроны. Поэтому подложка металлов имеет двойной электрический слой. Он состоит из приповерхностных электронов и внутривыступных ионов.

Работа выхода определяет количество энергии необходимой для удаления электрона из металла. Чем меньше требуется энергии, тем эффективней эксплуатация энергетических, электролизных и гальванических установок.

В настоящее время накопился некоторый объем экспериментальных и теоретических исследований, показывающих зависимость работы выхода электрона из подложки от деформации металла [1]. Работа выхода является комплексным показателем энергетического состояния подложки [2-5], которое определяется уровнем поверхностной энергии конденсированных веществ.

Исследование особенностей энергетических параметров подложки конструкционных материалов с металлическими свойствами позволяет по-

лучить представление об изменении свойств приповерхностных областей [6; 7]. Такие знания дают возможность оценивать и управлять эксплуатационными свойствами рабочих поверхностей изделий машино- и приборостроения. В частности, данные исследования необходимы для качественного улучшения изоляционных свойств покрытий. Однако, подобный механизм управления свойствами изучен недостаточно хорошо.

Таким образом, определение параметров внешнего воздействия, обеспечивающих выполнение предъявляемых требований к физико-механическим свойствам образуемых поверхностей является актуальной задачей.

### Список литературы

[1]. Погосов В.В., Бабич А.В. О влиянии деформации и диэлектрического покрытия // Журнал технической физики. 2008. том 78. вып. 8.

[2]. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Логутенкова Е.В., Сорокин С.П. Энергетическое состояние поверхностного слоя деталей машин // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 5-2. С. 276-279.

[3] Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В. Поверхностная энергия и процесс схватывания контактирующих поверхностей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 11. С. 45-51.

[4] Малышев Е.Н., Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Антонюк Ф.И. Распределение энергии технологического воздействия при формировании рабочих поверхностей деталей машин из металлических материалов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 58.

[5] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-2. С. 251-254.

[6] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3Fn, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[7] Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K. Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 24. С. 15621-15626.

**Логутенкова Екатерина Владимировна** – старший преподаватель  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: iwtbh@mail.ru

## **СЕКЦИЯ 2.**

### **ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Е.А. Харченкова, Н.Н. Максимов

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Камера сгорания является ответственным элементом газотурбинного двигателя (ГТД). Устойчивость ее работы определяет надежность работы ГТД, эффективность и экономичность. Конструкция камеры сгорания работает с учетом тяжелых условий ее эксплуатации в высокотемпературной среде, определяемой горением топлива.

Жаровая труба - это один из основных элементов камеры сгорания газотурбинного двигателя, в которой происходит высокотемпературное горение топлива и создается высокое давление газов. Она состоит из отдельных листовых секций, выполненных из листового жаропрочного сплава ХН78Т. Секции соединяются между собой точечной контактной сваркой. Данный способ соединения обеспечивает высокую производительность, стабильное качество сварных соединений, малую себестоимость за счет низкого расхода вспомогательных материалов и высокую экологичность процесса, легко механизмуется и автоматизируется. На рисунке 1 показана зона сварки трех элементов: стенки наружной, экрана наружного и головки, толщину которых составляют 0,6 мм, 1 мм и 1 мм соответственно.

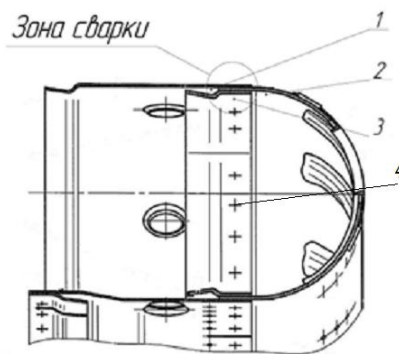


Рис. 1. Жаровая труба, 1 – Стенка наружная, 2 – Головка, 3 – Экран наружный, 4 – Сварные точечные соединения

Целью исследований, изложенных в данной статье, является изучение особенностей контактной точечной сварки, ее основных параметров, для выявления способов уменьшения остаточных напряжений и повышения работоспособности сварных соединений.

Жаропрочный сплав на основе никеля ХН78Т рассчитан на длительную работу при температуре до 1100°C. Никелевые сплавы обладают сравнительно низкой электропроводностью (значительно ниже, чем у ма-

лоуглеродистых сталей). Поэтому их точечная сварка осуществляется при умеренной силе тока. Сплав ХН78Токалиностойкий при температуре 950 - 1050°C. После высокотемпературной обработки приобретает практически однородную структуру твердого раствора на основе никеля, что способствует легкой деформируемости. Рекомендуемый режим термической обработки: закалка с 1000-1150°C на воздухе или в воде. Сплав относительно трудносвариваемый. Такой материал для получения качественных сварных соединений перед сваркой подогревают до 200-300 градусов с последующей термообработкой после сварки [2].

Особенностями контактной точечной сварки являются: малое время сварки  $t_{CB}$  (от 0,1с до нескольких секунд), большой сварочный ток  $I_{CB}$  (более 1000А), малое напряжение в сварочной цепи  $U_2$  (1-10В, обычно 2-3В), значительное усилие, сжимающее детали  $F_{CB}$  (от нескольких десятков до сотен кг), небольшая зона расплавления и нагрев небольшими размерами и формой рабочих поверхностей электродов  $R_{ЭЛ}$  [1]. Эти параметры представляются в виде циклограммы, отражающей их изменение во времени (рис. 2).

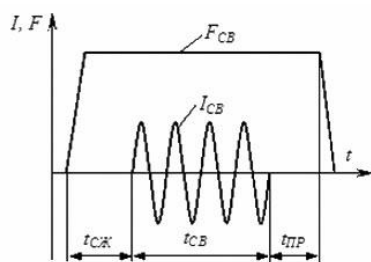


Рис. 2. Изменение параметров во времени

Сила сварочного тока ( $I_{CB}$ ) - один из основных параметров точечной сварки. От нее зависит не только количество тепла, выделяющегося в зоне соединения, но и градиент температур по времени, т.е. скорость нагрева. Напрямую зависят от  $I_{CB}$  размеры литого ядра ( $d_{я}$ ,  $c$ ,  $h$  и  $h'$ ), увеличивающиеся пропорционально увеличению  $I_{CB}$  (рис. 3).

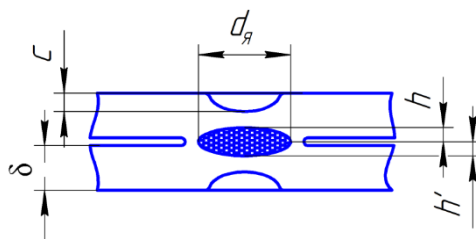


Рис. 3. Сварное соединение с литым ядром и уплотняющим пояском деформированного металла, где:  $\delta$  – толщина детали,  $d_{я}$  – диаметр литого ядра,  $c$  – глубина отпечатка от электрода,  $h'$ - $h$  – величина проплавления

Весь процесс точечной сварки можно условно разделить на 3 этапа (рис. 4).



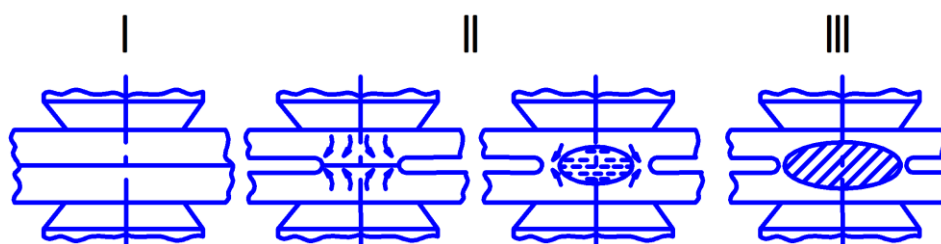


Рис. 4. Этапы контактной точечной сварки

На первом этапе осуществляется сжатие деталей, вызывающее пластическую деформацию микронеровностей в контактах электрод-деталь-деталь-электрод.

На втором - включение импульса электрического тока, приводящего к нагреву металла, его расплавлению в зоне соединения и образованию жидкого ядра. По мере прохождения тока ядро увеличивается в диаметре по высоте до оптимальных размеров. Происходит увеличение объема нагретого металла и его деформирование. При этом продолжается пластическая осадка контактной зоны до окончательного размера за счет приложенного к электродам сварочного усилия и формирование деформированного пояса вокруг расплавленного ядра, который препятствует выплеску металла из зоны сварки (рис. 5).

На третьем этапе происходит выключение тока, охлаждение и кристаллизация металла, заканчивающаяся образованием литого ядра. При охлаждении объем металла уменьшается, происходят структурные превращения и возникают остаточные напряжения. Последние являются нежелательным явлением, т.к. они приводят к снижению работоспособности, вследствие образования трещин.

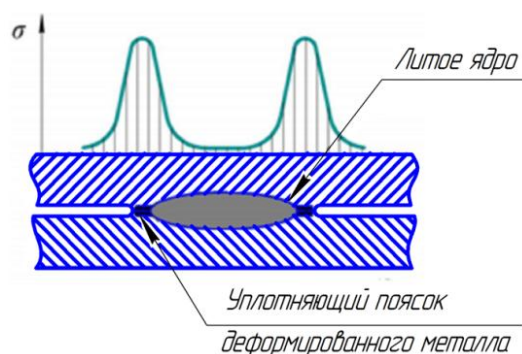


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений после остывания сварной точки

Усилие, сжимающее электроды, снимается с некоторой задержкой после отключения тока. Это обеспечивает необходимые условия для лучшей кристаллизации металла [3]. Для снижения остаточных напряжений применяют различные способы, которые классифицируют на 3 группы: термические, механические и термомеханические (табл.1).

Таблица 1

Термические	Предварительный и сопутствующий подогрев во время сварки; высокий отпуск после сварки	Подогрев снижает предел текучести металла, модуль упругости и перепад температур. Снижение напряжений при низкотемпературном подогреве составляет 30–40%. Общий высокий отпуск позволяет снизить напряжения на 85–90% и улучшить пластические свойства сварных соединений.
Механические	Проковка, прокатка, вибрация, взрывная обработка, ультразвуковая обработка, приложение нагрузки к сварным соединениям	Создание пластической деформации металла сварных соединений, вследствие чего происходит снижение растягивающих остаточных напряжений
Термомеханические	Одновременное протекание тепловых и механических процессов	

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что для повышения работоспособности сварных точечных соединений жаровой трубы, изготовленной из сплава ХН78Т, требуется применение более сложного технологического цикла. Однако при выборе того или иного технологического приема необходимо учитывать затраты на модернизацию сварочной установки.

В данной работе предлагается применить общий высокий отпуск за счет пропуска небольших импульсов тока ( $U_{отп}$ ) после выключения тока сварки и (рис.6). Такие импульсы существенно снизят скорость охлаждения кристаллизовавшегося литого ядра и прилегающих областей, что в значительной мере уменьшит вероятность образования крупнозернистой структуры металла и снизят вероятность образования трещин, возникающих в процессе эксплуатации. На заключительном этапе сварочного цикла целесообразно приложить ковочное усилие ( $F_{ков}$ ) к электродам, что в существенной степени будет способствовать снижению остаточных напряжений растягивания за счет компенсации растягивающих усилий в силу дополнительной деформации при осадке.

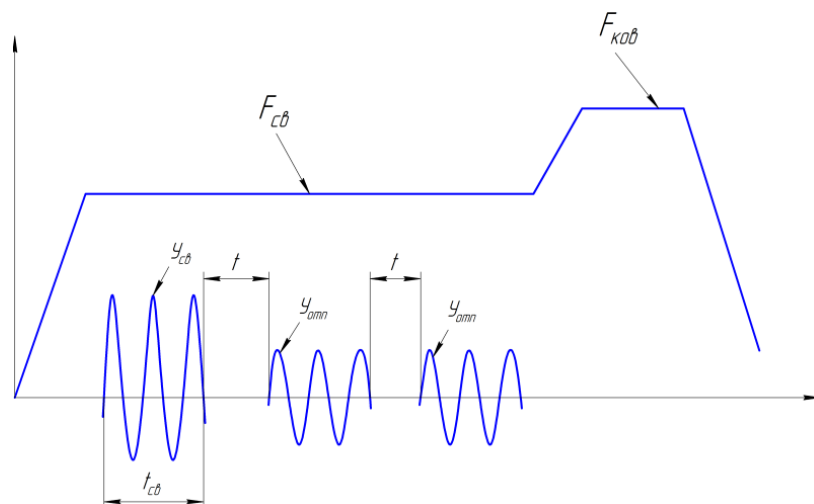


Рис 6. Циклограмма предлагаемого процесса сварки

Такое изменение сварочной технологии потребует минимальных затрат на модернизацию оборудования при значительном эффекте повышения работоспособности.

### Список литературы

- [1] Власов А.Ф. Технология сварки специальных сталей. Методы уменьшения сварочных напряжений, деформаций и перемещений в конструкциях. - М.: Машиностроение, 2015.
- [2] Сорокин Л.И. Технология сварки специальных сталей. Способы уменьшения сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1996.
- [3] Чулошников П.Л., Контактная сварка. Учебное пособие для проф. обучения. - М.: Машиностроение, 1987.

**Харченкова Елена Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elenka23811@gmail.com

**Максимов Николай Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии сварки» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.ru

Е.И. Грибовский, Н.Н. Максимов

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТА ШУНТИРОВАНИЯ СВАРОЧНОГО ТОКА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Алюминий и его сплавы обладают свойствами, выгодно отличающими их от других металлов. Это легкие материалы с плотностью 2,5-2,8 г/см<sup>3</sup>, примерно в три раза меньшей, чем у железа, меди или цинка. Но при этом они обладают высокой прочностью и электропроводностью [1].

Алюминий – коррозионноустойчивый металл. Алюминиевые конструкции в течение длительного времени способны сохранять свои качества при низких температурах и воздействии влаги. Для электротехники особую ценность представляет высокая электропроводность алюминия. Еще одно достоинство алюминия – легкость механической обработки и свариваемость.

Увеличение объема использования алюминия и его сплавов в различных отраслях промышленности, особенно в тех случаях, когда важны стойкость к коррозии и высокое соотношение прочность/вес для металлических конструкций, приводит к возрастанию потребности в технологиях, обеспечивающих качественные сварные соединения изделий из данных материалов.

Одним из распространенных способов получения неразъемных соединений алюминиевых деталей является точечная контактная сварка. Она обеспечивает высокую производительность, стабильное качество сварных соединений, низкую себестоимость, отвечает современным санитарно-гигиеническим требованиям. Машины контактной сварки или их рабочие узлы могут сравнительно легко встраиваться в поточные сборочно-сварочные линии.

Однако сварку алюминия и его сплавов осложняют несколько факторов обусловленных его химическими, теплофизическими и механическими свойствами, а именно: химической активностью, высокой тепло- и электропроводностью, низкой прочностью и сопротивляемостью деформации при температурах 400-600°C, высоким коэффициентом теплового объемного расширения.

Химическая активность алюминиевых сплавов приводит к появлению пленки окиси Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, образующейся на поверхности деталей. Она имеет температуру плавления порядка 2050°C, что значительно превышает температуру плавления алюминия и его сплавов (640-660°C). К тому же является прочным и стойким химическим соединением, имеющим диэлектрические свойства. Перед сваркой необходима очистка поверхности деталей механическим или химическим способами. Химическая очистка является

наиболее эффективным методом. Травление алюминия может осуществляться в щелочных растворах или ортофосфорной кислоте [3].

В данной работе рассматриваются пути решения проблемы повышения качества сварных соединений на примере антенного излучателя, выполненного из сплава АМц. Излучатель (рис. 1) представляет собой конструкцию, состоящую из желоба, штампованного из листа толщиной 0,8 мм. Во внутреннюю полость желоба для обеспечения жесткости ввариваются 11 бобышек, имеющих форму параллелепипеда размером 10x12x10 мм из того же сплава. Для защиты от щелевой коррозии сварку ведут по слою эпоксидного клея.

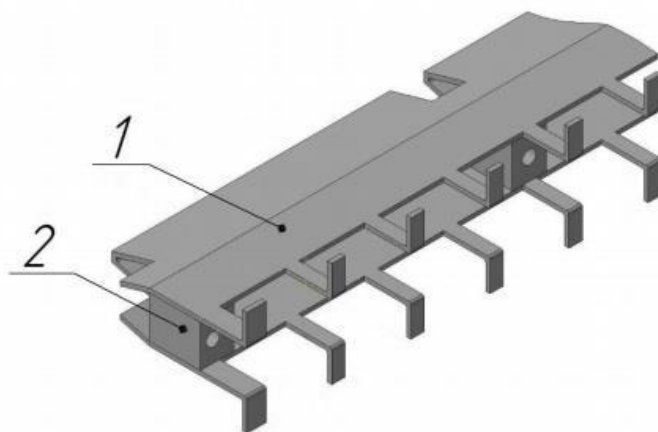


Рис. 1. Антенный излучатель; 1 – Желоб, 2 – Бобышка

Такая конструкция в сочетании с высокими требованиями к качеству соединений в значительной степени усложняет технологию процесса контактной точечной сварки.

Основные методы решения проблемы получения качественных соединений при сварке излучателя описаны в работе [2]. Представленные исследования посвящены решению проблемы шунтирования сварочного тока обусловленного конструктивными особенностями антенного излучателя (рис. 2) и относительно низким значением удельного электрического сопротивления ( $\rho_0$ ) алюминиевого сплава АМц ( $4,3 \div 6,0 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 10^8$ ), высокой теплопроводностью ( $\lambda = 101 \div 133 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ) и сводятся к решению нескольких основных задач определяемых особенностями конструкции детали и свойствами алюминия.

Высокие теплофизические свойства алюминия затрудняют тепловыделение в зоне соединения при точечной контактной сварке [2]. При достижении температуры плавления и формировании литого ядра в контакте деталь-деталь температура в контакте между электродом из БрХ и наружной поверхностью деталей из АМц достигает значений 420-480°C. При такой температуре предел прочности алюминиевых сплавов резко снижается и, как следствие, формируется отпечаток от электрода с деформацией более 15-20% от толщины деталей, вызванный не только сварочным давлени-

нием, но и тепловым расширением материала деталей под электродами при формировании литого ядра если привод подвижного электрода обладает значительной массой и инерционностью, препятствующей его перемещению вверх для компенсации дилатометрического эффекта.

Основные затруднения связаны также с разнотолщинностью свариваемых деталей (более 1/12) и с шунтированием тока через основной материал желоба, а также необходимостью формирования одновременно двух сварных точек между образующими желоба и торцевыми поверхностями бобышек (рис. 2). Наличие слоя эпоксидного клея, наносимого перед сваркой в контакты деталь-деталь, вносит дополнительные осложнения при формировании соединений требуемого качества.

Рекомендации, приведенные в работе [2], не позволяют в полной мере решить проблему уменьшения степени деформации деталей в контактах электрод-деталь (глубина отпечатка от электрода). Не решается и проблема повышения стойкости электродов.

Для уменьшения глубины отпечатка от электродов предлагается понизить тепловыделение в контактах электрод-деталь. Учитывая характерное для детали распределение тока (рис. 2), при котором через контакты электрод-деталь протекает весь ток вторичного контура равный сумме тока шунтирования и сварочного, формирующего сварные точки, можно в значительной степени понизить тепловыделение в контактах электрод-деталь уменьшив ток шунтирования ( $I_{шунт}$ ) и снизив этим общую величину тока в контактах электрод-деталь ( $I_2$  рис. 2). Для этого в конструкции приспособления целесообразно разместить магнитопровод охватывающий часть желоба с током шунтирования (рис. 2). В этом случае токи шунтирования можно свести до ничтожно малого значения, посредством разъемных дросселей. Если разъемный железный сердечник надет на желоб, то он становится одновитковым дросселем, через который идет ток  $I_{ш}$  (рис. 2). Коэффициент самоиндукции такого дросселя определяется по формуле:

$$L = 4\pi n^2 \mu S_{жс} / l_{жс} \quad (1)$$

где  $n$  – число витков ( $n=1$ );  $S_{жс}$  – площадь сечения активного железа сердечника;  $l_{жс}$  – длина средней магнитной линии по сердечнику.

Если положить, что максимальная индукция, допустимая в сердечнике,  $B = 1,8 \cdot 10^4$  Тл, то, поскольку:  $B = \mu H$ ;  $H = I / u$ , получаем:

$$\mu = 1,8 \cdot 10^4 u / I_{ш} \quad (2)$$

где  $u = 2(h_3 + \delta)$  – периметр проводящего контура ветви шунтирования.

При этом индуктивное сопротивление одновиткового дросселя:

$$X_{др} = \frac{2\pi f 4\pi n^2 1,8 \cdot 10^4 u S_{жс}}{I_{ш} l_{жс} 10^9} \quad (3)$$

где  $n$  – число витков;  $S_{жс}$  – сечение магнитопровода;  $l_{жс}$  – длина средней магнитной линии в сердечнике [4].

Для нормальной частоты 50 Гц:

$$X_{др} = \frac{72S_{жс}10^3}{I_{ш}}10^{-6} \quad (4)$$

где  $S_{жс}$  – в  $см^2$ ;  $x_{др}$  – в Ом.

Если напряжение в контактах электрод-деталь концах  $U_{он}$ , то следует обеспечить посредством дросселя:

$$U_{он} = I_{ш}x_{др}, \text{ тогда } \frac{I_{ш}72000S_{жс}}{I_{ш}10^6} = U_{он} \quad (5)$$

Отсюда сечение магнитопровода дросселя:

$$S_{жс} \approx 14U_{он} \quad (6)$$

В этой расчетной формуле  $S_{жс}$  – в  $см^2$ ;  $U_{он}$  – в В.

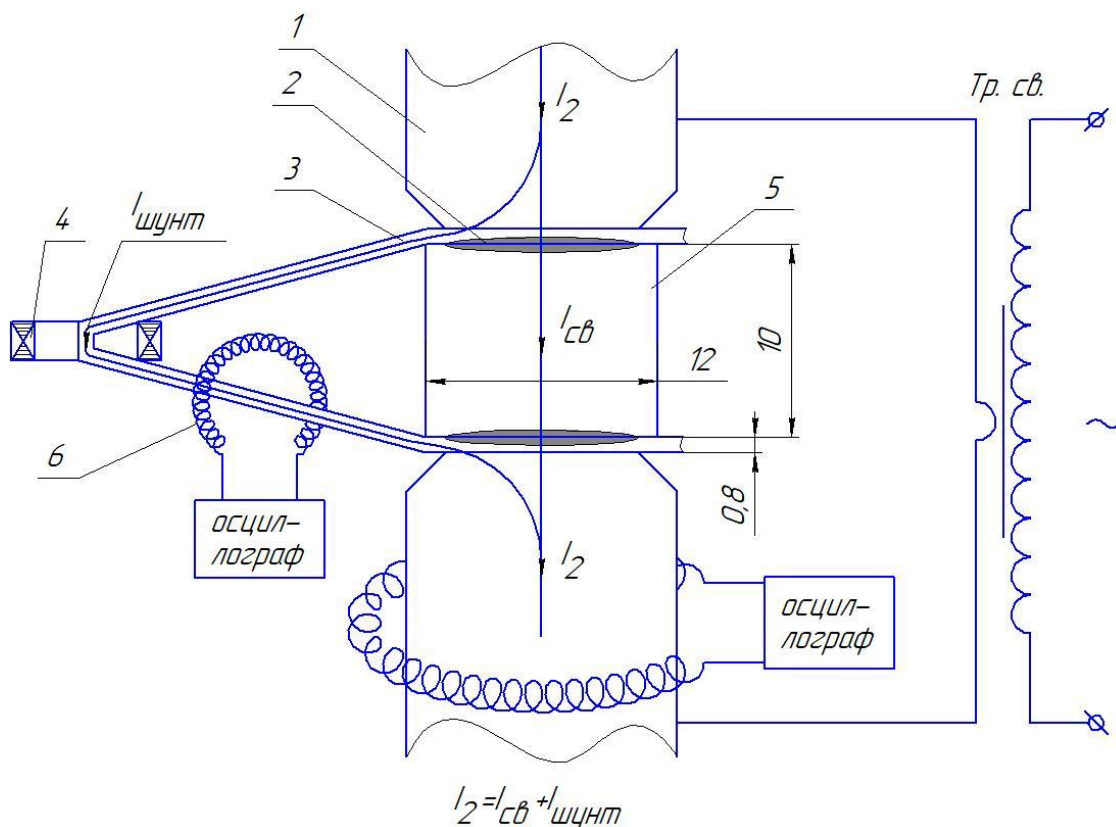


Рис. 2. Схема протекания тока при сварке антенного излучателя и измерения тока вторичного контура  $I_2$  и  $I_{шунт}$ :

1 – электрод БрХ, 2 – литое ядро  $643^{\circ}C$ ; 3 – желоб; 4 – магнитопровод; 5 – бобышка; 6 – индуктивный датчик

Описанное технологическое решение и прием были применены при конструировании лабораторной установки и приспособления (с магнитопроводом) для сборки и сварки излучателя.

Величину тока в сварочном контуре  $I_2$  и тока шунтирования  $I_{шунт}$  (рис. 2) измеряли с помощью индуктивного датчика (пояса Роговского) и цифрового осциллографа по амплитудным значениям соответствующих импульсов соответствующих электрических цепей ( $I_2$  и  $I_{шунт}$  рис. 2). Анализ измеренных величин тока шунтирования без магнитопровода и с магнитопроводом (рис. 2) показал, что конструирование сборочно-сварочного приспособления с учетом размещения магнитопровода позволяет уменьшить ток шунтирования со значения равного  $16 \div 18$  кА до величины порядка  $2 \div 3$  кА. Что в свою очередь обеспечило уменьшение тока вторичного контура и тока сварки на соответствующую величину. Дальнейший технологический прием обеспечил меньший нагрев в контактах электрод-деталь и способствовал снижению степени деформации от электрода (глубины отпечатка) до  $5 \div 7\%$  и удовлетворить конструкторско-технологические требования к изделию.

#### Список литературы

[1] Банов М.Д. Технология и оборудование контактной сварки, М.: «Академия», 2009. – 224с.

[2] Максимов Н.Н., Сергеев В.Ю. Совершенствование технологического процесса контактной сварки деталей из алюминиевых сплавов, «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» №10 2017.

[3] Максимов Н.Н., Белобородов А.С., Осипова М.В., Кишкин А.Е. Опыт применения контактных машин переменного тока для сварки алюминиевых сплавов, НТК. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. -38с.

[4] Кочергин К.А. Сварка давлением, Л.: Машиностроение, 1972. – 155с.

**Грибовский Егор Ильич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: eg.gribovskiy@gmail.com

**Максимов Николай Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru



А.В. Дымов, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик

## **ВЫБОР СПОСОБА ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ РЕБОРДЫ ШНЕКА**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Шнековый транспортер типа PSE предназначен для транспортировки обезвоженного осадка, механических загрязнений, пульпы или других материалов. Может быть использован на очистных сооружениях стоков, как также и в других отраслях промышленности. Основными плюсами является универсальность применения, герметичность, возможность работы с компьютером, и он не требует технического обслуживания.



Рис. 1 Шнековый транспортер

### **Описание и принцип действия**

Шнековый транспортер состоит из рабочего корпуса, который с внутренней стороны обработан пластиком. Внутри корпуса находится шнек. В передней части транспортера находится емкость для загрузки,

Механические загрязнения попадают в емкость для загрузки, откуда транспортированы с помощью шнека на расстояние. Длина этого расстояния ограничивается отверстием – разгрузочным патрубком. Транспортер может работать как в горизонтальной позиции, так и под углом (0-30°). Шнековый транспортер имеет также возможность оборота вдоль оси в зависимости от потребностей места разгрузки. [1]

Таблица 1

Технические характеристики шнекового транспортера

Параметры	Min	Max
Длина транспортера	1 м	20 м
Диаметр шнека	120 мм	600 мм
Мощность двигателя	0,5 кВт	4,5 кВт
Наклон транспортера	0°	35°

Абразивный износ реборды шнека может достигать до 30% от диаметра. Вследствие износа шнека снижается производительность, увеличиваются удельные затраты энергии на перемещение массы. Чтобы этого не допустить необходимо наплавить на кромку шнека (реборду) износостойкий слой.

Наплавка относится к области упрочнения поверхностей металлических конструкций, работающих в режиме абразивного износа, и может быть использована при изготовлении и ремонте лопастей шнековых транспортеров (шнеков).

Известны способы поверхностного упрочнения металлических конструкций, подвергающихся абразивному износу, заключающиеся в плазменно-дуговой наплавке, предусматривающие применение в качестве наплавляемого материала порошков, проволоки, а также их сочетания. В указанных способах появляется возможность путем подбора химического состава порошков и проволоки создавать упрочняющий слой с практически любыми механическими свойствами. При этом толщина наплавляемого слоя лежит в пределах 2-4 мм, но может быть увеличена вторым и более слоями. Однако такого вида наплавка приводит к значительным деформациям поверхностей, потерям порошков до 50% и последующей обязательной финишной механической обработке ("в размер"), что также требует определенных производственных затрат. [2]

Технология и оборудование для комбинированной наплавки цилиндрических поверхностей

Вибродуговую наплавку выполняют вибрирующим электродом диаметром 1,5 ... 2 мм, причем в результате его вибрации механическим путем или при помощи электромагнита с частотой до 30 ... 100 1/с и амплитудой 0,5 ... 1 мм дуга закорачивается на наплавляемое изделие и снова возбуждается. При каждом коротком замыкании часть наплавляемого электрода остается на поверхности. Толщина слоя получается небольшой. Так как в зону наплавки все время подаются охлаждающая жидкость (обычно водный раствор кальцинированной соды) или потоки воздуха, изделие прогревается и деформируется очень мало. Ускоренное охлаждение способствует повышению твердости наплавленного металла. Наиболее часто этот способ применяют при наплавке цилиндрических изделий небольшого диаметра (рис. 2). Выполняют вибродуговую наплавку и под флюсом.

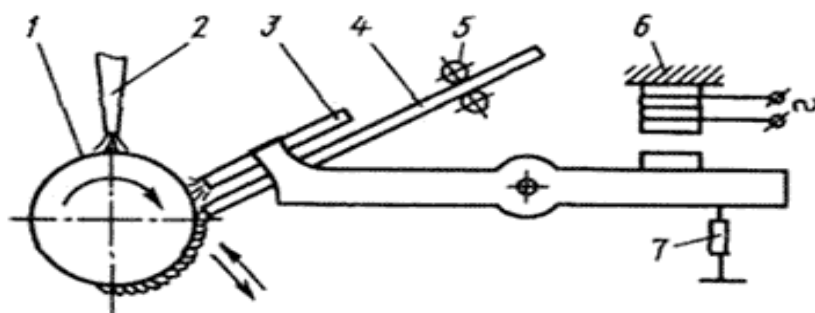


Рис. 2. Вибродуговая наплавка:

- 1 - наплавляемое изделие; 2 - сопло для подачи охлаждающей жидкости;
- 3 - сопло для подачи жидкости в зону сварки; 4 - электродная проволока;
- 5 - электродоподающие ролики; 6 - электромагнитный вибратор; 7 - пружина [3]

Преимущества вибродуговой наплавки:

- Простое оборудование;
- Доступность материалов;
- Возможность восстанавливать детали, начиная с диаметра 8 мм;
- Малый нагрев детали, а вследствие этого и малая деформация ее;
- Возможность получения достаточно твердой поверхности без ее термообработки;
- Большая производительность;
- Не требуется особой квалификации от работника.

Недостатком является то, что при применении охлаждающей жидкости возникает наплавленный слой с одинаковой твердостью и структурой, что существенно снижает усталостную прочность детали. Зачастую в наплавленном слое возникают поры.

### **Наплавка под слоем флюса**

Наплавка цилиндрических поверхностей деталей производится непрерывно по винтовой линии с заданным шагом, что обеспечивает высокую производительность работы. Вследствие равномерного нагрева деталь во время наплавки не деформируется.

Детали, ранее наплавлявшиеся электродами с меловой обмазкой, должны быть предварительно проточены до полного удаления металла прежней наплавки.

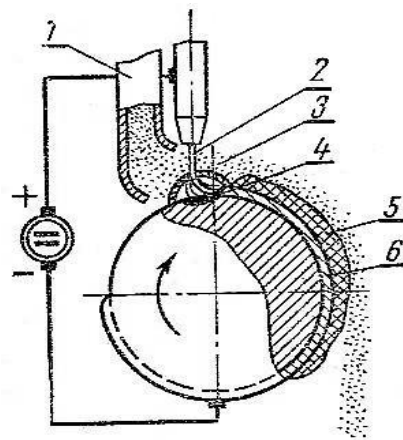


Рис. 3. Схема наплавки цилиндрических деталей:

- 1 – сварочный генератор; 2 – подача флюса; 3 – электрод; 4 – электрическая дуга;  
5 –шлаковая корка; 6 – наплавленный металл

Изношенные детали восстанавливают ручным, полуавтоматическим, автоматическим и вибродуговым способами. При этом ручную наплавку выполняют угольным и металлическим электродами; автоматическую под флюсом, в защитных газах, порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения. Целесообразность способа восстановления деталей наплавкой оценивают его экономической эффективностью, применимостью его к наплавке данной детали, возможностью получения металла, твердость и износостойкость которого будут выше характеристик ненаплавленной детали.

К преимуществам ручной дуговой наплавки относятся возможность использования обычного сварочного оборудования и возможность наплавки деталей сложной конфигурации. К недостаткам – низкая производительность, тяжелые условия труда, высокие требования к квалификации сварщика. Различают однодуговую и двухдуговую наплавку под флюсом с раздельным питанием каждой дуги. [4]

Ключевые достоинства наплавки под флюсом:

- Процесс характеризуется простотой выполнения необходимых работ.
- Производительность труда находится на очень высоком уровне.
- Качество наплавочных работ очень высокое.

Явных "минусов" рассматриваемой методики не так уж и много, но они все же есть:

- Оборудование имеет высокую стоимость.
- Увеличенная зона нагрева.

Снижение показателя прочности обработанных изделий (иногда их прочностные характеристики уменьшаются на 30–40 процентов).

#### **Наплавка в среде защитных газов**

Отличительной особенностью этих термических способов восстановления деталей является применение газовой защитной среды. Наплавка в защитных газах предпочтительнее наплавки под флюсом во многих случаях, например, при восстановлении валов малого диаметра, внутренних поверхностей втулок и др. В качестве защитных газов используются инертные (аргон и гелий) и активные газы (углекислый газ, азот и др.), а также водяной пар или смеси инертных и активных газов. Наибольшее применение на практике нашли сварочный углекислый газ и аргон высшего и первого сортов. Их поставляют и хранят в стальных баллонах: углекислый газ в сжиженном состоянии под давлением 7 МПа, а аргон в сжатом газообразном состоянии под давлением 15 МПа. Наилучшую защиту обеспечивают инертные газы, однако они существенно дороже и применяются в обоснованных случаях.

Востребованность такой наплавки обусловлена следующими факторами:

- малая чувствительность основного металла к любым видам загрязнений, в том числе и к тем, которые вызываются коррозионными явлениями;
- малая область структурных модификаций металла при сохранении высокой плотности тока и уровня концентрации электродуги;
- возможность автоматизации и качественной механизации наплавочной операции;
- высокий уровень производительности процесса;
- практически полная защищенность ванны от негативных влияний окружающей среды;
- возможность выполнения наплавки в разных положениях электрода в пространстве.

Недостатком методики признается разбрызгивание металла, которое происходит, если выбранная сила тока более 500 ампер. Данное явление выдвигает необходимость регулярной очистки (а также и специальной защиты) сопла горелки. Кроме того, нужно применять особую проволоку с раскислителями, вести наплавку исключительно на постоянном токе, а при увеличении его значения требуется постоянно охлаждать горелку. "Минусом" технологии можно считать и то, что сварщику необходимо использовать дорогостоящие защитные средства из-за высокой мощности излучения электродуги.

Несмотря на некоторые недостатки, наплавка металла в среде защитных газов является самым распространенным способом наплавки, так как позволяет экономить ресурсы, что, в свою очередь, приводит к снижению стоимости и улучшению качества получаемых в результате применения этого способа наплавки изделий.

### Список литературы

[1] Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова. Восстановление деталей машин: Справочник / - М.: Машиностроение. 2003. 672с.

[2] Г.В. Бобров; Нанесение неорганических покрытий. 2004. 420с.

[3] С.С. Солнцев; Защитные покрытия металлов при нагреве. 2009. 340с.

[4] Л.А. Колганов; Сварочные работы. Сварка, резка, пайка, наплавка; 2003. 305с.

**Дымов Антон Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: dimow.anton@yandex.ru

**Орлик Геннадий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

**Орлик Антон Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

А.С. Коростелкин, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ СВАРКЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Линзовый патрубок, представленный на рис. 1, находит широкое применение в таких отраслях промышленности как энергетика, химическая и пищевая промышленность, машиностроение, судостроение.



Рис. 1. Линзовый патрубок

Основной функцией таких устройств является снижение различного рода напряжений на фланцевые и сварные соединения, которые возникают вследствие температурной деформации трубопровода. Линзовый патрубок может растягиваться и сжиматься, компенсируя тем самым удлинение трубопровода, в случае транспортировки горячей среды, а также уменьшения его длины, в случае остывания металла труб. Благодаря этим устройствам значительно продлевается срок службы трубопроводов.

В данной работе линзовый патрубок применяется на плавучей насосной станции. Основные требования, предъявляемые к нему: прочность, надежность, а также устойчивость материала к воздействию агрессивных сред, в частности, морской воды. Для обеспечения эксплуатационных требований рекомендуется использовать хромоникелевую сталь аустенитного класса 08X18H10T, которая обладает повышенной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии (МКК), что важно для условий работы линзового патрубка. [1]

Структура этой марки стали в закаленном состоянии представляет собой аустенит. Одна из основных проблем, которая возникает при сварке

данной стали является межкристаллитная коррозия. Хромоникелевые аустенитные стали становятся восприимчивыми к межкристаллитной коррозии в результате замедленного охлаждения стали от температуры более 1000 0С или вследствие более или менее длительной выдержки ее в критическом интервале 450-850 0С. Явление МКК данной нержавеющей стали связывают с выделением при нагреве по границам зерен аустенита сложных карбидов железа и хрома, богатых хромом. По границам зерен содержание хрома понижается до 12% и менее, т.е. ниже того предела, которым обеспечивается коррозионная стойкость. Обедневшие хромом пограничные слои аустенита теряют свою химическую стойкость, и сталь становится склонной к МКК. Появление чувствительности к межкристаллитной коррозии у аустенитных хромоникелевых сталей зависит от времени пребывания ее при данной критической температуре. На рисунке 2 приведена кривая, иллюстрирующая зависимость между температурой и временем нагрева стали типа 18-8 и склонностью к МКК. [2]

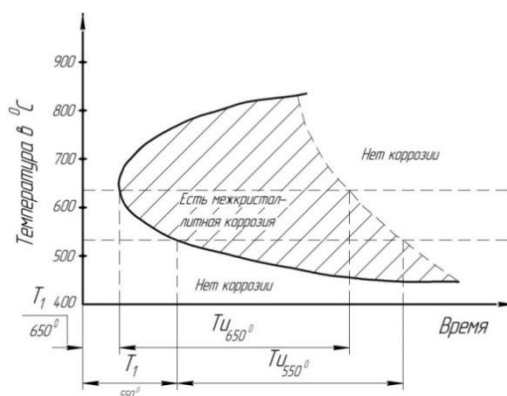


Рис. 2. Влияние температуры и времени выдержки на склонность стали 08X18N10T к межкристаллитной коррозии

Приведенные кривые показывают, что по мере повышения температуры нагрева стали время  $T_1$  сокращается от нескольких часов до нескольких минут. При достижении 800-850 0С восприимчивость к межкристаллитной коррозии вообще не наступает. При температурах от 450-500 0С до 650-700 0С скорость распада аустенита и образования хрома возрастает быстрее, чем скорость диффузии хрома. Вследствие этого сталь за более короткое время становится чувствительной к МКК. [3]

При сварке данного линзового патрубка параметры, режим сварки, скорость кристаллизации и охлаждения и объем сварочной ванны оказывают заметное влияние на структуру сварных швов, что в свою очередь оказывает влияние на склонность стали к МКК. Изменение основных параметров режима сварки (напряжение дуги, скорости и тока) оказывают влияния на структуру шва. [4]

Изменение напряжения дуги при сварке линзового патрубка влияет на интенсивность металлургических процессов в дуговом промежутке. Чрез-

мерное увеличение напряжения дуги может усилить окисление хрома и титана. Увеличение сварочного тока при неизменной скорости сварки приводит к увеличению объема сварочной ванны. При этом наблюдается заметное укрупнение структуры шва, что весьма нежелательно, с точки зрения его коррозионной стойкости. Увеличение скорости сварки сопровождается заметным измельчением первичной структуры сварных хромоникелевых швов. По мере увеличения скорости происходит измельчение структуры швов, благоприятно сказывающееся на коррозионную стойкость. Так же на измельчение структуры шва оказывает влияние скорость охлаждения сварного шва после сварки. Чем выше скорость охлаждения сварного шва, тем мельче будет зерно, что будет благоприятно сказываться на коррозионную стойкость. Для сокращения времени пребывания стали при сварке в области критических температур используются различные технологические приемы. [5]

### Список литературы

[1] Каспаров О. В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. // Технология легких сплавов. 2011. №3. С.86-91.

[2] Лощакова Э. У. Зависимость коррозионной стойкости сварных соединений от величины зерна аустенита // Теория и практика современной науки. 2016. № 2 (8). С. 266-269.

[3] Медоваров Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. К.: Машгиз; 1954. – 175 с.

[4] Орлик Г. Н., Орлик А. Г., Коростелкин А.С. Исследование технологических факторов, влияющих на межкристаллитную коррозию при сварке линзового патрубка. // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2016. №12. С. 67-70.

[5] Орлик Г. Н., Орлик А. Г., Коростелкин А.С. Исследование влияния параметров режимов аргонодуговой сварки на межкристаллитную коррозию стали 08X18H10T при изготовлении линзового патрубка. // Успехи современной науки и образования. 2017. №4, том 4. С. 62-65.

**Коростелкин Александр Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smarkquest@yandex.ru

**Орлик Геннадий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

**Орлик Антон Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru



Т.Г. Чернова, А.В. Кухто

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИЗ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В зависимости от типа и назначения конструкции к тонкостенным, толщиной 0,6 - 4 мм, сварным изделиям из среднелегированных сталей предъявляются требования необходимой и достаточной прочности в условиях эксплуатации.

Сварка среднелегированных сталей затруднена тем, что они склонны к образованию трещин и к появлению закалочных структур.

Структура и свойства тонкостенных сварных соединений из среднелегированных сталей связаны с технологическим процессом сварки и зависят от выбранного способа и режимов сварки.

Наибольшую опасность представляет зона сплавления, где наблюдается повышенная химическая и структурная неоднородность, а также пик концентрации внутренних сварочных напряжений [2].

В исходном состоянии тонкие листы из среднелегированных сталей подвергают закалке и отпуску (закалка 880°C среда охлаждения – масло, отпуск 480-570°C среда охлаждения – масло). Закалка позволяет получить неравновесную структуру, повышает прочность и твердость, но понижает пластичность. Отпуск позволяет получить более устойчивое структурное состояние, устраняет или уменьшает напряжения, повышает вязкость и пластичность, однако понижает твердость и уменьшает хрупкость закаленной стали [4].

При изготовлении сварных тонколистовых конструкций сложной геометрии из среднелегированных сталей принципиально возможны следующие последовательности выполнения технологических операций:

- сварка деталей в состоянии поставки (HRC 28-32, отожженные), затем отпуск для снятия внутренних напряжений (480 – 570 °C среда охлаждения – масло)
- закалка отдельных деталей (880°C HRC 38-42, среда охлаждения - масло), затем сварка и отпуск для снятия внутренних напряжений (480 – 570 °C, среда охлаждения - масло).

То есть, в первом случае получаем сварку деталей без термической обработки, а во втором - сварку деталей после термической обработки.

Для исследования влияния термической обработки на структурную неоднородность зоны термического влияния (ЗТВ) и на прочностные свойства сварных соединений тонкостенных конструкций сложной геометрии

были проведены исследования образцов, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом:

- образцов в состоянии поставки (тип 1),
- образцов с термической обработкой (закалка) (тип 2).

Материал образцов - сталь 30ХГСА, толщина 2 мм, швы стыковые и угловые. Режимы сварки представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Режимы сварки					
Вид соединения	Диаметр присадочной проволоки, мм	Род тока	Сила тока, А	Напряжение, В	Расход аргона, л/мин
стыковое	2	постоянный, прямой полярности	55	12	7
угловое					

Микротвердость образцов определяли по Виккерсу. На рисунке 1 представлены схемы расположения точек замеров микротвердости в случаях стыкового и углового швов [4]. На рисунках 2 и 3 представлены результаты замеров микротвердости стыковых и угловых образцов [5].

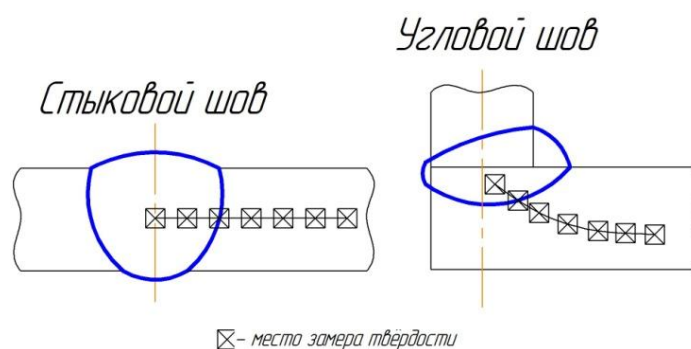


Рис. 1. Схема замеров микротвердости

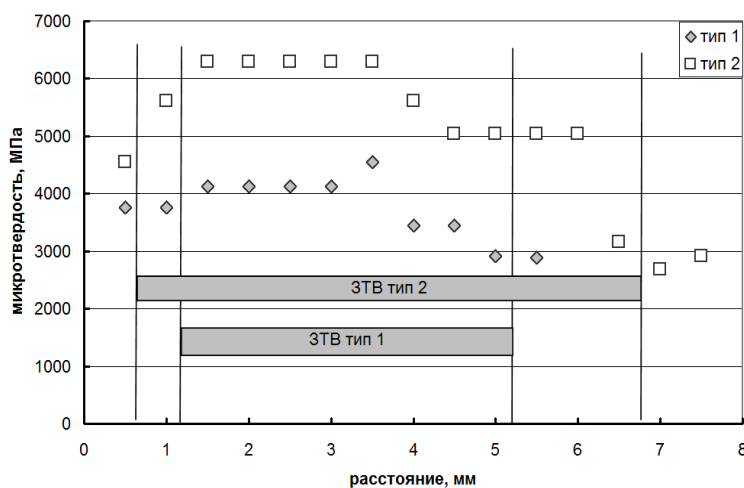


Рис. 2. Результаты замеров микротвердости стыковых образцов

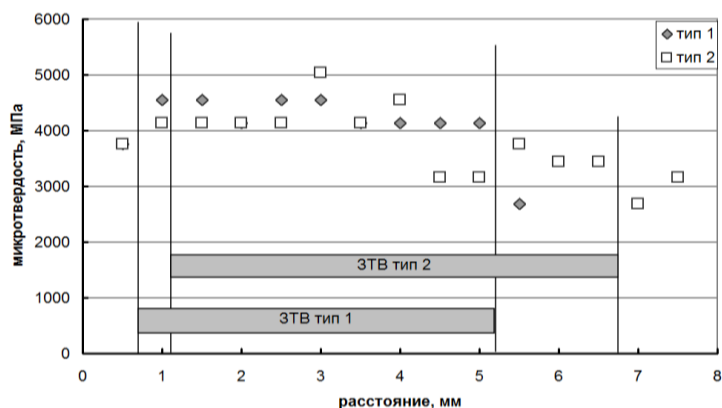


Рис. 3. Результаты замеров микротвердости угловых образцов

Микротвердость в ЗТВ у образцов обоих типов при выполнении углового шва и у образцов 1-го типа при выполнении стыкового шва практически одинакова. Характер распределения микротвердости в угловых образцах более плавный, чем в случае стыковых образцов [5].

Для оценки прочностных свойств сварных образцов 1-го и 2-го типов выполняли испытания на одноосное растяжение. Испытания выполняли на основании ГОСТ 11701 – 84 «Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент». Для испытаний выбрали образец XIII (рис. 4) [1].

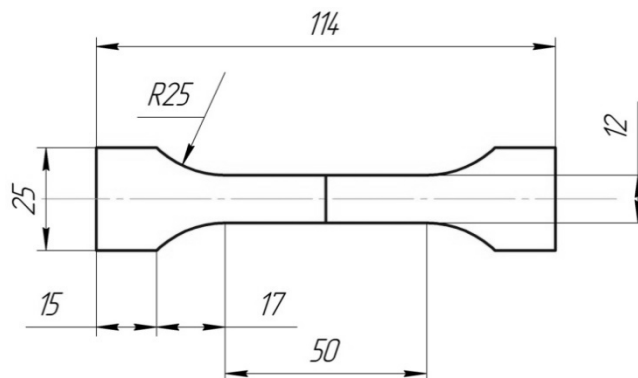


Рис. 4. Образец XIII для испытаний на статическое растяжение

Требования, предъявляемые ГОСТ 11701-84 рассматривали как минимальные. Диапазон нагрузок выбирали таким образом, чтобы силы сопротивления образца деформации, по которым определены прочностные характеристики, были не меньше 0,1 шкалы выбранного диапазона и не ниже 0,04 предельной нагрузки испытательной машины.

Материал образцов - сталь 30ХГСА, толщина 2 мм, швы стыковые. Сварные соединения выполнялись аргодуговой сваркой неплавящимся электродом. Режимы сварки представлены в таблице 1.

Результаты испытаний сварных образцов на одноосное растяжение приведены в таблице 2. Так же, для сравнения, в таблице 2 приведены данные испытаний основного материала в состоянии поставки.

Результаты испытаний на одноосное растяжение

Тип образца / № образца	Предел прочности, полученный экспериментальным путем, МПа	Предел прочности материала в состоянии поставки, МПа	Нагрузка, кг
1/1	588,4	608	915
1/2	594,3	627,6	884
2/3	1004,2	1098,3	1893
2/4	941,4	1108,2	1775

Результаты механических испытаний образцов показали, что:

- разрушение образцов происходит по границе зоны сплавления,
- прочность сварного соединения остается на достаточно высоком уровне [5].

Вывод: при изготовлении сварных тонколистовых изделий сложной геометрии из среднелегированных сталей для получения высоких прочностных характеристик необходимо сначала выполнение термической обработки отдельных деталей, затем сварка и отпуск для снятия внутренних напряжений.

### Список литературы

- [1] ГОСТ 11701 – 84 «Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент»
- [2] Журавлев В.Н., Николаев О.И. Машиностроительные стали: Справочник, М.: Машиностроение, 1992 – 480 с.
- [3] Кухто А.В., Чернова Т.Г. «Особенности изготовления сварных тонкостенных изделий из стали 30ХГСА», Успехи современной науки, №4, т.5, 2017 - 245 с.
- [4] Николаев О.С. Прочность металлов: Новые методы определения, Либроком, 2009 – 288 с. ISBN: 978-5-397-00780-1
- [5] Чернова Т.Г., Головачева Ю.Г., Кухто А.В. «Исследование структуры зоны термического влияния и прочностных свойств сварных соединений из стали 30ХГСА», Успехи современной науки, №12, т.1, 2018 – 210 с.

**Чернова Татьяна Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru

**Кухто Алексей Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: codesastartes@gmail.com

В.С. Меньшиков, В.А. Дубровский, А.Ю. Амеличева

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКИ ПРОВОЛОКОЙ СВ-08Г2С ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время на машиностроительных и ремонтных предприятиях одной из наиболее важных задач является продление срока службы имеющейся техники, что прежде всего связано с выполнением работ по восстановлению различных деталей и изделий машин и механизмов. Согласно данным многочисленных исследований и справочной литературы в области ремонта [1, 2], до 75...80 % изделий разного рода техники можно реставрировать. Также очень важно стремиться к повышению производительности и снижению затрат на ремонтные операции.

По данным ООО «НПП «Велд», наиболее часто при ремонте изделий применяются материалы, которые в процессе наварки позволяют получить высокую твердость восстанавливаемых поверхностей ( $HRC \geq 50$ ). На их долю приходится до 70-75% восстановленных изделий. Однако в некоторых случаях использование таких проволок не представляется целесообразным, так как их применение не позволяет обеспечить заданные технологические свойства наружных поверхностей восстанавливаемых изделий. Некоторые из восстановленных на ООО «НПП «Велд» деталей, не требующих применения вышеперечисленных проволок, такие как коленчатые валы машин ЗИЛ-130 и Т-150 (посадочное место под уплотняющий сальник, рис. 1 а), цапфы троллейбусов (посадочные места подшипников качения, рис. 1 б), или промежуточные оси грузовых автомобилей (рис. 1 в) представлены на рис. 1.



а)



б)



в)

Рис. 1. Детали машин, восстановленные с применением ЭКН сварочной проволоки Св-08Г2С

Представленные на рисунке детали отличаются по условиям эксплуатации, но объединены общим техническим требованием, связанным с обеспечением заданной твердости наружной поверхности в 240 – 300 НВ. Чаще всего это детали, работающие в условиях трения скольжения или неподвижные в процессе работы. Восстановление таких деталей, или их частей, с помощью материалов, создающих твердое покрытие, является нецелесообразным, по нескольким причинам - полученное покрытие плохо поддается последующей механической обработке (требует применения трудоемких шлифовальных операций), при работе на трение без смазки быстро приводит в негодность ответную деталь из мягкого материала. По этой причине, предприятие искало альтернативные способы и материалы для восстановления деталей с такими специфическими техническими требованиями.

Анализ литературных данных по используемым на предприятиях способам восстановления наружных поверхностей деталей позволил выделить три основные группы технологий, наиболее часто применяющихся для ремонта изделий в единичном и мелкосерийном производстве: различные технологии дуговой наплавки, напыления и ЭКН.

В процессе выбора путей восстановления деталей рассматриваемой номенклатуры изделий проводилась их наварка ЭКН проволоками Св-08А, Св-08Г2С и вязальной. В результате было установлено, что при использовании кремнемарганцевой проволоки твердость наружной поверхности несколько выше, чем при дуговой наплавке этой же проволокой.

Поэтому, было решено изучить технологические свойства наваренного металла, полученного после ЭКН сварочной проволокой Св-08Г2С наружных поверхностей в различных цилиндрических деталях типа «вал» и «втулка», изготовленных из стали 45 и ее аналогов. Из работ по ЭКН [3], где были определены технологические и допустимые интервалы изменения осадки проволоки для различных групп деталей, были выбраны допустимые интервалы для деталей, работающих в условиях трения скольжения, либо неподвижных, составляющие для наварки одной проволокой  $(50...55) \pm 2\% \leq \varepsilon \leq 80 \pm 2\%$ , а для наварки двумя проволоками  $(55...60) \pm 2\% \leq \varepsilon \leq 80 \pm 2\%$ . Остальные параметры наварки, согласно работе [4] должны составлять: скорость наварки ( $n=85/D$ ), усилие сжатия электродов  $P=1,5$  кН, время импульса  $t_u=0,1$  с и время паузы  $t_n=0,2$  с.

В процессе экспериментальных исследований изучали

- Прочность сцепления покрытия с основой
- Твердость покрытия
- Наличие или отсутствие дефектов в покрытии.

Для установления количественных значений прочности сцепления  $\sigma_{сц}$ , в зависимости от изменения осадки проволоки  $\varepsilon$  (режимов наварки) были проведены экспериментальные исследования. На наружные поверхности образцов из стали 45 наваривали сварочную проволоку Св-08Г2С диаметром 2 мм с осадкой  $\varepsilon$ , варьировавшейся от 50 до ~85% и испытывали на отрыв.

Испытания прочности сцепления проводились на установке МИ - 40У. Их результаты представлены на рисунке 2.

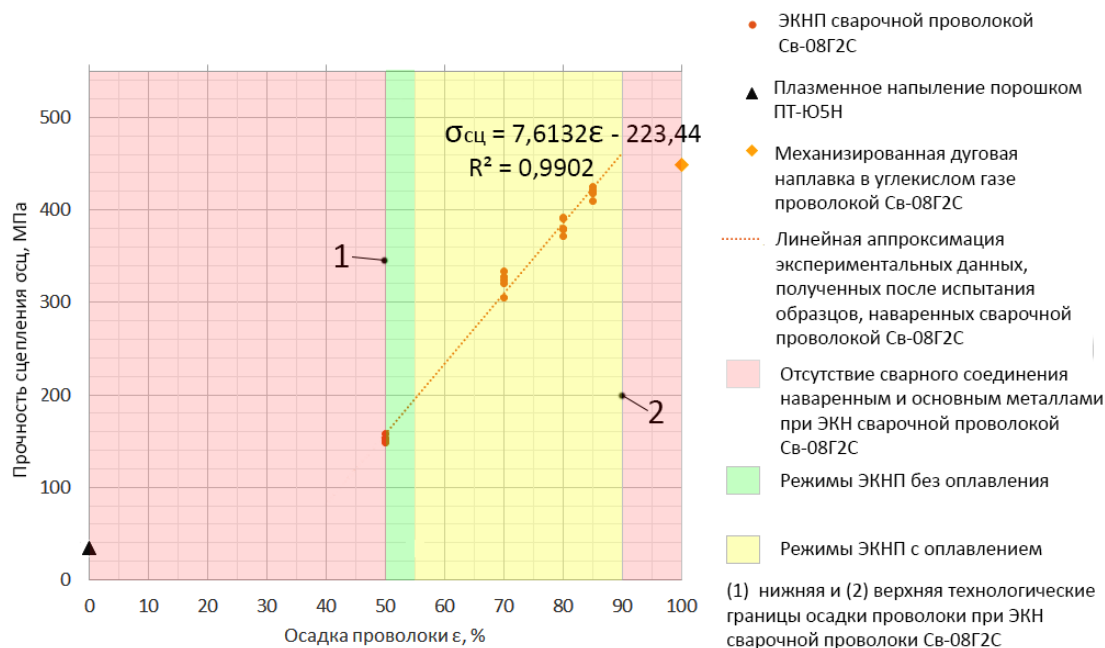


Рис. 2. Изменение прочности сцепления  $\sigma_{сц}$  в зависимости от осадки  $\varepsilon$  сварочной проволоки Св-08Г2С с основным металлом из стали 45. (1) и (2) - верхняя и нижняя технологические границы осадки проволоки [2]

На рис. 2, для сравнения, приведены результаты испытания прочности сцепления  $\sigma_{сц}$  для образцов после напыления порошком ПТ-Ю5Н без последующего оплавления и механизированной дуговой наплавки в углекислом газе сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм.

Прочности сцепления  $\sigma_{сц}$  при плазменном напылении порошком ПТ-Ю5Н без оплавления и дуговой механизированной наплавке сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм соответственно равны 33 МПа и 450 МПа, что близко к данным других исследователей [1, 5].

Таким образом, варьирование осадки сварочной проволоки Св-08Г2С в интервале  $50\% \leq \varepsilon \leq 85\%$  позволяет обеспечить прочность сцепления  $\sigma_{сц}$  при ЭКН, сопоставимую с прочностью сцепления  $\sigma_{сц}$  достигаемую при плазменном напылении с оплавлением, что считается достаточным для большинства деталей.

Для установления зависимости, количественных значений средней твердости наружной поверхности валика наваренного металла, от варьирования осадки  $\varepsilon$  сварочной проволоки Св-08Г2С при ЭКН были проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 45, результаты которых представлены на рис. 3.

Как видно, при увеличении осадки проволоки Св-08Г2С от 50 до 85% средняя твердость покрытия составляет 290НВ.



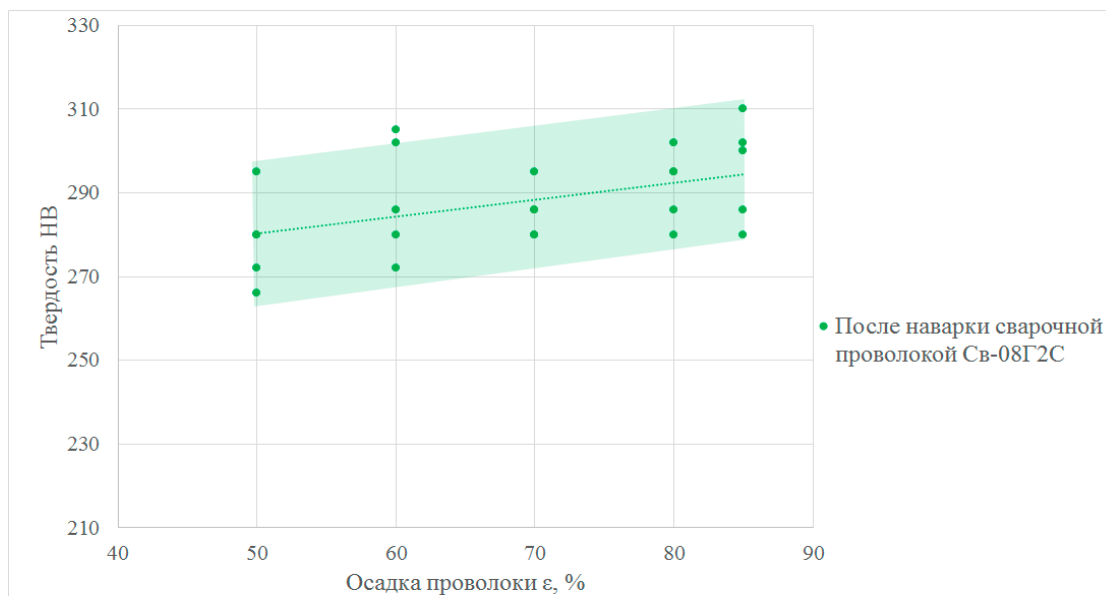


Рис. 3. Зависимость твердости покрытия, полученного проволокой Св-08Г2С, от осадки проволоки  $\epsilon$

Для выявления наличия дефектов в полученном покрытии были проведены исследования макрошлифов. Исследования проводились на шлифах образцов, с покрытием, наваренным во всем диапазоне осадок проволоки, на рис. 4 а, б приведены образцы, наваренные на наименьшем и наибольшем значениях осадок - 50 и 85% соответственно.

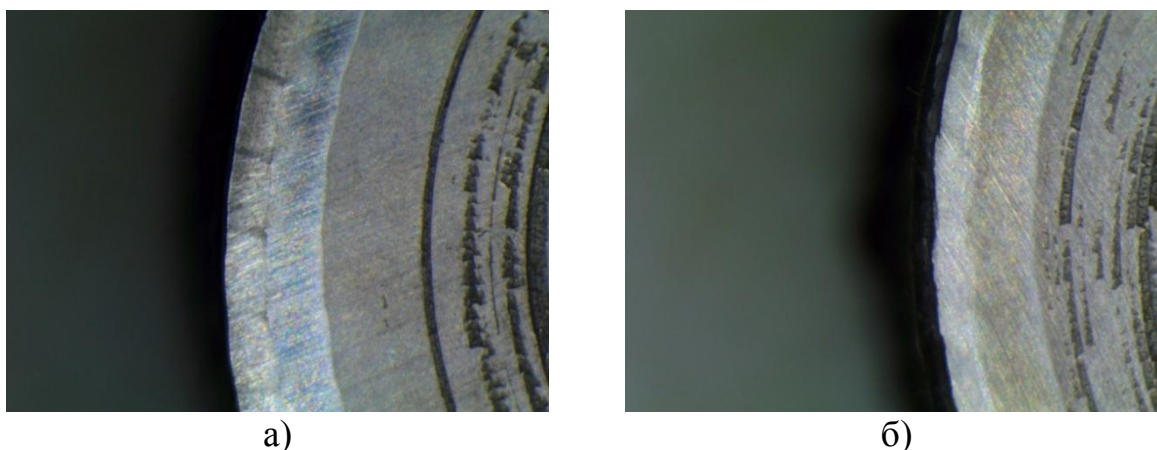


Рис. 4. Макрошлифы образцов- валов с наваренным проволокой Св-08Г2С покрытием. Увеличение  $\times 20$ . а) наварка с  $\epsilon = 50\%$ ; б)  $\epsilon = 85\%$

Дефектов, в виде пор, раковин и трещин при ЭКН образцов в интервале осадки проволоки  $50\% \leq \epsilon \leq 85\%$  на макрошлифах не обнаружено.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что в наваренном ЭКН сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 2мм покрытия обеспечиваются технологические свойства покрытия, достаточные для восстановления деталей, работающих в условиях трения скольжения, либо неподвижных. Достаточность прочности сцепления покрытия с



основой и твердости поверхности устанавливалась согласно литературным данным, путем сравнения с рекомендуемыми способами восстановления подобных деталей (напыление с оплавлением, дуговая наплавка) [1, 5], а также по критерию удовлетворения требованиям чертежей деталей (требуемая твердость поверхности в пределах 240-300 *HВ*).

### Список литературы

[1] Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.

[2] Черноиванов В.И., Голубев И.Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.

[3] Дубровский В.А., Амеличева А.Ю., Потапов А.В., Зезюля В.В., Зыбин И.Н. Технологические и допустимые интервалы изменения осадки проволоки при электроконтактной наварке различных групп деталей. // Сварка и диагностика. 2017. №5. С. 43 – 50.

[4] Дубровский В.А. Создание технологий и оборудования электроконтактной наварки проволокой оплавлением: дисс. д-р. техн. наук: 05.03.06. М., 2006. 217 с.

[5] Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. - М.: Машиностроение, 2004. Т. 2/Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, А.И. Акулов и др. - 490 с.

**Меньшиков Вячеслав Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Vyacheslav.menshikov@inbox.ru

**Дубровский Владимир Анатольевич** – д-р техн. наук, директор ООО "НПП Велд". E-mail: nppveld@yandex.ru

**Амеличева Анна Юрьевна** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aallkko@gmail.com

Д.А. Мельников, В.В. Булычев, Д.А. Ткачев

## **РЕМОНТНАЯ СВАРКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЧУГУННОГО ЛИТЬЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Значительная доля корпусных деталей изготавливается литьем из различных чугунов. В отливках могут образовываться как исправимые, так и неисправимые дефекты. К исправимым дефектам относятся, в частности, поверхностные раковины, пористости, трещины. Ликвидация данных дефектов позволяет повысить технико-экономическую эффективность машиностроительного производства. Одним из наиболее распространенных способов устранения указанных дефектов является их дуговая заварка [1,2]. Однако сложность применения сварочных технологий связана с образованием в наплавленном металле или околошовной зоне холодных трещин. Холодные трещины образуются в связи с возникающими в зоне сварки напряжениями растяжениями и неспособностью релаксации данных напряжений из-за повышенной хрупкости возникающих структур [3]. С целью предотвращения холодных трещин большинство технологий ремонтной сварки чугуна предусматривает наличие той или иной степени предварительного подогрева [1]. Однако применение данного технологического приема повышает энергоемкость ремонтной технологии, может привести к возникновению остаточных напряжений и деформаций.

Для предупреждения образования холодных трещин используют также проковку швов [1]. Сварной шов проковывают во время его остывания при температурах выше 450°C или ниже 150°C. При температурах 200-400°C проковку не выполняют из-за повышенного риска образования надрывов. Наличие данных температурных диапазонов ограничивает технологические возможности данной технологии. Кроме того, при заварке небольших дефектов на массивных деталях из-за больших скоростей охлаждения затруднительно определить моменты времени нахождения наплавленного металла в данных температурных интервалах. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых, лишенных указанных недостатков, способов ремонта с помощью сварки небольших поверхностных дефектов чугунных деталей.

Примем во внимание, что одной из причин возникновения холодных трещин является возникновение в зоне сварки растягивающих напряжений. Данные напряжений можно уменьшить за счет формирования в зоне выполнения заварки поля сжимающих напряжений. Известным технологическим приемом формирования сжимающих напряжений является обработка поверхностно-пластическим деформированием (ППД) [5]. Таким образом, выполнив предварительную обработку ППД области металла, под-

лежащей заварки, можно снизить уровень сварочных растягивающих напряжений и, тем самым, предотвратить появление холодных трещин. Необходимым условием реализации данной технологии является условие, чтобы размеры области формирования предварительных сжимающих напряжений превышала размеры области возникновения сварочных растягивающих напряжений.

Примем допущение, что время горения дуги достаточно мало, что оправдано при небольших объемах заварки точечных дефектов. Это дает возможность схематизировать тепловой источник в качестве мгновенно действующего. Введенное в тело тепловая энергия  $Q$  составит:

$$Q = \mu IU t_{cv} \quad (1)$$

где  $\mu$  – термический к.п.д. процесса дуговой сварки;  $I$ ,  $U$  – сила тока и напряжение на дуге;  $t_{cv}$  – продолжительность горения дуги.

С учетом принятых допущений распределение температур описывается известной зависимостью [4]:

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\gamma(4\pi at)^{\frac{3}{2}}} \cdot e^{-\frac{R^2}{4at}} \quad (2)$$

где  $T(R, t)$  – температура;  $t$  – время;  $c$  – удельная теплоемкость тела;  $\gamma$  – плотность тела;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Из (2) найдем радиус  $R_1$ , соответствующий температуре  $T_1$ :

$$R_1 = \sqrt{-4at \ln \frac{T_1 c \gamma (4\pi at)^{1.5}}{2Q}} \quad (3)$$

Данную температуру примем за минимальную температуру, приводящую к возникновению сварочных растягивающих напряжений. В первом приближении положим  $T_1 = 600^\circ\text{C}$ .

С увеличением  $t$  свыше определенного значения, множитель  $\ln \frac{T_1 c \gamma (4\pi at)^{1.5}}{2Q}$  станет больше нуля и выражение (3) потеряет физический смысл. Данное значение  $t$  соответствует моменту времени, когда за счет теплопроводности все точки нагреваемого тела остыли до температур ниже  $T_1$ .

Глубину формирования напряжений сжатия при наклепе найдем из следующей зависимости [5]:

$$\Delta_h = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P_H}{2\sigma_T}} \quad (4)$$

где  $m = 1 + 0,07r$ ,  $r$  – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей;  $P_H$  – нормальная сила;  $\sigma_T$  – предел текучести.

Для компенсации влияния растягивающих напряжений необходимо, чтобы глубина наклепа  $\Delta_h$  была больше расстояния  $R_1$ , на котором образуются остаточные растягивающие напряжения:

$$\Delta_h > R_1 \quad (5)$$

С учетом зависимостей (1-5) получим следующую систему неравенств:

$$\begin{cases} P_H > -8m^2\sigma_m at \ln \frac{T_1 c \gamma (4\pi at)^{1,5}}{2\mu I U t_{св}} \\ \frac{T_1 c \gamma (4\pi at)^{1,5}}{2\mu I U t_{св}} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

Время  $t$  в выражении (6), следует найти из (3) из условия достижения наибольшего значения  $R_1$  для заданной температуры  $T_1$ . Система неравенств (5) позволяет определить совокупность таких параметров предложенной ремонтной технологии сварки, как мощность и продолжительность горения дуги, давления обработки ППД.

### Список литературы

- [1] *Воловик Е.Л.* Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
- [2] СТ ЦКБА 089-2010. Арматура трубопроводная. Заварка дефектов отливок. Технические требования. – Санкт-Петербург: ЗАО «НПФ «ЦКБА», 2010. – 85 с.
- [3] *Макаров Э.Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. / Э.Л. Макаров – М.: Машиностроение, 1981 – 247 с.
- [4] Теория сварочных процессов. / Под ред. В.М. Неровного – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007 – 752 с.
- [5] *Папшев Д.Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. / Д.Д. Папшев – М.: Машиностроение, 1978 – 152 с.

**Мельников Дмитрий Алексеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmitriymelnikov1407@gmail.com

**Булычев Всеволод Валерьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры "Соппротивление материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kmk-mgtu@mail.ru

**Ткачев Дмитрий Анатольевич** – ассистент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru

М.С. Козлова

## **СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ИЗГОТОВЛЕНИЮ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В ряде важных современных производств используются высокие рабочие давление и температура. Наиболее часто с такими параметрами сталкиваются в отрасли химической промышленности, откуда и возникает необходимость создания сосудов, устойчивых к критическим значениям давления и температуры. При проектировании таких аппаратов необходимо уделить особое внимание качеству элементов сосуда, которые воспринимают основные барометрические и термические нагрузки [1].

В зависимости от назначения и особенностей изготовления сосудов различают сосуды с монолитной стальной стенкой, запас прочности которых прямо пропорционален толщине, применяемого металла, а также многослойные сосуды, которые в сравнении с первыми являются более устойчивыми к разрывающим нагрузкам, за счет своей конструктивной особенности.

Если поместить друг на друга в нагретом состоянии плотно пригнанные стальные цилиндрические оболочки, то после их охлаждения получится цилиндр. Такой сосуд способен выдерживать большее давление, чем сплошной стальной цилиндр таких же размеров. Многослойная стенка по сравнению с монолитной обладает большим запасом пластичности и деформируемости.

Многослойные сосуды высокого давления изготавливаются из листовой и рулонной сталей [2]. Они используются в качестве корпуса теплообменников, сепараторов, автоклавов и другой аппаратуры в химической промышленности благодаря целому ряду преимуществ [3]:

- Многослойные сосуды высокого давления более экономичны ввиду меньших потерь металла при изготовлении и меньшей трудоемкости;
- Процесс их изготовления исключает трудоемкую и дорогостоящую термообработку сварных швов;
- Обладают высокой степенью безопасности благодаря наличию контрольных отверстий в многослойной стенке, которые позволяют своевременно обнаружить утечки рабочей среды и остановить процесс работы сосуда для проведения ремонтных работ;
- Возникающие в процессе работы сосуда дефекты локализуются в одном слое и не развиваются на всю толщину стенки;
- Данный тип конструкции обеспечивает коррозионную защиту внутренней поверхности сосуда.
- Обладают более высокой степенью устойчивости к нагрузкам при меньшей толщине стенок, в сравнении с монолитными.

Устройство дренажных отверстий в стенке обеспечивает удаление диффундирующего водорода и позволяет осуществлять контроль за состоянием внутреннего слоя.

Также стальные сосуды сверхвысокого давления помещают внутрь других, больших по размеру сосудов, в которых создают давление, накачивая в них жидкость. Разрыву стенок внутреннего сосуда под действием создаваемого в нем давления противодействует не только сопротивление самих этих стенок, но и давление жидкости, находящейся во внешнем сосуде.

Оболочки межступенчатых отсеков баллистических ракет подводного старта подвергаются целому комплексу эксплуатационных нагрузок: растяжение, сдвиг, изгиб, кручение, сжатие (от наружного давления и осевой сжимающей силы). Для повышения жесткости оболочки можно увеличить ее толщину, но это приводит к увеличению ее массы. Более эффективным решением является применение трехслойных оболочек [4].

**Выводы.** Способ изготовления многослойных сосудов является наиболее технологичным и экономичным. При этом уменьшается общая толщина изделия, а соответственно, и масса. По сравнению с монолитными стенками сосудов, многослойные имеют достаточно высокую сопротивляемость и жесткость стенок в сочетании с большим запасом пластичности и деформируемости.

#### Список литературы

[1] Рундыгин Ю.А., Гильде Е.А., Судаков А.В., Амосов Н.Т. *Котельные установки. Т. IV-18*. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.

[2] ГОСТ Р 54803-2011. *Сосуды стальные сварные высокого давления*. М.: Стандартинформ, 2014. 78 с.

[3] Хисматулин Е.Р., Королев Е.М., Лившиц В.И. *Сосуды и трубопроводы высокого давления. Справочник*. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.

[4] Лаврова Л.Н. *Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе*. М.: Машиностроение, 1993. 71 с.

**Козлова Мария Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: mariya.kozlova2013@yandex.ru

А.Е. Денисов, Т.Г. Чернова

## СПОСОБЫ ЗАВАРКИ ТРЕЩИН В ДЕТАЛЯХ ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Основными причинами выхода из строя механического оборудования является износ и поломки. Детали, получившие поломку или локальные трещины, приводят в исправное состояние с помощью ремонтной сварки.

Одной из трудностей при выполнении ремонтной сварки является то, что сварка ведется по поврежденному металлу и это приводит к появлению горячих и холодных трещин. Эти повреждения могут иметь вид пластических деформаций, структурных превращений от старения металла, дефектов литья [1].

В статье рассматриваются способы заварки трещин, образующихся в процессе эксплуатации на примере крыльчатки первого каскада компрессора газотурбинного двигателя (рис. 1). Крыльчатка изготовлена методом точного литья из сплава ВНЛ-5. В литературе и справочниках он также обозначается 13X11H5M5Л. Сплав применяется для изготовления фасонных отливок для авиационной промышленности [3].

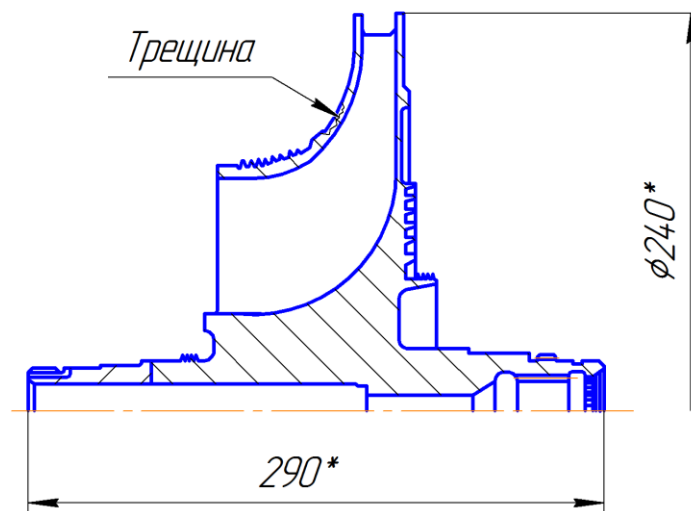


Рис. 1. Эскиз крыльчатки с трещиной на покрывающем диске

Целью исследований, изложенных в данной статье, является изучение особенностей ремонтной сварки деталей из сталей аустенитно-мартенситного класса и способов заварки трещин на этих деталях, которые обеспечат наименьшие остаточные напряжения и позволят сохранить работоспособность узла без необходимости полной замены дефектной детали. Исходя из конструктивных особенностей крыльчатки, заварка трещин должна выполняться таким образом, чтобы после нее не требовалась тер-

мическая обработка, восстанавливающая механические свойства, так как последняя приведет к нарушению геометрии детали. Допускается только отпуск детали для снятия сварочных напряжений [2].

**Структура и свойства аустенитно-мартенситных сталей.** К аустенитно-мартенситному классу сталей в соответствии с ГОСТ 5632–72 относятся стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменить в широких пределах. К этому классу относятся стали, химический состав которых выбран с соотношением легирующих элементов, обеспечивающих начало мартенситного превращения при 20–60 °С.

Аустенитно-мартенситные стали – это стали так называемого переходного класса. В этих сталях при охлаждении на воздухе обычно образуется некоторое количество мартенсита (рис. 2). К этому же классу относятся и те стали, аустенит которых при охлаждении до комнатной температуры, хотя и не дает признаков  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, но все же неустойчив, так как при обработке холодом или под действием пластической деформации он превращается в мартенсит [3].

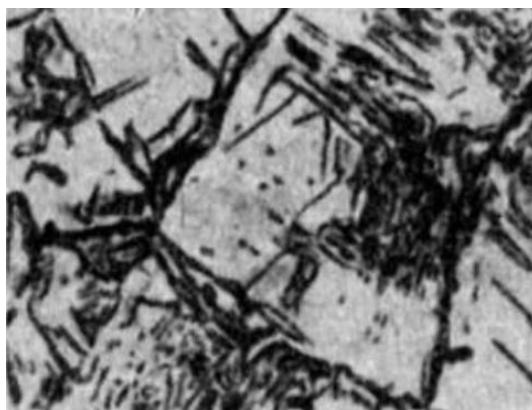


Рис. 2. Микроструктура (Аустенит + Мартенсит)

Высокопрочные коррозионностойкие стали мартенситно-старееющего и аустенитно-мартенситного классов [13X11H5M5Л (ВНЛ-5), 03X12H5M6K13Л (ВНЛ-8) и др.] обладают высокой трещиностойкостью, но значительно разупрочняются при сварке без последующей термической обработки. Кроме того, при сварке этих сталей в зоне шва образуется крупнозернистая направленная структура, устойчивая к проведению термической обработки и приводящая к появлению дендритного излома и снижению пластических свойств [1].

ВНЛ-5 – это высокопрочная коррозионностойкая сталь аустенитно-мартенситного класса. Она обладает высокой трещиностойкостью, но значительно разупрочняется при сварке без последующей термической обработки. Кроме того, при сварке этой стали в зоне шва образуется крупнозернистая направленная структура, устойчивая к проведению термической обработки и приводящая к появлению дендритного излома и снижению пластических свойств [3].



Применение современной технологии и сварочных материалов позволяет получить соединения с механическими свойствами, равноценными свойствам литейных сталей.

Крыльчатка при изготовлении проходит полный цикл упрочняющей термической обработки – нагрев, выдержка, охлаждение (закалка I), нагрев, выдержка, охлаждение (закалка II), обработка холодом при температуре -70 градусов Цельсия, отпуск при температуре 500 градусов с охлаждением на воздухе. После данного цикла термообработки сплав имеет структуру мартенсит + 10% аустенита (рис. 3).



Рис. 3. Структура сплава ВНЛ-5 (увеличение x150)

После сварки сталей, прошедших полный цикл упрочняющей термообработки и имеющих благодаря этому мартенситную структуру, наблюдается широкая зона, имеющая после высокотемпературного нагрева структуру аустенита. Ширина зоны определяется температурой обратного мартенситного превращения металла (650-750 °С). Одновременно в интервале температур 550-900 °С происходит интенсивное выделение карбидов, особенно по границам аустенитных зерен. Кроме того, в узкой зоне, прилегающей к поверхности сплавления, наблюдается образование некоторого количества  $\delta$ -феррита. Структурные превращения в зоне термического влияния приводят к снижению пластичности и ударной вязкости металла, а также его чувствительности к концентраторам напряжений [1].

Обратное мартенситное превращение в ЗТВ и ограниченный объем последующего мартенситного превращения при охлаждении до комнатной температуры исключает при сварке сталей этого класса образование холодных трещин. Так как технические условия на выполнение ремонтной сварки исключают термическую обработку, будет выполнен только отпуск для снятия внутренних напряжений.

**Свойства сварных соединений и технология сварки.** Сварные соединения стали аустенитно-мартенситного класса целесообразно выполнять аргонодуговой сваркой без присадки (тонколистовые детали, толщина от 3 до 6 мм) либо с присадкой перечисленными ниже материалами, а также контактной точечной и роликовой сваркой и электронно-лучевой сваркой. В случае сварки соединений, для которых отсутствует требование равнопрочности, допускается ручная электродуговая сварка электродами,

дающими аустенитный наплавленный металл, либо механизированная сварка под слоем флюса марки АН-26С по ГОСТ 9087-81 либо марки 48-ОФ-6 по ОСТ 5.9206-76 [1].

Выбор присадочного материала осуществляют, исходя из требований прочности сварного соединения. В случае отсутствия требований высокой прочности к швам в качестве присадочной можно рекомендовать аустенитную проволоку СВ-01Х19Н18Г10АМ4 (ТУ 14-1-1892-71) либо Св-08Х21Н10Г6 (ГОСТ 2246-70), обладающие хорошей стойкостью против образования горячих трещин и высокими прочностью и пластичностью в широком интервале температур [1].

При наличии требований высокой прочности сварных соединений рекомендуются к применению аустенитно-мартенситные проволоки СВ-07Х16Н6, Св-08Х17Н5МЗ, Св-09Х15Н9Ю (ТУ 14-1-997-74), СВ-01Х12Н11М2ТС (ТУ 14-1-3482-82). Прочность сварных соединений, сваренных аустенитной присадочной проволокой, выше прочности самой присадки. Это объясняется стеснением деформации металла шва из-за более высокой прочности основного металла. Такой эффект по мере увеличения ширины шва и зоны с аустенитной структурой уменьшается [1, 3].

В рассматриваемом случае толщина покрывающего диска крыльчатки варьируется от 4 до 6 мм. Необходимо произвести заварку разделанной трещины, не допуская сквозного проплавления. Так как производство является единичным, целесообразно применить ручную дуговую сварку неплавящимся электродом в среде инертного газа. В качестве присадочного материала используется проволока Св-08Х17Н5МЗ.

Режим сварки выбирают, исходя из способа сварки, толщины свариваемого материала, диаметра сварочной проволоки и других параметров. Для способа ручной дуговой сварки неплавящимся электродом режим сварки следует подбирать исходя из данных таблицы 1.

Таблица 1

Ориентировочные режимы сварки высоколегированных сталей аустенитно-мартенситного класса [1]

Способ сварки	Толщина свариваемого металла	Число проходов	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Ручная дуговая неплавящимся электродом в инертном газе	2-6	1-2	1,6-2,0	50-80	10-11	-	6-8
	6-12	2-6	2,0-3,0	80-120	10-11	-	8-10
	12-20	6-16	2,0-3,0	120-200	11-12	-	10-12

### Список литературы

[1] Волченко В. Н. *Сварка и свариваемые материалы. Том 1. Свариваемость материалов* - М.:Металлургия, 1991

[2] Петухов А.Н. *Сопротивление усталости деталей ГТД.* - М.:Машиностроение, 1993

[3] Братухин А. Г., Лукин В. И., Лазько В. Е. *Особенности изготовления литосварных конструкций из высокопрочных сталей* – Сварочное производство, 1993 г, №4

**Денисов Антон Евгеньевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: stealth54@yandex.ru

**Чернова Татьяна Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии сварки» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.ru

## **СЕКЦИЯ 3.**

# **ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

В.В. Андреев, С.В. Рыжов

## ДВУХКАСКАДНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Операционный усилитель (ОУ) является базовым блоком множества аналоговых схем, включая фильтры на переключаемых конденсаторах, АЦП, источники опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния и т.п. Обычно ОУ имеют два и более каскада усиления, для обеспечения высокого коэффициента усиления. ОУ находят широкое применение в источниках опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния, где они должны иметь простую конструкцию [1] и обладать большим коэффициентом усиления. В таких источниках опорного напряжения чаще всего применяют двухкаскадные ОУ, имеющие высокий коэффициент усиления, достаточную выходную мощность, низкий уровень шума и хорошую пропускную способность [1-3].

Данная работа посвящена проектированию простого КМОП операционного усилителя, выполненного в КМОП технологии с проектными нормами 0,6 мкм с большим коэффициентом усиления для применения в источнике опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния.

На рис. 1 показана электрическая схема разработанного двухкаскадного операционного усилителя, состоящего из двух каскадов усиления (дифференциального усилителя (ДУ) и выходного) и схемы смещения [1-3].

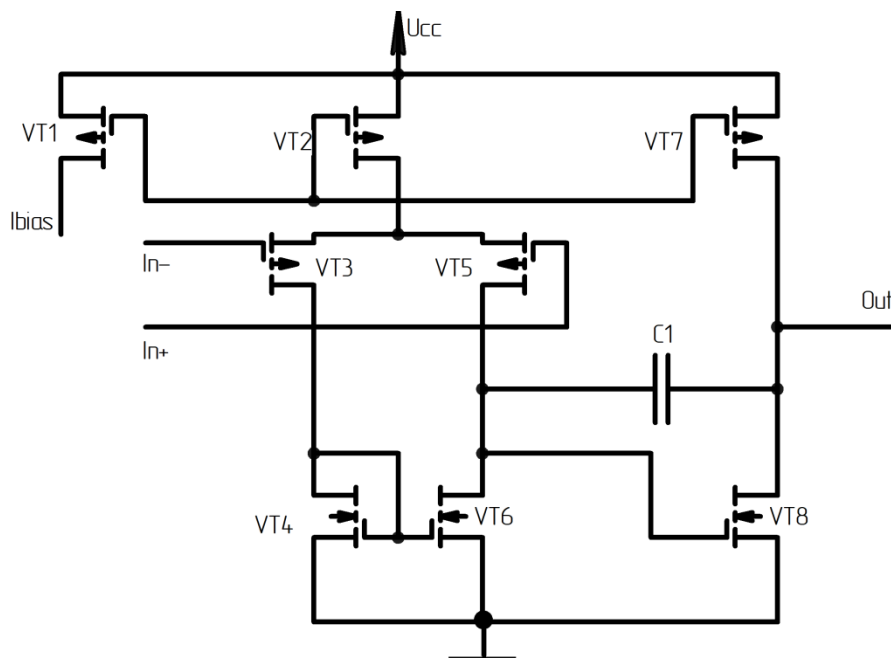


Рис. 1. Схема операционного усилителя

### **Дифференциальный усилитель:**

Дифференциальный усилитель состоит из транзисторов VT3, VT5, VT4, VT6 и представляет собой первый каскад, разработанного операционного усилителя (рис. 1). Транзисторы VT3, VT5 являются стандартными nМОП транзисторами, затворы которых реализуют входы дифференциального усилителя. Затвор транзистора VT3 является инвертирующим входом, а затвор транзистора VT5 – неинвертирующим. Транзисторы VT4, VT6 выполняют роль активной нагрузки.

#### **Схема смещения**

Схема смещения операционного усилителя сформирована на транзисторах VT1, VT2 и VT7, представляют собой схему токового зеркала. Данная схема обеспечивает заданный ток в ветвях дифференциального усилителя и выходного каскада. Управляется током  $I_{bias}$  (рис. 1).

#### **Выходной каскад**

Выходной буфер представляющий собой второй каскад операционного усиления (рис. 1) состоит из транзисторов VT6 и VT7, и является усилителем с общим истоком, который обеспечивает дополнительное усиление ОУ. На данный каскад поступает сигнал с выхода ДУ.

#### **Основные параметры операционного усилителя**

##### *Запас по фазе (phase margin)*

Запас по фазе на частоте единичного усиления в градусах, характеризует устойчивость ОУ.

##### *Полоса единичного усиления (UGB)*

Полоса единичного усиления – это весь диапазон частот, в которых операционный усилитель может проявлять усилительные свойства. Полосу единичного усиления называют также произведением усиления на полосу пропускания, и она служит показателем качества ОУ.

##### *Диапазон синфазного входного напряжения (ICMR)*

Интервал значений синфазного входного напряжения, в котором параметры дифференциального усилителя лежат в заданных пределах [1].

##### *Скорость нарастания (slew rate)*

Скорость нарастания выходного напряжения  $V_U$  вых характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах. Измеряется при подаче на вход ОУ ступенчатого сигнала. [2]

##### *Коэффициент подавления нестабильности питания (PSRR)*

Отношение изменения напряжения питания к вызванному им изменению напряжения смещения нуля ОУ.

##### *Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR)*

Отношение дифференциального и синфазного коэффициентов усиления.

##### *Напряжение смещения нуля ( $V_{bias}$ )*

Напряжение смещения нуля – это такое значение входного дифференциального напряжения, при котором напряжение на выходе операционного усилителя равно нулю.

### Результаты моделирования

Моделирование двухкаскадного операционного усилителя проводилось в САПР Cadence Virtuoso. Модели элементов, использованные в моделировании, основаны на элементах, получаемых в технологии 0,6 мкм [4].

На рисунке 2 представлен результат анализа устойчивости операционного усилителя. Анализа устойчивости (STB Analysis) позволяет определить запас по фазе (phase margin), коэффициент усиления (gain) и полосу единичного усиления (UGB) операционного усилителя.

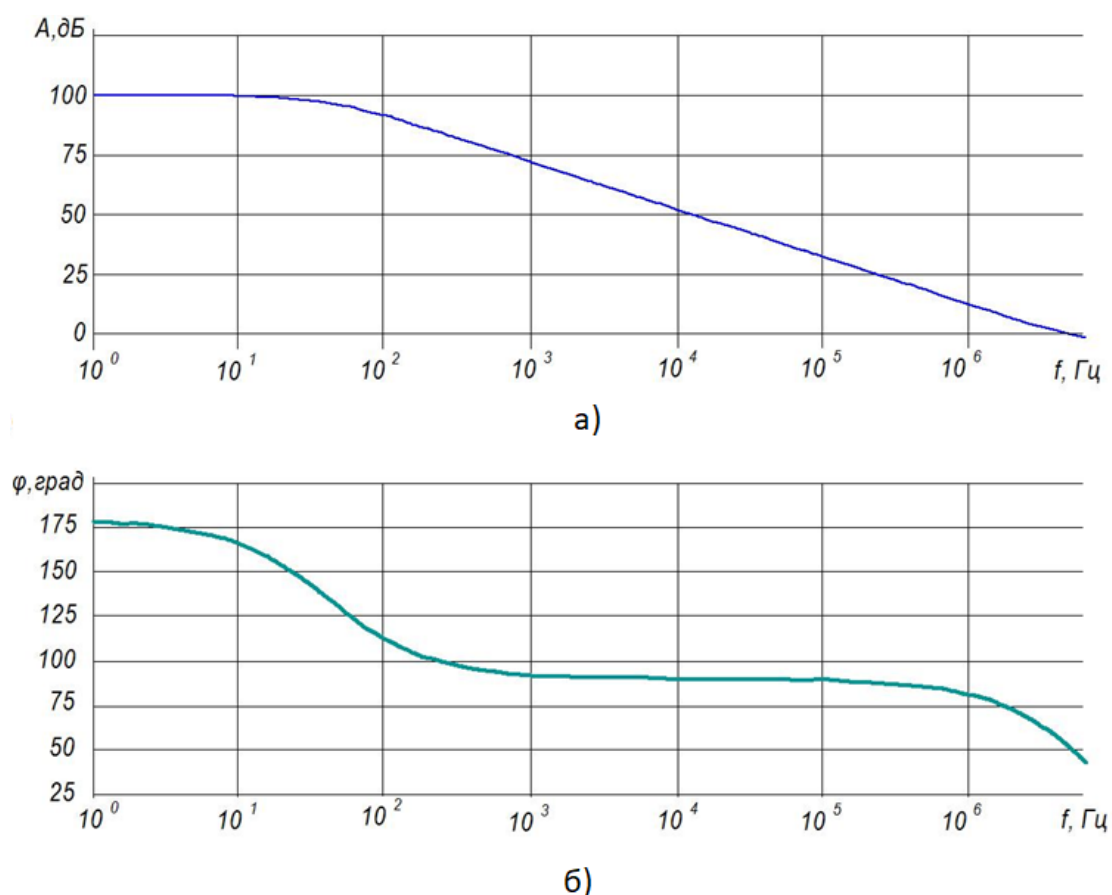


Рис. 2. Результаты анализа устойчивости:

а) Амплитудно-частотная характеристики; б) фазо-частотная характеристика

Как видно из рисунка 2 разработанная конструкция обеспечивает высокий коэффициент усиления, равный 100,20 дБ;  $UGB = 5,16$  МГц;  $Phase\ margin = 51,28^\circ$ . Параметры операционного усилителя, полученные в результате моделирования в САПР Cadence Virtuoso представлены в таблице 1.

Параметры разработанного ОУ

Параметр	Значение
Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR)	106,41дБ
Диапазон синфазного входного напряжения (ICMR)	ICMR <sub>Min</sub> = 998,6 мВ ICMR <sub>Max</sub> = 4,1 В
Коэффициент подавления нестабильности питания (PSRR)	49,74 дБ
Скорость нарастания (slew rate)	1.51 В/мкс
Запас по фазе (phase margin)	51,3 °
Коэффициент усиления (gain)	100,2 дБ
Полоса единичного усиления (UGB)	5,15 МГц
Напряжение смещения нуля (Vbias)	0.6 мВ

### Вывод

В данной работе был разработан двухкаскадный операционный усилитель, выполненный по КМОП технологии, с проектными нормами 0,6 мкм. Было проведено моделирование основных параметров операционного усилителя в САПР Cadence Virtuoso. Разработанный двухкаскадный операционный усилитель обеспечивает высокий коэффициент усиления, равный 100,2дБ и полосу единичного усиления 5,15 МГц.

### Список литературы

[1] Amana Yadav Design of Two-Stage CMOS Op-Amp and Analyze the Effect of Scaling // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) 2012 V. 2, Issue 5, P .647-654

[2] Ron Mancini Op Amps For Everyone. Texas Instruments, 2002, 464 p. URL: [http://web.mit.edu/6.101/www/reference/op\\_amps\\_everyone.pdf](http://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf). (Дата обращения 31.03.2018).

[3] Walt Jung Op Amp Applications Handbook. Analog Devices, 2005, 878 p. URL: <http://www.analog.com/en/education/education-library/op-amp-applications-handbook.html>. (Дата обращения 31.03.2018).

[4] Datasheet 0.6 um Process Family. URL: [https://www.xfab.com/fileadmin/X-FAB/Download\\_Center/Technology/Datasheet/XT06\\_Datasheet.pdf](https://www.xfab.com/fileadmin/X-FAB/Download_Center/Technology/Datasheet/XT06_Datasheet.pdf) (Дата обращения 1.04.2018).

**Андреев Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

**Рыжов Сергей Васильевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sergey.righov@gmail.com



И.В. Максимов, В.В. Андреев

## ЗАЩИТА МИКРОСХЕМ СЕРИИ 1564 ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Воздействие статического разряда КМОП ИС серии 1564, в большинстве случаев, приводит к повреждению внутренней структуры кристалла, в результате чего наблюдается ухудшение параметров микросхемы или полная потеря ее работоспособности. Наиболее уязвимым местом, микросхем данной серии, является тонкий подзатворный окисел внутрикристалльных структур, расположенных во входных цепях. Для повышения стойкости микросхем к воздействию статического разряда применяются цепи защиты, сформированные в полупроводниковом кристалле в непосредственной близости к контактным площадкам выводов микросхемы. Защиту от статического электричества в кристалле, обычно выполняют, с использованием элементов базового КМОП технологического процесса.[1].

В данной работе для КМОП ИС серии 1564 проводится исследование эффективности элементов защиты от статического электричества построенных на МОП-транзисторах с заземленным затвором и даются рекомендации по конструированию защитных цепей для микросхем данной серии.

Одной из важнейших характеристик защитной структуры является ее быстроедействие. На рис. 1 представлена типовая конфигурация схемы защиты с использованием n-МОП транзистора [2].

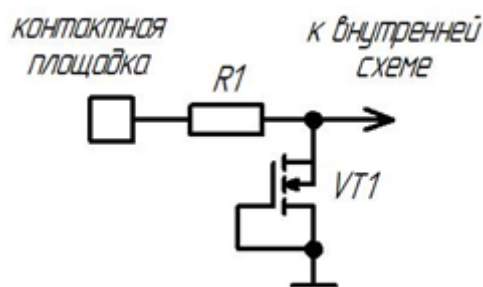


Рис. 1. Типовая защитная схема с использованием n-МОП транзистора

Из-за малых токов цепи «сток-исток» МОП транзистора такая структура сама по себе не способна выполнять защитную функцию. Основная защита от статического электричества в этой схеме обеспечивается «паразитными» элементами показанными на рис. 2[3].

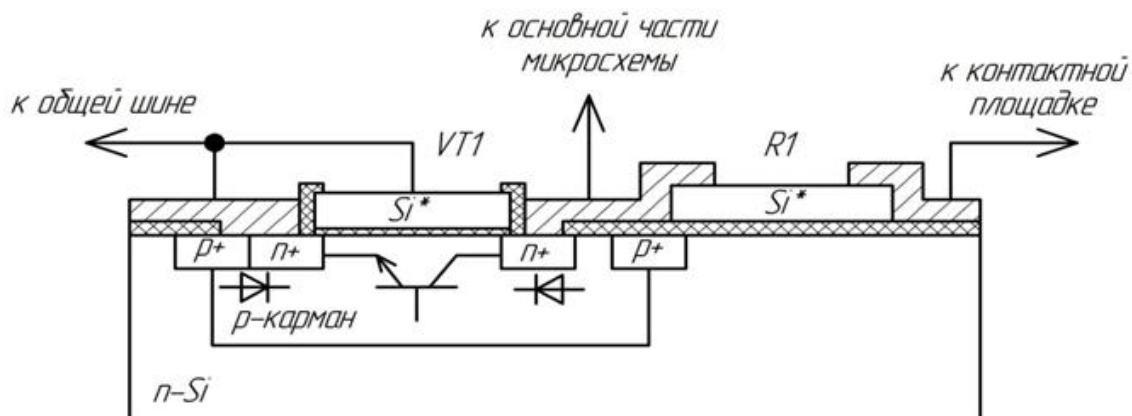


Рис. 2. Структурная схема защиты с использованием n-МОП транзистора

Эквивалентная схема защиты с использованием n-МОП транзистора представлена на рис. 3.

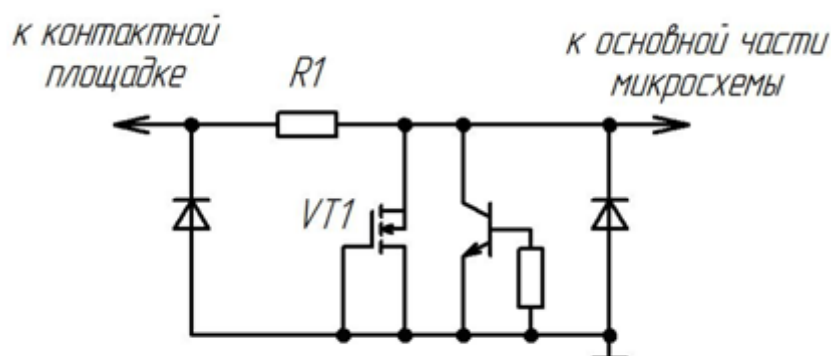


Рис. 3. Эквивалентная схема защиты с использованием n-МОП транзистора

При разрядном импульсе отрицательной полярности «паразитные» диоды шунтируют защитный МОП-транзистор и входную цепь. Импульс положительной полярности может вызвать пробой диодов, но в этом случае отпирается паразитный биполярный pnp-транзистор. Напряжение его открывания должно быть ниже напряжения пробоя диодов.

Длительное протекание большого тока через транзистор способно вызвать его разрушение, но этого не происходит из-за возникновения тиристорного эффекта, возникающего при большой плотности тока, вызванного наличием участка отрицательного сопротивления (рис. 4).

Этот эффект вызван образованием плазмы в полупроводнике, что может произойти в результате автоэлектронной эмиссии и ударной ионизации. Процесс установления тока в плазме относительно медленный и составляет около 3-4 нс и сопровождается сильным повышением температуры, при длительном протекании тока через область контакта между металлом и полупроводником. Если эта температура превысит критическую температуру сплава, например, алюминий кремний, происходит их взаим-

ное растворение и, как следствие, короткое замыкание перехода. Характер разрушений при этом точно такой же, как в классическом случае электростатического пробоя [4].

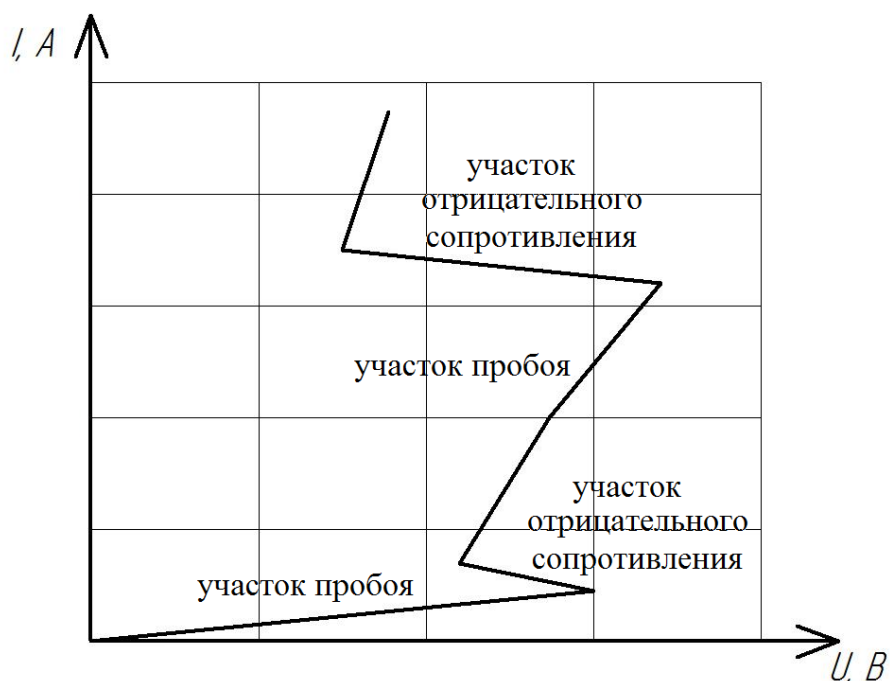


Рис. 4. ВАХ защиты с использованием n-МОП транзистора

Цепь защиты от статического электричества, построенная с использованием нормально закрытых МОП-транзисторов представлена на рис. 5.

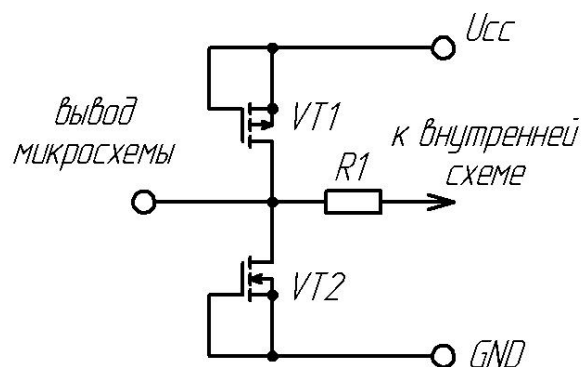


Рис. 5. Схема защиты от статического электричества на нормально закрытых МОП-транзисторах

Для ограничения тока при воздействии статического заряда в цепи защиты используется резистор R1. Сопротивление цепи защиты влияет на скорость работы микросхем, поэтому, для быстродействующих ИС, рекомендуется применять резисторы номиналом от 100 до 500 Ом.

Транзисторы в защитной цепи рассчитывают так, чтобы исключить возможность срабатывания защиты, при уровнях напряжения меньше предельно допустимого.

При конструировании микросхем серии 1564 с повышенной чувствительностью к статическому электричеству применяют двухуровневые схемы защиты, исключая попадание остаточных разрядных явлений к внутренним цепям (рис. 6).

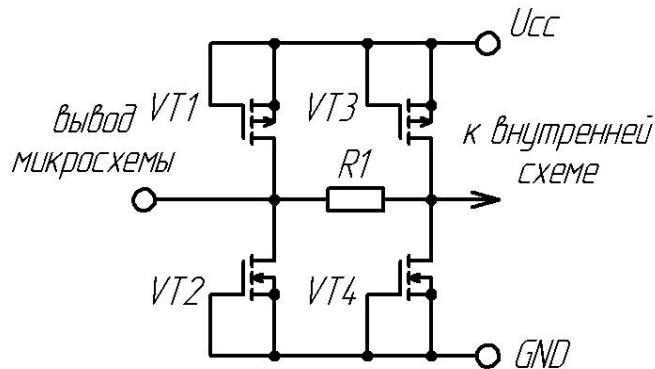


Рис. 6. Двухуровневая схема защиты от статического электричества на нормально закрытых МОП-транзисторах

Топология двухуровневой схемы защиты от статического электричества на нормально закрытых МОП-транзисторах представлена на рис. 7.

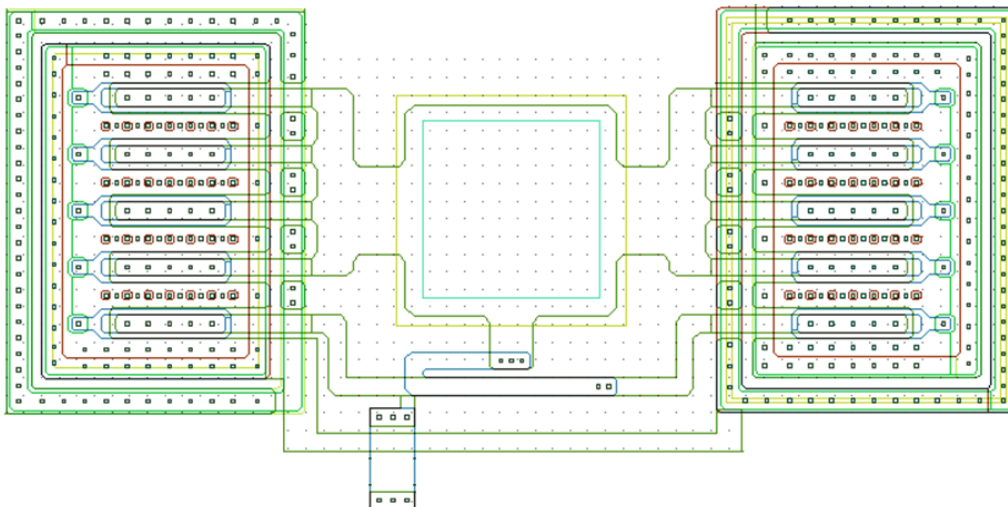


Рис. 7. Топология защиты на МОП-транзисторах

Также, для защиты уязвимых к воздействию статического электричества выводов ИМС, могут применяться динамические элементы защиты. Электрическая схема динамического элемента защиты представлена на рис. 8.

При воздействии электростатического разряда, импульс проходит через емкость  $C1$ , открывая транзистор  $VT1$  в результате вся энергия разрядного импульса стекает на шину питания через открытый транзистор. Помимо защиты входных цепей динамические элементы применяют для защиты шин земли и питания.

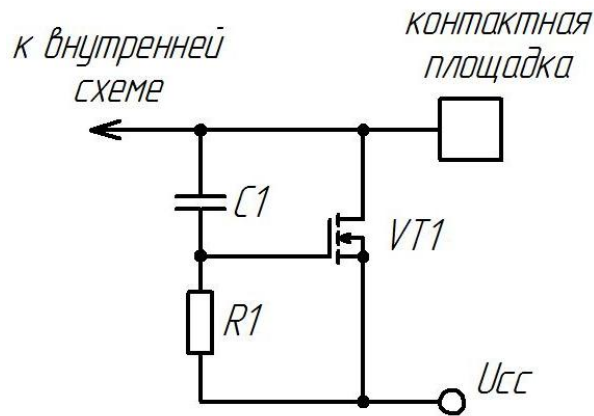


Рис. 8. Схема динамического элемента защиты

В результате проведения исследований определены основные принципы работы схем защиты от статического электричества на нормально закрытых МОП-транзисторах для микросхем серии 1564, выявлены их конструктивные и топологические особенности, даны рекомендации по построению схем защиты.

#### Список литературы

[1] Максимов И.В., Андреев В.В., Столяров А.А. *Защита микросхем, изготовленных по КМОП-технологии от воздействия статического электричества*. Научно-технические материалы в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской научно-технической конференции, 15 - 17 ноября 2016 года. Т.1. -Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. С. 142-146.

[2] Максимов И.В., Андреев В.В. *Защита от статического электричества времязадающей микросхемы КР512ПС10*. Научно-технические материалы в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной НТК, 18 - 20 апреля 2017 года. Т.3. -Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. С. 4-7.

[3] Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. *Защита электронных средств от воздействия статического электричества*. - М.: Издательский Дом "Технологии", 2005. - Г.3, п.3.4.3-157-158 с.

[4] Кузнецов В.В., Андреев В.В., Максимов И.В. *Применение метода импульса линии передач для сравнительной оценки уровня защищенности ИМС от воздействия статического электричества*. Научно-технические материалы в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской НТК, 14 - 16 ноября 2017 года. Т.1. - Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. С. 113-116.

**Максимов Игорь Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igormaksimow@yandex.ru

**Андреев Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladimir\_andreev@bmstu.ru

Н.С. Жарова, И.В. Размахов, А.К. Горбунов

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СКОРОСТЬ СТАТИСТИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривается задача байесовского оценивания. Оценка параметра строится на приемном конце канала связи с ограниченной пропускной способностью, по которому передаются сообщения о результатах измерений. Пропускная способность канала по теореме Шеннона ограничивает число возможных сообщений, которые можно передать со сколь угодно малой вероятностью ошибки. Поэтому на передающем конце канала связи необходимо решать задачу сжатия данных. В ряде случаев такое сжатие можно осуществить, построив по произведенным наблюдениям достаточную статистику. Если мощность достаточной статистики удовлетворяет ограничению, которое накладывает канал связи, рассматриваемая задача совпадает с обычной задачей байесовской оценки. Возникает вопрос: как организовать передачу таким образом, чтобы это увеличение было минимальным?

Возможны два подхода к решению этой проблемы. В первом подходе задаче оценивания и передачи решаются совместно: строится подмножество пространства оценок, имеющее заданную мощность и по наблюдаемым данным из этого подмножества выбирается оценка параметра, которая затем передается по каналу со сколь угодно малой вероятностью ошибки. Во втором подходе задачи оценивания и передачи разделяются: на передающем конце канала связи строится предварительная оценка параметра, которая затем кодируется и передается по каналу. Оба подхода могут быть описаны в терминах, введенных при решении задач кодирования источников с заданным критерием вероятности.

Пусть  $U$  – параметрическое пространство,  $X=(X_1 \dots X_L)$  – выборочное пространство, где  $L$  – объем выборки,  $V$  – пространство оценок. Пусть  $q(u) * Q(x|u)$  – распределение вероятностей на  $UX$  и пусть для всех  $N \geq 1$ , которое будем называть длиной блока

$$q(u) = \prod_{n=1}^N q(u^{(n)}), \quad Q(x|u) = \prod_{n=1}^N Q(x^{(n)}|u^{(n)}),$$

где  $u = (u^{(1)}, \dots, u^{(N)})$ ,  $x = (x^{(1)}, \dots, x^{(N)})$ ,  $u^{(n)} \in U$ ,  $x^{(n)} \in X$ ,  $n = \overline{1, N}$

Тогда два подхода к решению задачи передачи, определенные выше могут быть описаны схемами кодирования  $A$  и  $A^*$ , имеющими вид односвязных цепей Маркова:

$$A = \{U^N X^N T_N V^N, q(u)Q(x|u)\tau_A(t|x)\varphi_A(V|t)\},$$

$$A^* = \{U^N X^N U^{*N} T_N V^N, q(u)Q(x|u)\psi(u^*|x)\tau_{A^*}(t|u^*)\varphi_{A^*}(v|t)\},$$

где  $U^*$  – пространство предварительных оценок параметра и  $T_N = \{1, 2, \dots, \tau_N\}$  – компонента, описывающая сужение множества  $V^N$  до подмножества мощно-

сти  $\tau_N$  и в схеме  $A$  имеющая смысл статистики с ограниченной мощностью.

Под скоростью статистики понимается величина  $R = \frac{\log_2 \tau_N}{N}$ .

На  $U^N \times V^N$  определена функция погрешности  $d_N(u, v)$  такая, что

$$1) d_N(u, v) = d(u^{(1)}, v^{(1)}) + \dots + d(u^{(N)}, v^{(N)});$$

$$2) d(u, v) \geq 0, u \in U, v \in V;$$

3) для каждого  $u \in U$  имеется единственное  $v \in V$ , для которого  $d(u, v) = 0$

Минимально достижимая скорость асимптотически достижимая в схеме  $A$  с ростом длины блока, при которой средняя погрешность  $M_A d_N(U^N; V^N)$  не превосходит  $\mathcal{E}$ , называется  $\mathcal{E}$  – энтропией схемы  $A$  и обозначается  $R(\mathcal{E})$ ; аналогично – в схеме  $A^*$  –  $R^*(\mathcal{E})$ . Следуя 2, можно показать, что

$$R(\mathcal{E}) = \min I(X; V); R^*(\mathcal{E}) = \min I(U^*; V).$$

$$M_A d(U; V) \leq \mathcal{E}; M_{A^*} d(U^*; V) \leq \mathcal{E}$$

Распределения вероятностей  $p_A(v|x)$  и  $p_{A^*}(v|u^*)$ ,  $v \in V$ ,  $x \in X$ ,  $u^* \in U^*$  на которых достигается  $\mathcal{E}$  – энтропия в схемах  $A$  и  $A^*$  могут быть найдены методами работы.

Поскольку включение дополнительного звена в схему обработки не увеличивает средней взаимной информации,  $R(\mathcal{E}) = R^*(\mathcal{E})$  для всех.

**Утверждение.** Равенство  $R(\mathcal{E}) = R^*(\mathcal{E})$  имеет место тогда и только тогда, когда выполняется одно из следующих условий:

а)  $u^*$  есть достаточная статистика для оценивания параметра  $u$  по выборке  $x$ ;

б) распределение  $p_A(v|x)$ , на котором достигается  $\mathcal{E}$  – энтропия в схеме  $A$  является вырожденным распределением и  $|U^*| \geq |V|$ ;

в) распределение  $p_A(v|x)$ , на котором достигается  $\mathcal{E}$  – энтропия в схеме  $A$  и не зависит от  $x$ .

Доказательство утверждения опущено.

Рассмотрим пример двоичной симметричной схемы оценивания.

Пусть  $U = V = \{0,1\}$ ,  $q(u) = 1/2$ ,  $x = (x_1, \dots, x_l)$ ,  $x_l = u \oplus e_l$ , где  $e_l$ ,  $l = \overline{1, L}$  – независимые одинаково распределенные двоичные случайные величины,  $p(e_l = 1) = p$ . Кроме того, пусть  $d(u, V) = \omega_H(u \oplus V)$ , где  $\omega_H(\cdot)$  – вес Хемминга. Достаточной статистикой для оценивания параметра  $u$  по выборке  $x$  является  $\omega(x) = \sum_{l=1}^l x_l$ . Поэтому при  $u^* = \omega(x)$ , для всех  $\mathcal{E}$ ,  $R(\mathcal{E}) = R^*(\mathcal{E})$ .

### Список литературы

[1] Шубин Н.Е., Лысенко А.Л., Горбунов А.К., Лысенко С.Л., Шкилев В.Д., Лысенко М.М. Формализованные подходы к уменьшению рисков в инвестиционных процессах на базе нематериальных активов. // В сборнике: Экономика и менеджмент: современный взгляд на изучение актуальных проблем (сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции). – 2016. – С.73-88.

[2] Шкилев В.Д., Лысенко Л.В., Горбунов А.К. Моноадное (кластерно-волновое) понимание инновационного процесса. // В сборнике: Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе. – 2016. – С.225-230.

[3] Лысенко А.Л., Горбунов А.К., Грачев В.В., Буланов А.В. Физико-химические процессы в технологии вакуумирования при сжигании порошка титана в среде азота. – Научные технологии. – 2008. – Т.9 – №10. – С.25–31.

[4] Амеличева К.А., Горбунов А.К., Лысенко Л.В., Шаталов В.К., Лысенко А.Л. Теоретические подходы к телепортационным процессам. – Научные технологии. – 2017. – Т.18 – №10. – С.17-23.

[5] Шкилев В.Д., Лысенко Л.В., Горбунов А.К. О фальсифицируемости в науке, критерии Поппера и линии демаркации. – Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – №СВ2 (13). – С.215-219.

**Жарова Наталия Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: natachazharova39@gmail.com

**Размахов Илья Вадимович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: il.razmahow@yandex.ru

**Горбунов Александр Константинович** – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kf\_bmstu\_fiz@mail.ru



С.М. Твердова, Йе Еинт Ко Ко

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СПЕЧЕННЫХ КЕРМЕТНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ ПРОВОДЯЩЕГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных причин отказов электровакуумных приборов является разрушение подогревательных узлов, функционирующих в достаточно тяжелых условиях эксплуатации: высокотемпературный режим (как правило, не ниже 1400 К), воздействие постоянных и переменных электрических полей, напряженность которых может достигать 50000 В/см [1,2], механические воздействия (ударные, вибрационные).

В связи с этим для обеспечения надежности, долговечности и необходимого срока службы жесткие требования предъявляются к материалам подогревателей: тугоплавкость, малая испаряемость, высокое удельное сопротивление для материала керны, высокая электроизолирующая способность и теплопроводность для материала покрытия.

Установлено, что этим требованиям наиболее отвечают керметы состава вольфрам (молибден) - нитрид алюминия с различным содержанием проводящей и изолирующей фаз. Нитрид алюминия (AlN) обладает уникальным сочетанием физических свойств: высокой теплопроводностью, электрическим сопротивлением и коэффициентом теплового расширения (КТР), близким к КТР кремния. Теоретическая теплопроводность кристаллического AlN при комнатной температуре достигает 319 Вт/м·К, измеренные значения для поликристаллической керамики AlN достигают 285 Вт/м·К [3]. Благодаря этим свойствам AlN становится ключевым материалом, для теплопроводящих элементов, особенно при высокой мощности.

Для проведения экспериментов были разработаны способы изготовления экспериментальных образцов керметных материалов. Способ изготовления керметов заключается в предварительном смешивании порошков в присутствии размольных шаров в среде этилового спирта в течение 6-12 часов, формовании заготовок из полученной массы в присутствии органического связующего и спекании их в вакуумной электрической печи при температуре не ниже 2070 К.

Поскольку одна из задач, направлена на снижение тепловой нагрузки на тело накала благодаря увеличения теплопередачи к катоду, теплопроводность керметного подогревателя играет весьма важную роль.

Измерение теплопроводности керметных материалов при температурах эксплуатации требует применения сложного и не всегда доступного оборудования. Поэтому в работе исследовалась теплопроводность образцов при температурах 350 К.

Для исследования теплопроводности керметных материалов был применен метод сравнения параметров с калиброванным образцом. Функциональная схема установки для реализации метода показана на Рис. 1.

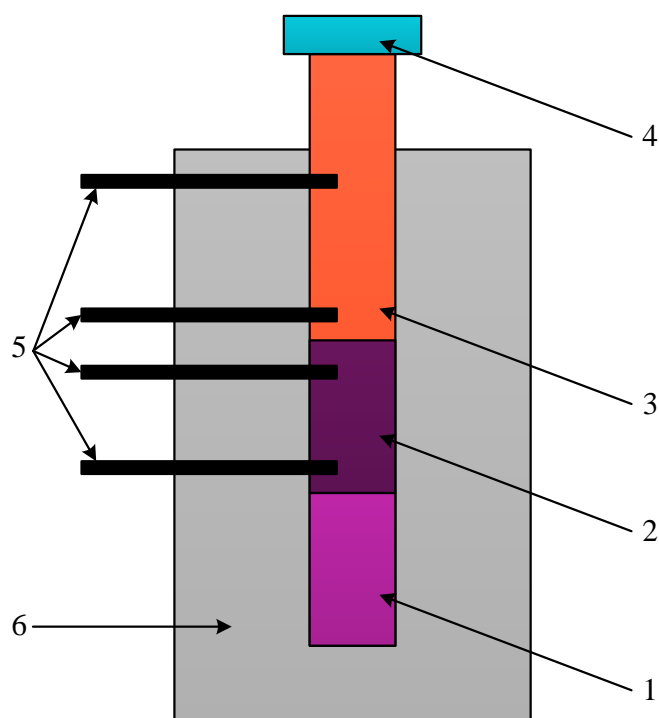


Рис. 1. Схема установки для определения теплопроводности:  
 1 – источник нагрева, 2 – исследуемый образец, 3 – медный стержень,  
 4 – охлаждающая система, 5 – термопары, 6 – теплоизолятор

Один торец исследуемого образца в виде стержня диаметром 10 мм и длиной 20 мм (2) нагревался источником тепла (1). Другой торец образца прижимался к стержню, изготовленному из меди вакуумной плавки (3). Для уменьшения потерь при теплопередаче торцы стержней были отшлифованы. Верхний по схеме торец медного стержня соединялся с системой охлаждения (4). На строго фиксированных расстояниях в исследуемый образец и медный стержень вводились термопары (5). В установившемся режиме, примерно через 8-10 минут считывались показания термопар. Поскольку система стержней была окружена теплоизолятором (6), тепловой поток от нагревателя проходил через исследуемый образец и медный стержень практически не меняя параметров.

Расчет теплопроводности материала образца производился по формуле

$$\lambda_o = \lambda_m (T_{m2} - T_{m1}) S_m l_o (T_{o2} - T_{o1})^{-1} S_o^{-1} l_o^{-1}, \quad (1)$$

где:  $\lambda_o$  и  $\lambda_m$  – коэффициенты теплопроводности образца и меди;

$T_{m2}$  и  $T_{m1}$  – температуры торцов медного стержня;

$T_{o2}$  и  $T_{o1}$  – температуры концов исследуемого образца;

$S_m$  и  $l_m$  – площадь сечения и длина медного стержня;

$S_o$  и  $l_o$  – площадь сечения и длина образца.

На Рис. 2 показан график характерной зависимости теплопроводности кермета W-AlN от параметра «с», равного отношению объемного содержания проводящего материала к объему кермета.

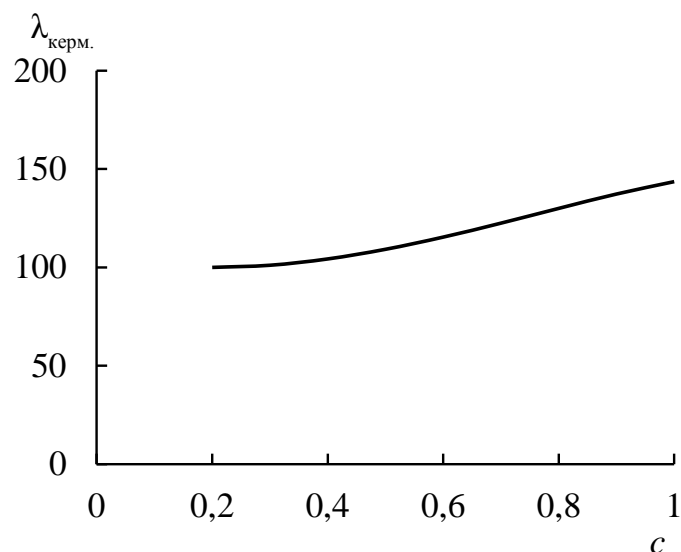


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности кермета МА от параметра «с»

Как следует из графика, увеличение объемного содержания вольфрама несколько повышает теплопроводность кермета. При этом общая теплопроводность композиции в любом случае в 3-3,5 раза выше, чем у тела накала, представляющего собой вольфрамовую нить, «упакованную» в слой оксида алюминия.

Поскольку теплопроводности вольфрама, молибдена и примененного состава порошка нитрида алюминия находятся на уровне 140 Вт/м·К, общая теплопроводность керметов имеет слабую зависимость от процентного состава и находится на уровне 100-120 Вт/м·К.

### Список литературы

- [1] Семенов Ю.А. Производство подогревателей катодов электровакуумных приборов. М.: Госэнергоиздат, 1962. 136 с.
- [2] Ашкинази Л. А. Электронные лампы: из прошлого в будущее. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 221 с.
- [3] T. Herzog, S. Walter. Aluminum nitride thin films for high frequency smart ultrasonic sensor systems // 18th World Conference on Nondestructive Testing Proceedings, 2012. С. 21-28.

**Твердова Светлана Михайловна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

**Йе Еинт Ко Ко** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yeyintkoko49@gmail.com

А.Н. Шмаков, В.В. Андреев

## РАЗРАБОТКА КРИСТАЛЛА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧЕТЫРЬМЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Данная работа посвящена разработке кремниевого фотоэлектрического приемника излучения на подложке n-типа проводимости с четырьмя фоточувствительными площадками и охранным кольцом p-типа. Такие фотоприемники применяются в качестве приемников и датчиков инфракрасного излучения в составе оптико-электронной аппаратуры, систем фотоэлектрической автоматики и бесконтактного измерения температуры, вычислительной и измерительной техники, программно-управляемого оборудования и приборов [1]. На рисунках 1 и 2 изображены структуры кристаллов разрабатываемых изделий.

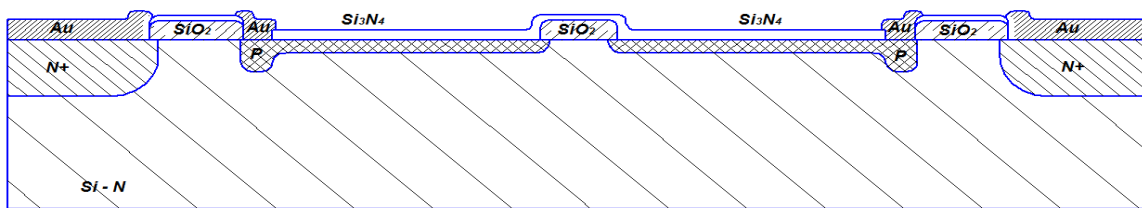


Рис. 1. Структура кристалла без охранный кольца

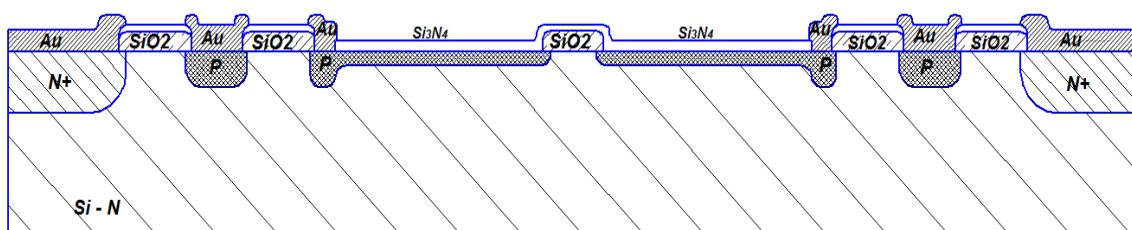


Рис. 2. Структура кристалла с охранный кольцом

Важнейший этап проектирования полупроводникового фоточувствительного элемента заключается в разработке его топологии. Сущность разработки топологии фотодиода состоит в определении взаимного расположения маскирующих слоев. Этот процесс должен осуществляться таким образом, чтобы обеспечить заданные размеры в конструкторской документации, учитывая проектные нормы изделия, при котором уменьшается влияние шумов, присущим ИК pin-фотодиодам. Создание топологии (маскирующих слоев) один из наиболее важных шагов в сквозном проектировании, где описывается детализированная конфигурация и позиционирование каждого маскирующего слоя.

В качестве инструментального средства было использовано лицензионное программное обеспечение для топологического проектирования полупроводниковых приборов «Layout Editor 9.0».

В качестве исходных пластин для изготовления кристаллов фотодиода были выбраны высокоомные кремниевые пластины с n-типом проводимости с удельным объемным сопротивлением  $3000 \div 10000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (100-КЭФ 3000-10000), что является новым подходом к разработке полупроводниковых фотоэлектрических приемников с более улучшенными параметрами: токовой монохроматической чувствительностью (с засветкой, без засветки), темновыми токами фоточувствительного элемента, темновыми токами охранного кольца, емкостью и минимизации шумов.

Были разработаны два варианта конструкции кристалла фотодиода. В первом варианте кристалл фотодиода выполнялся без охранного кольца, во-втором, с охранным кольцом р-типа.

Фотошаблон первого слоя предназначен для операции подлегирования контактных окон бором (р-типа) путем ионной имплантации. На рисунке 3 изображены места легированных областей, где рис.3а без охранного кольца, рис.3б с охранным кольцом. Второй вариант имеет охранный кольцо р-типа, на которое будет в дальнейшем подается смещение относительно фоточувствительной площадки (ФЧП)  $-20 \text{ В}$ . Один вывод корпуса фотодиода имеет электрический контакт к охранным кольцу. При нагреве фотодиода, даже при отсутствии света происходит генерация носителей заряда, поэтому охранный кольцо р-типа предназначено, чтобы в себя собирать случайно зарождающийся заряд электронно-дырочных пар, и тем самым снизить уровень шумов и темновых токов.

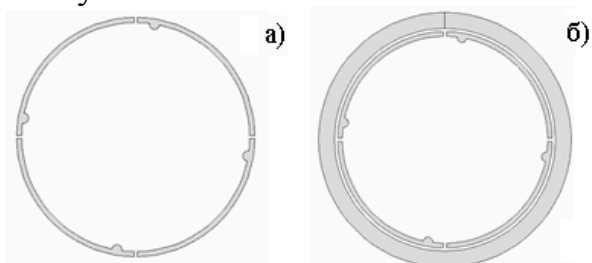


Рис. 3. Топологический слой для первого фотошаблона  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

Фотошаблон второго слоя предназначен для легирования фосфором (n+ охраны) эквипотенциальной поверхности путем ионной имплантации (рис.4). Создается охранная область, исключающая вероятность инверсного слоя при функционировании устройства. Поскольку, изначально используется пластина со слаболегированным кремнием n-типа.

Охранная область n+ типа называется эквипотенциальной поверхностью, так как находится под потенциалом подложки и имеет с ней общий контакт. Необходимость такого подключения заключается в использовании высокоомного кремния, в его структуре сверху и внизу существует разность сопротивления порядка  $10\text{-}100 \text{ Ом}$ , для того чтобы исключить возникновение разности потенциалов n+ охрану подключали к подложке.

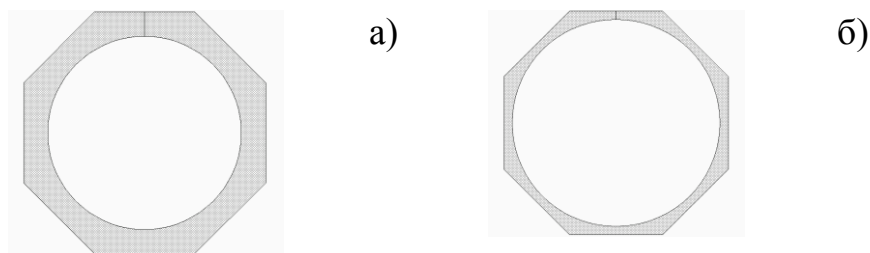


Рис. 4. Топологический слой для второго фотошаблона  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

Фотошаблон третьего слоя предназначен для удаления окисла  $\text{SiO}_2$  с областей пластины, предназначенной для получения ФЧП и эквипотенциальной поверхности. На рисунке 5 изображены слои, где темная область является местом травления  $\text{SiO}_2$ . Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) осаждается для просветления в определенной тональности фоточувствительной площадки. Толщина его слоя напрямую зависит от длины волны, в диапазоне которой будет функционировать изделие.

После осаждения нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) пластины подвергаются ионному легированию бором, при этом границы р-п переходов определяются оставшимся, после травления окислом на кристалле

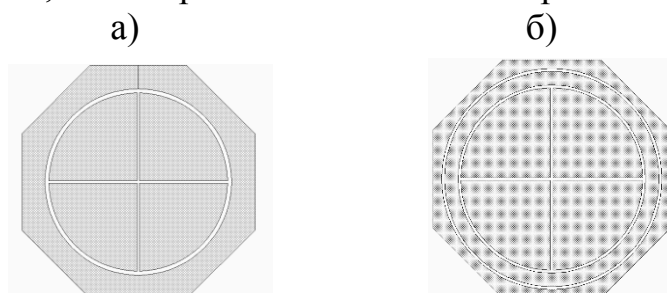


Рис. 5. Топологический слой для третьего фотошаблона  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

Фотошаблон четвертого слоя предназначен для вскрытия контактных окон путем травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Открываются окна к легированным областям кремния для создания в них контактов из золота. На рисунке 6 темными областями показаны места травления нитрида кремния.

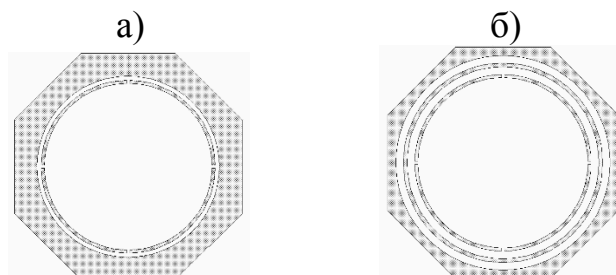


Рис. 6. Топологический слой для четвертого фотошаблона  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

Создание металлизации проводится вакуумным напылением золота с подслоем хрома (Cr-Au). Хром используется для улучшения адгезии к нитриду кремния и окислу кремния. Фотошаблон пятого слоя предназначен для создания металлической разводки, путем травления незащищенных областей пластины. Металлизация остается на открытых площадках под контакт. На рисунке 7 темными областями показаны места травления золота, светлыми - места контактов для разварки в корпусе. После этого осуществляется операция вжигания Cr-Au.

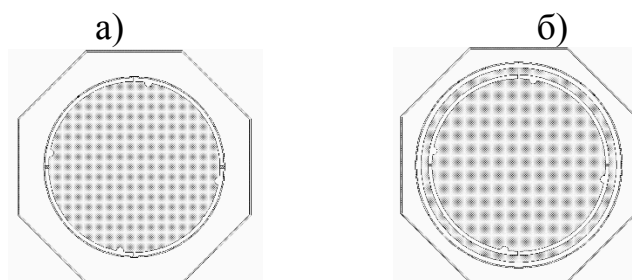


Рис. 7. Топологический слой для пятого фотошаблона  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

На рисунке 8 изображена готовая топология из 16 кристаллов и тестовых модулей для контроля технологических процессов, размещенная на пластине диаметром 100 мм.

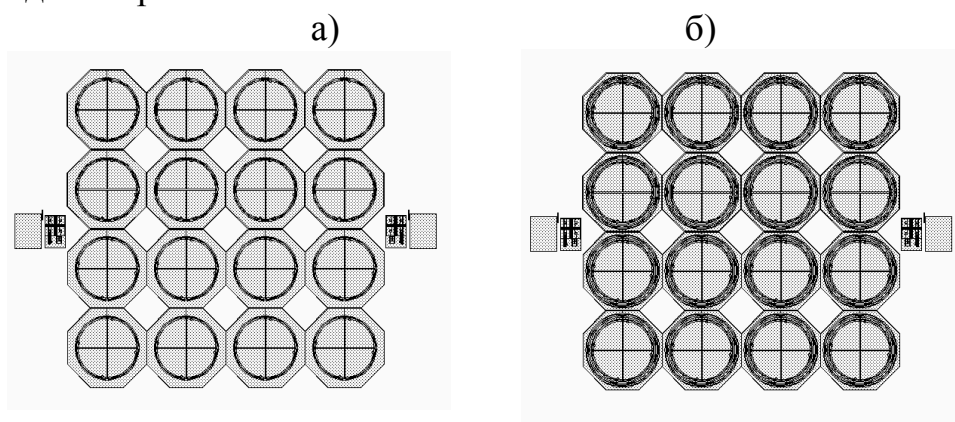


Рис. 8. Топология pin-фотодиодов n-типа, размещенная на пластине  $D=100$  мм  
(а: без охранного кольца р-типа, б: с охранным кольцом р-типа)

В случае с pin-фотодиодом, имеющим охранный кольцо р-типа, вывод с охранного кольца подключается к блоку через резистор номиналом 1 кОм. При измерении темновых токов ФЧП, наблюдаются незначительно сниженные зависимости pin-фотодиодов с охранным кольцом в отличие от pin-фотодиодов без охранного кольца (рис. 9). Это связано с сопротивлением исходного кремния и с сопротивлением ограничительного резистора, использованного для делителя. Охранный кольцо так же выполнено для изучения влияния охранных колец на шумы pin-фотодиодов. Наличие охранный кольца существенно снижает шумы pin-фотодиодов.

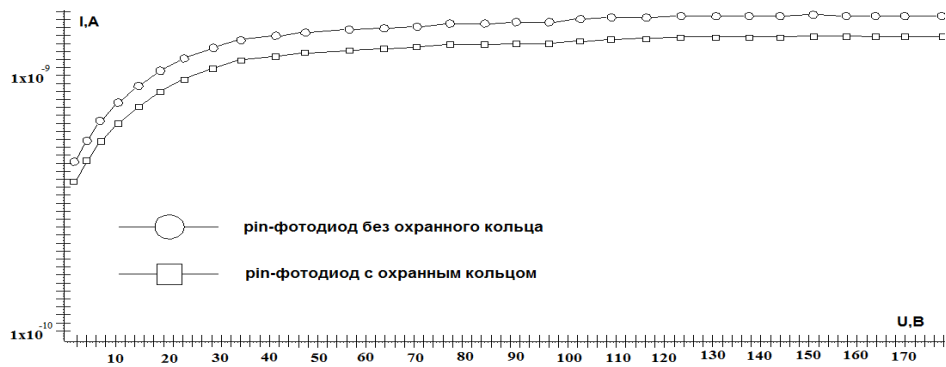


Рис. 9. Характеристика темновых токов

### Список литературы

- [1] Алексеев Ф.В., Нисков В.Я. *Влияние охранных элементов на темновые токи p-i-n-фотодиодов*. Изд. ВГТУ г. Воронеж -215 г.
- [2] Аброян И.А., Беляков В.С., Никулина Л.М., Титов А.И. *Влияние распределения бора на профили дефектов при облучении кремния легкими ионами // Физика и техника полупроводников*, т.15, вып.4, 1981 г.
- [3] Болесов И.А. *Исследование и разработка технологии изготовления p-i-n-фотодиодов на основе кремния с применением ионной имплантации*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. Изд. МГАТХТ им. Ломоносова г. Москва - 2004 г. – 125 с
- [4] Киес Р. Дж. Стафеева В.И. *Фотоприемники видимого и ИК диапазонов*. Москва. Радио и связь. 1985 г. -323 с.
- [5] Добровольский Ю.Г. *Кремниевый p-i-n-фотодиод с малым темновым током*. Изд. НПФ «Тензор» г. Черновцы, 2011 г.

**Шмаков Андрей Николаевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: ArhangelSD@yandex.ru

**Андреев Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru



А.В. Мазин, Аунг Пьей Зон

## РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из важных вопросов физики твердого тела является вопрос о выяснении механизмов передачи тепла, теплопроводностью. Перенос тепла теплопроводностью осуществляется отдельными частицами или группами частиц: электронами, фотонами, фононами, атомами, молекулами. В [1] проанализирована возможность использования элемента Пельтье для измерения теплового сопротивления образца материала. На рис.1 приведены эквивалентная схема и тепловые потоки в системе «элемент Пельтье – образец – теплоприемник».

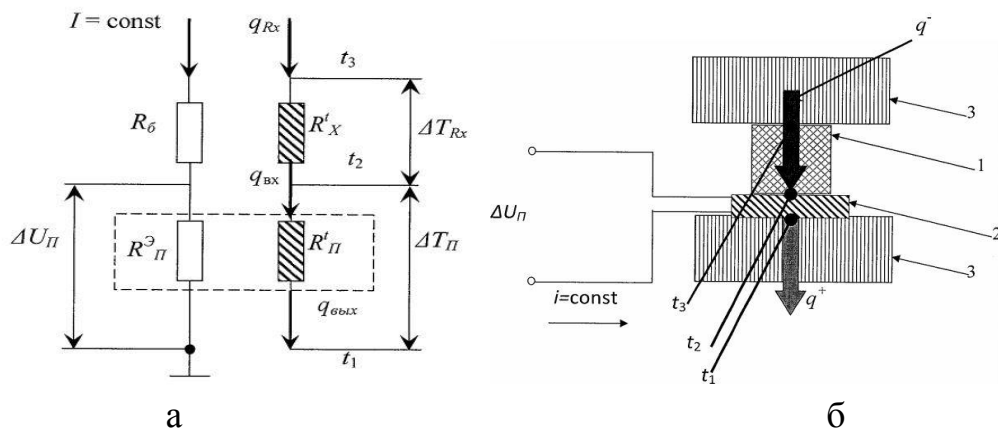


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и тепловые потоки в системе «элемент Пельтье – образец – теплоприемник» (б):  $\Delta U_{\text{П}}$  – падение напряжения на активном сопротивлении элемента Пельтье;  $R_{\text{П}}^{\text{т}}$  – тепловое сопротивление элемента Пельтье;  $R_{\text{П}}^{\text{э}}$  – электрическое сопротивление элемента Пельтье 1 – образец; 2 – элемент Пельтье; 3 – теплоприемник;  $t_1$  – температура нижней обкладки (поверхности) элемента Пельтье;  $t_2$  – температура верхней обкладки (поверхности) элемента Пельтье и нижней стороны образца;  $t_3$  – температура верхней стороны образца;  $q_{\text{Rx}}$ ,  $q_{\text{вх}}$ ,  $q_{\text{вых}}$  – тепловые потоки в системе элемент Пельтье – образец – теплоприемник

Утверждается, что при достижении стационарного режима и при условии равенства температур  $t_1 = t_3$  тепловое сопротивление  $R_x^{\text{т}}$  определяется соотношением [2]:

$$R_x^t = \frac{\Delta U_{II} - IR_{II}^{\vartheta}}{\left(-\alpha_{II} \cdot I + \frac{R_{II}^{\vartheta} \cdot I^2}{2}\right) K_{зб}} \quad (1)$$

где:  $\alpha_{II}$  – коэффициент Пельтье;  $K_{зб}$  – коэффициент Зеебека.

Для обеспечения равенства температур  $t_1 = t_3$ , необходимо применять специальные устройства, например, адиабатическую камеру и другие конструктивные усложнения. При этом, как правило, обеспечиваются измерения образцов, заведомо обладающих низкой теплопроводностью.

В нашей работе рассмотрена возможность использования параллельной схемы подсоединения образца к элементу Пельтье, как показано на эквивалентной схеме рис.2.

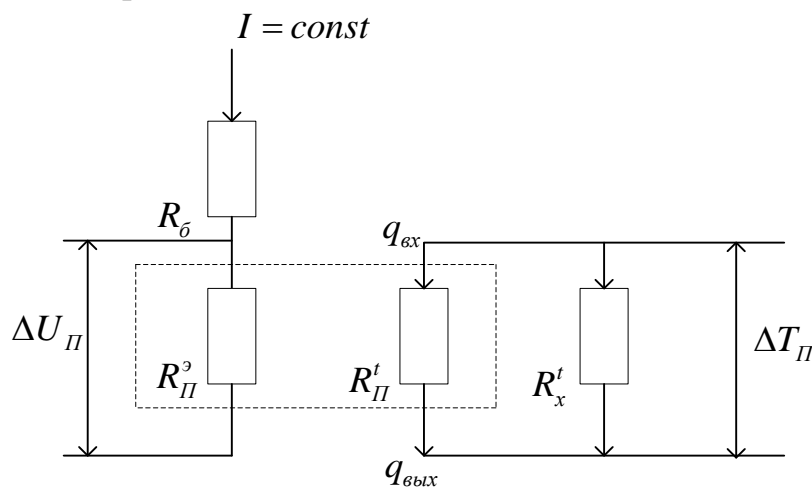


Рис. 2. Эквивалентная схема параллельного подключения образца к элементу Пельтье

Тепловой поток  $q_{ex}$  этой системы определяется выражением:

$$q_{ex} = -\alpha \cdot I + 0,5 \cdot R_{II}^{\vartheta} \cdot I^2 \quad (2)$$

Тепловое сопротивление на участке тепловой цепи вычисляется по формуле:

$$R^t = \Delta T_R / q \quad (3)$$

Общая теплопроводность элемента Пельтье и измеряемого образца равна сумме их теплопроводностей, т.е.

$$1/R_x^t + 1/R_{II}^t = 1/R_{\Sigma}^t. \quad (4)$$

Исходя из этого выражения, искомое сопротивление  $R_x^t$  определится следующим образом:

$$R_x^t = R_{II}^t \cdot R_{\Sigma}^t \cdot (R_{II}^t - R_{\Sigma}^t)^{-1} \quad (5)$$

Один из вариантов измерительной схемы представлен на рис.3.

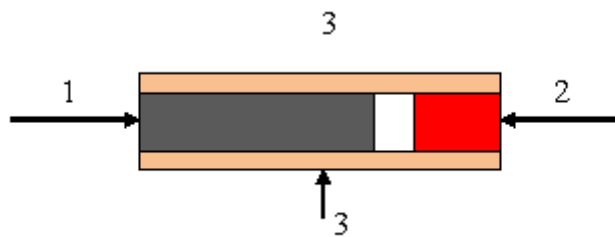


Рис. 3. Схема измерения теплопроводности при параллельном соединении:  
1 – элемент Пельтье; 2 – образец; 3 – теплоподводы

В случае полной симметричности схемы измерения поток «джоулевого» тепла не приводит к возникновению  $\Delta T$ , поэтому  $q_{ex} = \alpha_{II} \cdot I$  и

$$R'_{\Sigma} = \Delta T_{II} \cdot (\alpha_{II} \cdot I)^{-1} \quad (6)$$

**Выводы.** Предложена параллельная схема измерения теплопроводности подложек силовых электронных приборов, базирующаяся на использовании усовершенствованных элементов Пельтье. Показано, что применение предложенной схемы измерений позволяет упростить конструкцию измерительного устройства и применить его для экспрессного контроля параметров подложек при их массовом промышленном выпуске.

### Список литературы

[1] Гринюк А.В. Термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров твердых материалов: Дис. канд. техн. наук – Москва, 2012 – 129с.

[2] Симкин А.В. Технологические и конструкционные способы повышения надежности работы термоэлектрической генераторной батареи. Дис. канд. техн. наук. Москва. 2014, 166 с.

**Мазин Анатолий Викторович** – д-р техн. наук, зав. каф. "Информационная безопасность автоматизированных систем" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazinav@yandex.ru

**Аунг Пьей Зон** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungpyesone49@gmail.com

В.В. Прасицкий, Чжо Зай

## **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ НАТРИЕВЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Исследование и разработка спеченных электродов для разрядных осветительных натриевых ламп высокого давления ведутся уже достаточно длительное время. Актуальность работы по-прежнему высока в связи с тем, что натриевые разрядные лампы имеют высокий световой выход, превышающий 150 лм/Вт, что делает их самым экономичным источником искусственного освещения в настоящее время. Однако ресурс работы ламп ограничен долговечностью повсеместно применяемых спиральных электродов, содержащих недостаточное количество эмиссионно-активного вещества и работающих в неоптимальных тепловых режимах. Новой ступенью в разработке являются спеченные электроды, содержащие керн из вольфрама с надетой на него спеченной массой, представляющей собой прессованную и спеченную смесь порошков вольфрама и эмиссионных добавок (эмиссионно-активного вещества).

Сложность создания спеченных электродов для разрядных ламп высокого давления обуславливается тем, что на этапе разгорания лампы они должны обладать вторично-эмиссионными свойствами, а в основном режиме работы – термоэмиссионными. Кроме того, вследствие огромной скорости переходных тепловых процессов на поверхности и в теле электрода, на каждом полупериоде переменного тока в течение времени разгорания лампы происходит механическое разрушение электрода. Расчет этих переходных процессов необходим для нахождения требуемых вариантов конструкции электрода, применяемых материалов и технологических операций изготовления.

Решением задачи может служить конструкция спеченного электрода, в которой реализуется так называемый эффект «полого катода» [1]. Катод, рабочая поверхность которого имеет отрицательную кривизну или состоит из отдельных поверхностей (включая и плоские), ограничивающих часть пространства газоразрядного прибора и создающих полость называется полым катодом. Часто используются трубки (прямоугольного или круглого сечения) в качестве полых катодов, а также две плоские параллельные друг другу пластины любой формы, имеющие электрическое соединение.

Главной особенностью разрядов с полым катодом является следующий эффект: при прочих равных условиях ток при заданном напряжении получается больше, чем в случае использования плоского катода, и резко возрастает при уменьшении межэлектродного расстояния, когда область отрицательного свечения у противоположных катодов перекрывается и

фарадеево темное пространство исчезает – эффект полого катода. Основные причины этого явления связаны с эффективным использованием ионов и быстрых электронов для поддержания разряда, причем это использование сильно зависит от геометрии разрядного объема.

Главные особенности эффекта полого катода можно суммировать следующим образом [2-5]: при уменьшении расстояния между стенками катода (или его радиуса) при постоянном напряжении наблюдается большое увеличение плотности тока. При средних давлениях для заданных напряжений и расстояний между стенками катода (или радиуса) разрядный ток слабо уменьшается из-за понижения давления. Рост тока может наблюдаться при низких давлениях. Рабочие напряжения значительно ниже, чем для разряда с плоским катодом. Малый положительный наклон имеют вольтамперные характеристики разряда с полым катодом, разряд переходит в высоковольтную фазу при низких давлениях газа, характеризующуюся присутствием электронного луча.

Геометрия электрических полей в разряде с полым катодом такова, что по оси трубки формируется электронный луч. Граница катодного слоя приобретает воронкообразный профиль, и вершина плазменной воронки проникает внутрь полости катода.

Основная причина уменьшения срока службы электрода - ускоренное испарение эмиссионного вещества с участков спеченной массы, расположенной вблизи торца керна, обращенного к разряду: известно, что повышение температуры спеченной массы на 70К приводит к увеличению скорости испарения эмиссионного вещества с ее поверхности на порядок [6]. Для устранения этого явления на участке спеченной массы, обращенном в сторону разряда, она изготавливается из порошка тугоплавкого металла без эмиссионных добавок или с добавками тугоплавких оксидов типа оксида иттрия, причем длина спеченной массы без эмиссионных добавок составляет от 30 % до 50 % общей длины спеченной части электрода. В этом случае кинетическая энергия положительных ионов в катодный полупериод и электронов в анодный полупериод разогревает торец керна, на который горит разряд, до высокой температуры. За счет теплопередачи значительное количество тепла передается спеченной массе, служащей как резервуаром для эмиссионных добавок, так и радиатором охлаждения. При этом температура спеченной массы снижается в направлении от торца керна, на который горит разряд, к противоположному торцу. Расположенный вблизи разогретого торца керна участок спеченной массы без эмиссионных добавок экранирует от воздействия максимально высокой температуры спеченную массу с эмиссионными добавками, снижая скорость и интенсивность ее распыления, увеличивая тем самым долговечность электрода и разрядной лампы в целом.

Определение пути дальнейшего совершенствования спеченных электродов, все чаще применяемых в натриевых лампах высокого давления с

повышенными эксплуатационными характеристиками. Увеличение долговечности электродов при одновременном снижении напряжения поджига разряда обеспечиваются конструкцией электродов, которая обеспечивает реализацию эффекта «полого катода» в момент включения электропитания и тепловую защиту эмиссионно-активного вещества при горении дугового разряда.

### Список литературы

- [1]. *Moskalev B.I.* Razryad s polym katodom. М.: Energiya, 1969. 184 с.
- [2] *Лисовский В.А., Богодельный И.А.* Зажигание и режимы горения разряда постоянного тока с полым катодом // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. 2012. № 1025. С. 43-53.
- [3] *Лопатин И.В.* Генерация объемной плазмы в разрядах низкого давления с полым катодом для азотирования поверхности металлов: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Томск, 2013. 16 с.
- [4] A flexible platform for simulations of sputtering hollow cathode discharges for laser applications / D. Mihailova [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41, № 24. P.245202 (10pp).
- [5] Analytical model of a longitudinal hollow cathode discharge / G.J.M. Hagelaar [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 465204 (11pp).
- [6] *Кудинцева Г.А., Мельников Л.И., Морозов А.В., Никонов Б.П.* Термоэлектронные катоды // под ред. Н. Д. Девяткова. М.; Л.: Энергия, 1966, 366 с.

**Прасицкий Василий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sintel40@yandex.ru

**Чжо Зай** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawzay49@gmail.com

Тун Тун Лин

## ТЕНЗОР МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНОК С КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Пленочные ферриты являются основой для построения устройств спин-волновой электроники [1]. Пленки, выращенные на монокристаллических подложках, также приобретают кристаллическую структуру. Так, в настоящее время широко используются пленки железо-иттриевого граната ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ), выращенные на парамагнитных монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ). Оба вида граната удачно сочетаются значениями параметров кристаллической решетки. Передача и преобразование сигналов пленочными элементами осуществляется с помощью магнитостатических спиновых волн (МСВ). Рабочие характеристики спин-волновых устройств зависят от закона дисперсии используемого типа МСВ. Пленочный феррит, как среда распространения МСВ, характеризуется тензором магнитной проницаемости (ТМП). В настоящей работе представлена методика расчета данного тензора и законов дисперсии МСВ в кристаллически-анизотропных пленках.

**Вывод тензора ТМП.** Основой расчета ТМП является уравнение движения вектора намагниченности феррита (уравнение Ландау-Лифшица)

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M}, \mathbf{H}_{eff}] \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}$  – вектор намагниченности,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\mathbf{H}_{eff}$  – эффективное магнитное поле, которое является вариационной производной от плотности магнитной энергии по магнитному моменту. Вектор намагниченности, находящийся в неравновесном состоянии, можно представить в виде суммы статической ( $\mathbf{M}_0$ ) и переменной составляющей ( $\mathbf{m}$ ):  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{m}$ . Эффективное магнитное поле можно рассчитать с помощью формулы [2]:

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_e - 4\pi(\mathbf{M}_0\mathbf{n})\mathbf{n} + \mathbf{h} - \frac{\partial W_a(\mathbf{M})}{\partial \mathbf{M}} \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}_e$  – вектор напряженности внешнего намагничивающего поля;  $\mathbf{n}$  – нормаль к пленке;  $\mathbf{h}$  – поле, генерируемое переменной намагниченностью  $\mathbf{m}$ ;  $W_a(\mathbf{M})$  – плотность энергии магнитной анизотропии феррита.

Расчет производной от  $W_a(\mathbf{M})$  в правой части (2) удобно произвести в системе координат  $xuz$  с осью  $z$ , направленной вдоль вектора равновесной намагниченности,  $z \parallel \mathbf{M}_0$  (рис. 1). Тогда для малых отклонений от равновесного положения и в линейном по  $\mathbf{m}$  приближении, а также при усло-

вии сохранения длины вектора намагниченности  $\mathbf{M}^2 = const$ , можно выразить производную  $\partial W_a(\mathbf{M})/\partial \mathbf{M}$  в виде [2]:

$$\frac{\partial W_a(\mathbf{M})}{\partial M_i} = \sum_j N_{ij}^a M_j \quad (3)$$

где  $i, j = x, y, z$ , и в линейном приближении  $M_x = m_x$ ,  $M_y = m_y$ ,  $M_z \approx M_0$ . Компоненты  $N_{ij}^a$  образуют симметричный тензор, получивший название тензора эффективных размагничивающих факторов.

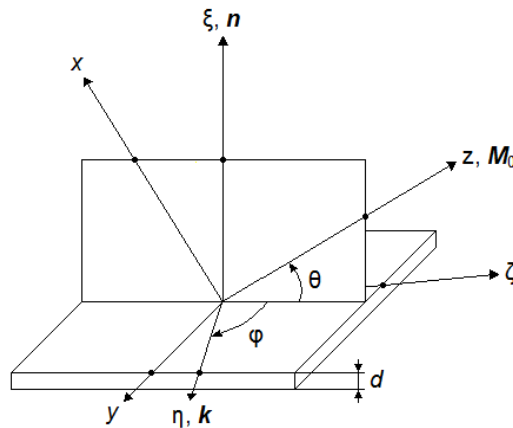


Рис. 1. Системы координат, использованные в модели пленки

Выражение  $W_a(\mathbf{M})$  должно быть совместимо с симметрией кристалла. Это значит, что выбор выражения ограничен инвариантами относительно преобразований симметрии кристаллической решетки. Кроме того,  $W_a(\mathbf{M})$  можно представить в виде разложения в ряд по проекциям вектора полной намагниченности  $\mathbf{M}$ . Требование инвариантности энергии относительно обращения времени ограничивает члены ряда только четными степенями, поскольку нечетные степени меняют знак из-за фундаментального свойства вектора намагниченности менять знак при инверсии времени [3].

В качестве простейшего примера, иллюстрирующего расчет тензора эффективных размагничивающих факторов, можно рассмотреть случай ферритовых пленок с нормальной одноосной магнитной анизотропией. Тогда, ограничиваясь в разложении  $W_a(\mathbf{M})$  по четным степеням проекций вектора  $\mathbf{M}$  только первым и, как правило, наиболее существенным членом, можно представить инвариантное относительно поворотов вокруг нормали выражение для плотности энергии одноосной анизотропии в виде:

$$W_a^u(\mathbf{M}) = -K_{u1} \frac{(\mathbf{Mn})^2}{M_0^2} \quad (4)$$

где  $K_{u1}$  – константа, известная как первая константа одноосной магнитной анизотропии. Расчет из формулы (4) приводит к следующим отличным от нуля компонентам тензора эффективных размагничивающих факторов:



$$\left. \begin{aligned} M_0 N_{xx}^u &= -H_u \cos^2 \theta \\ M_0 N_{zz}^u &= -H_u \sin^2 \theta \\ M_0 N_{xz}^u &= M_0 N_{zx}^u = -H_u \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $H_u = 2K_{u1}/M_0$  – поле одноосной магнитной анизотропии и  $\theta$  – угол между вектором равновесной намагниченности и осью анизотропии, которая в рассматриваемом случае совпадает с нормалью к пленке (рис. 1).

Рассмотренный пример выбран не случайно. Эпитаксиальным пленкам присуща не только кристаллографическая анизотропия материала, но и одноосная анизотропия, формируемая в процессе роста пленок. Так в упомянутых в начале пленках железоиттриевого-граната полная энергия анизотропии включает в себя одноосную и кубическую анизотропию.

В случае  $m \ll M_0$ ,  $h \ll H_e$  и гармонической зависимости от времени  $m, h \sim \exp(i\omega t)$ , линеаризованное по  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{h}$  уравнение (1) может быть преобразовано к виду

$$m_i = \sum_j \chi_{ij} h_j, \quad i, j = x, y.$$

где коэффициентами являются компоненты тензора магнитной восприимчивости  $\hat{\chi}$ .

Тензор магнитной проницаемости  $\hat{\mu}$ , связывает между собой переменные составляющие магнитной индукции  $\mathbf{b}$  и напряженности  $\mathbf{h}$ . Уравнение связи имеет вид:  $\mathbf{b} = \mathbf{h} + 4\pi\mathbf{m} = \hat{\mu}\mathbf{h}$ , и, следовательно,  $\hat{\mu} = 1 + 4\pi\hat{\chi}$ . Таким образом, из уравнения (1) можно рассчитать  $\hat{\chi}$  и по нему ТМП. В результате было получено следующее выражение:

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_x & \mu_s + i\mu_a & 0 \\ \mu_s - i\mu_a & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $f = \omega/2\pi$ ,  $g = \gamma/2\pi$  и использованы обозначения

$$\mu_x = 1 + \frac{4\pi M_0 \omega_x}{\Omega}, \quad \mu_y = 1 + \frac{4\pi M_0 \omega_y}{\Omega}, \quad \mu_s = -\frac{4\pi M_0 \omega_s}{\Omega}, \quad \mu_a = \frac{4\pi M_0}{\Omega} \left( \frac{f}{g} \right),$$

$$\omega_x = H_{in} + M_0 (N_{yy}^a - N_{zz}^a), \quad \omega_y = H_{in} + M_0 (N_{xx}^a - N_{zz}^a), \quad \omega_s = M_0 N_{xy}^a,$$

$$H_{in} = \frac{(\mathbf{H}_e \mathbf{M}_0) - 4\pi(\mathbf{M}_0 \mathbf{n})^2}{M_0}, \quad \Omega = \omega_x \omega_y - \omega_s^2 - \left( \frac{f}{g} \right)^2.$$

**Вывод законов дисперсии МСВ.** Магнитостатическая волна представляет собой неоднородную прецессию вектора намагниченности и сопутствующее этой прецессии переменное магнитное поле. Тензор  $\hat{\mu}$  необходим для нахождения этого поля из системы электродинамических уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \text{rot } \mathbf{h} = 0 \\ \text{div } \mathbf{b} = 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

Поиск решения целесообразно выполнить в системе координат  $\xi\eta\zeta$  (рис. 1). Пленка расположена в интервале  $(-d) \leq \xi \leq 0$ , а ось  $\eta$  совмещена с направлением волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Тогда координатная зависимость поля МСВ будет описываться функцией  $\exp(ik\xi - ik\eta)$ , и система (7) может быть преобразована к системе линейных уравнений относительно компонент  $h_\xi, h_\eta, h_\zeta$ . Условием существования решения будет равенство нулю определителя системы. В результате реализации данной расчетной схемы было получено выражение

$$\kappa_{1,2} = \frac{k}{2\mu_{\xi\xi}} \left[ \mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi} \pm \sqrt{(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 - 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}} \right] \quad (8)$$

Компоненты тензора магнитной проницаемости в системах координат  $\xi\eta\zeta$  и  $xyz$  связаны между собой соотношениями (углы обозначены на рис. 1):

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{\xi\xi} = \mu \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \\ \mu_{\eta\xi} = [(1 - \mu) \sin \theta \cos \varphi + i\mu_a \sin \varphi] \cos \theta \\ \mu_{\xi\eta} = [(1 - \mu) \sin \theta \cos \varphi - i\mu_a \sin \varphi] \cos \theta \\ \mu_{\eta\eta} = (\mu \sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \cos^2 \varphi + \mu \sin^2 \varphi \end{array} \right\} \quad (9)$$

За пределами пленки, в свободном пространстве,  $\mu_{ij} = \delta_{ij}$  (где  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$  и  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ) и  $\kappa = \pm ik$ .

На границах пленки должны быть непрерывными компоненты  $h_\eta$  и  $b_\xi$ . Компонента  $h_\eta$  должна иметь вид

$$h_\eta = \exp(i\omega t - ik\eta) \begin{cases} h_+ \exp(-k\xi), & \xi > 0 \\ h_1 \exp(ik_1\xi) + h_2 \exp(ik_2\xi), & -d < \xi < 0 \\ h_- \exp[k(\xi + d)], & \xi < -d \end{cases}.$$

Компонента  $b_\xi$  может быть найдена из равенства  $b_\xi = \mu_{\xi\xi} h_\xi + \mu_{\xi\eta} h_\eta$ . Вместе с тем из уравнения  $\text{rot } \mathbf{h} = 0$  следуют равенства  $h_\zeta = 0$  и  $h_\xi = (i/k)(\partial h_\eta / \partial \xi)$ , так что расчет  $b_\xi$  строится только на основе приведенного выше выражения для  $h_\eta$ .

Условия непрерывности  $h_\eta$  и  $b_\xi$  на границах пленки дают систему линейных уравнений относительно  $h_+, h_1, h_2, h_-$ . Условие равенства нулю определителя этой системы приводит к конечному результату расчетов – к закону дисперсии. Причем возможны два варианта закона:

$$\tan \left[ \frac{kd \sqrt{(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 - 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}}}{2\mu_{\xi\xi}} \right] = \frac{\sqrt{(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 - 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}}}{\mu_{\xi\eta}\mu_{\eta\xi} - \mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - 1} \quad (10)$$

если  $(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 \geq 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}$ , и

$$\exp \left[ \frac{kd \sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2}}{\mu_{\xi\xi}} \right] = \frac{\left[ \sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2} - 2 \right]^2 + (\mu_{\xi\eta} - \mu_{\eta\xi})^2}{\left[ \sqrt{4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta} - (\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2} + 2 \right]^2 + (\mu_{\xi\eta} - \mu_{\eta\xi})^2}, \quad (11)$$

если  $(\mu_{\xi\eta} + \mu_{\eta\xi})^2 \leq 4\mu_{\xi\xi}\mu_{\eta\eta}$ .

**Выводы.** Законы дисперсии (10), (11) могут быть использованы в инженерных расчетах частотных характеристик пленочных элементов МСВ-устройств. Их можно использовать для прогнозирования спектров МСВ в пленках как существующих, так и разрабатываемых ферритов. В каждом конкретном случае отправной точкой расчета будет выражение для энергии магнитной кристаллографической анизотропии  $W_a(\mathbf{M})$ . Формула (3) позволяет связать компоненты тензора эффективных размагничивающих факторов с этой энергией, а выражения (6), (9) определяют связь факторов с компонентами ТМП, входящими в формулы (10), (11). Например, в упоминавшихся пленках железоиттриевого граната энергия анизотропии с достаточной для инженерных расчетов точностью описывается выражением:

$$W_a = K_{c1}(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + W_a^u, \quad (12)$$

где первое слагаемое описывает кубическую магнитную анизотропию данного феррита [2], причем  $\alpha_j$  – косинусы углов между вектором намагниченности и тремя кристаллографическими осями симметрии четвертого порядка, образующими прямоугольную систему координат. Второе слагаемое учитывает упоминавшуюся одноосную анизотропию. Методика расчета эффективных размагничивающих факторов, основанная на выражении (12), приведена, например, в работе [4].

### Список литературы

- [1] Гласс Х.Л. // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76, № 2. – С. 64-72.
- [2] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. – М.: Наука, 1994. – 464 с.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
- [4] Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Поверхностные магнитостатические волны в пленках кубических ферритов, ориентированных вдоль кристаллографических плоскостей симметрии // Наука и образование (электронное научно-техническое издание). – 2015, № 5. – С. 1-25. – DOI: 10.7463/0515.0771109.

**Тун Тун Лин** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tuntunlinn50@gmail.com

## **СЕКЦИЯ 4.**

# **ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ**

Я.А. Сафронова

## **АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПАКЕТА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ТУРБИНЫ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Вибрационная надежность лопаточного аппарата является одним из важных факторов эффективности турбоустановки. В турбинах конденсационного типа необходимо уделять большое внимание вибрационному состоянию лопаток группы последних ступеней части низкого давления, в особенности последней ступени. Дело в том, что ее лопатки имеют относительно большую длину ( $d/l = 2.4-3.5$ ), низкую собственную частоту колебаний и сравнительно легко возбуждаются силами, связанными с окружной неравномерностью давления в выходном патрубке турбины. Вследствие этого лопатки связываются в пакеты по 5-11 штук с помощью проволоки. В ряде случаев такая проволока устанавливается в два ряда по высоте лопатки. Это позволяет с одной стороны отстроить лопатки от резонанса, а с другой – ограничить в них уровень динамических напряжений при колебаниях.

При вращении ротора рабочие лопатки испытывают вибрационные нагрузки. В том случае, если собственная частота лопатки оказывается кратной частоте вращения (частоте возмущающего воздействия), имеет место резонанс, сопровождающийся резким ростом амплитуды колебаний лопатки. При этом на первой собственной частоте амплитуда вибрации максимальна, на второй - меньше, и далее - убывает по мере роста частот. Поэтому при проектировании длинномерных рабочих лопаток обязательно проводится вибрационная отстройка, которая заключается в обеспечении заданных интервалов между собственными частотами лопатки и частотами, кратными рабочей частоте вращения. Кроме того, при работе турбины в рабочих лопатках последних ступеней в результате аэровозбуждения могут возникать автоколебания с частотами, не кратными частоте вращения ротора. В связи с этим при разработке рабочих лопаток требуется обеспечить устойчивость конструкции к аэровозбуждению.

В случае резонанса или аэровозбуждения в теле лопатки возникают динамические напряжения, следствием которых являются усталостные повреждения, что особенно опасно для длинномерных рабочих лопаток. Поэтому вибрационная отстройка и снижение опасности аэровозбуждения, обеспечивающие повышение вибрационной прочности конструкции, являются необходимыми мероприятиями при проектировании длинномерных рабочих лопаток.

Для длинномерных лопаток практический интерес представляют первые две-три группы форм, которые находятся в диапазоне до 300 Гц и по-

этому подлежат обязательной отстройке. Наибольшую опасность представляют формы колебаний первой группы, имеющие наиболее низкие частоты. Отстройка этих форм колебаний является наиболее актуальной и требует реализации комплекса конструктивных мероприятий, эффективность которых должна быть подтверждена результатами расчетно-экспериментальных исследований. Применяемые в турбостроении нормы содержат требуемые интервалы отстройки частот для различных кратностей возбуждения. Так, например, для 2<sup>й</sup> кратности эта величина составляет 15% от рабочей частоты вращения, для 3<sup>й</sup> кратности - 8%, для 4<sup>й</sup> кратности - 6%, для 5<sup>й</sup> кратности - 5%, для 6<sup>й</sup> кратности - 4%.

В настоящей работе проведены численные исследования колебаний по нескольким формам пакета рабочих лопаток последней ступени турбины мощностью 48МВт с различными вариантами связей в пакете.

При помощи средств САПР SolidWorks были построены модели рабочей лопатки последней ступени без связи, с одной связью и с двумя связями. Данные модели были рассчитаны на критические частоты.

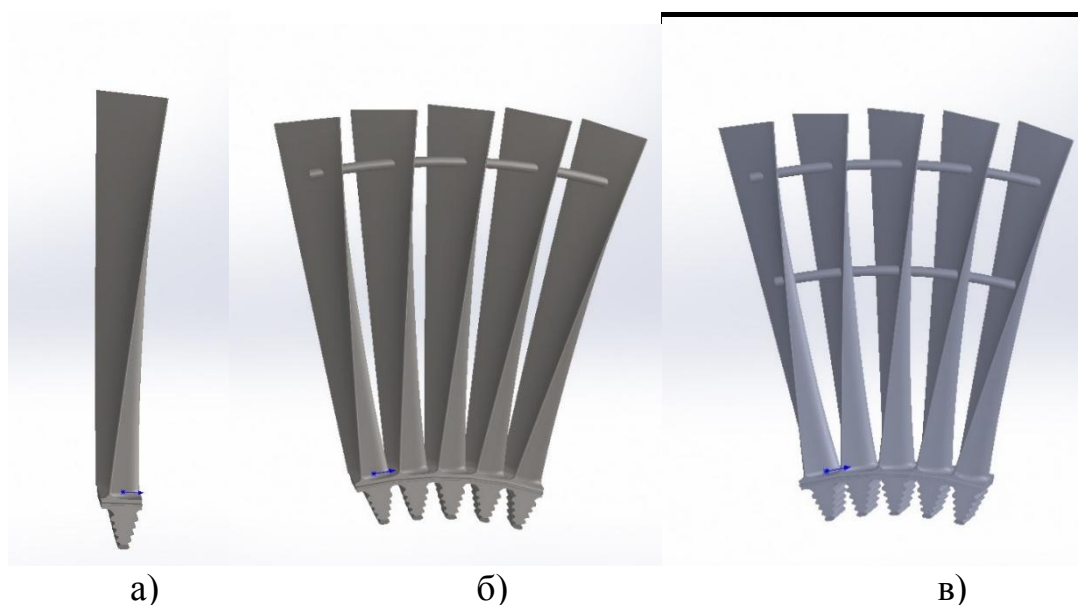


Рис. 1. а) – без связей, б) – с одной связью, в) – с двумя связями

Для определения критических частот были построены диаграммы Кэмпбелла для каждого варианта.

#### Диаграммы Кэмпбелла

Условия резонанса:

$$\Delta n > 15\% \text{ для } k = 2$$

$$\Delta n > 8\% \text{ для } k = 3$$

$$\Delta n > 6\% \text{ для } k = 4$$

$$\Delta n > 5\% \text{ для } k = 5$$

$$\Delta n > 4\% \text{ для } k = 6$$

Для лопаток с одной связью:

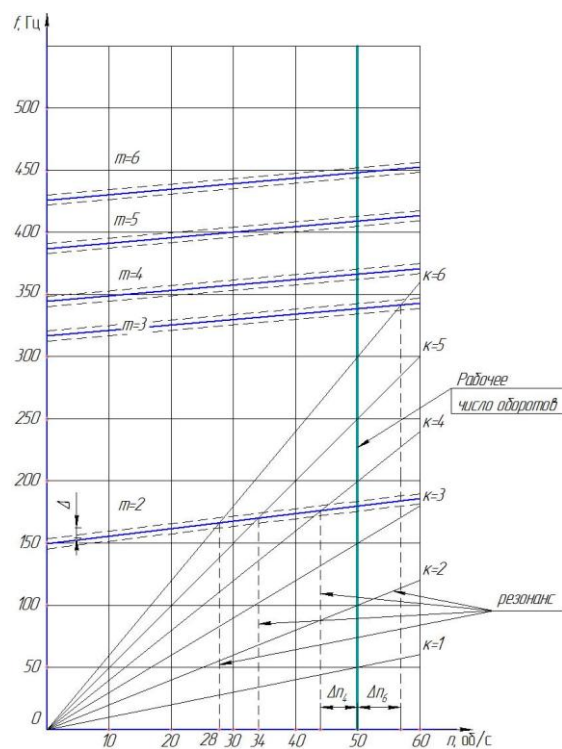


Рис. 2. Диаграмма Кэмпбелла для лопаток с одной связью

Наиболее опасные числа оборотов:

$$\Delta n_4 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 17\% - \text{удовлетворяет условиям}$$

$$\Delta n_6 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 12\% - \text{удовлетворяет условиям}$$

Для лопаток с двумя связями:

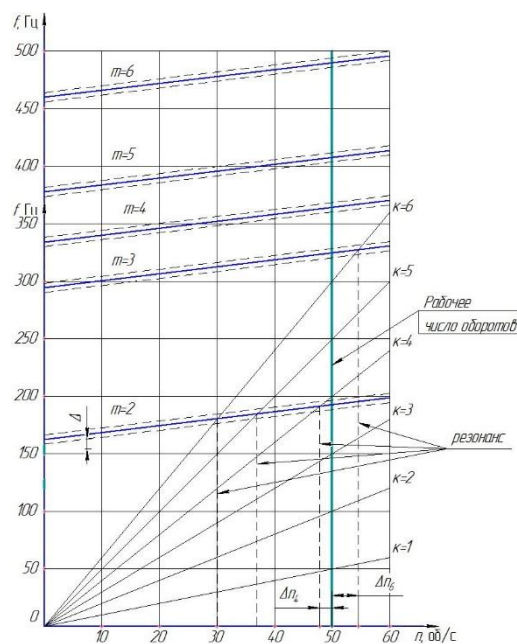


Рис. 3. Диаграмма Кэмпбелла для лопаток с двумя связями

Наиболее опасные числа оборотов:

$$\Delta n_4 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 12\% - \text{не удовлетворяет условиям}$$

$$\Delta n_6 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 8\% - \text{удовлетворяет условиям}$$

Для лопаток без связей:

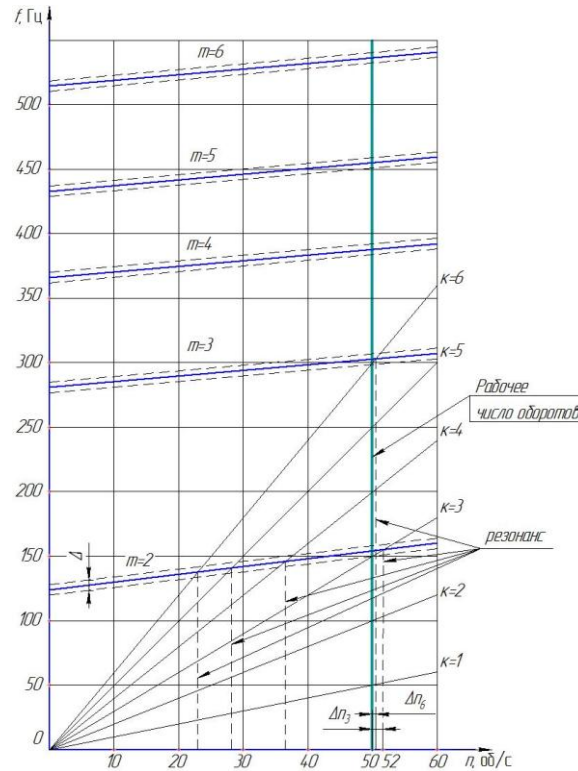


Рис. 4. Диаграмма Кэмпбелла для лопаток без связей

Наиболее опасные числа оборотов:

$$\Delta n_3 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 4\% - \text{не удовлетворяет условиям}$$

$$\Delta n_6 = \frac{n - n_{рез}}{n} \cdot 100\% = 1\% - \text{не удовлетворяет условиям}$$

Сделан вывод о том, что критические частоты возникают в каждой из моделей лопаток, но лучшим вариантом оказалась лопатка с одной связью. Полученные частоты удовлетворяют условиям кратности. В остальных случаях критические частоты оказались близки к рабочей частоте вращения.

### Список литературы

[1] А.А. Жинов «Комплекс программ для расчета осевой паровой турбины по среднему диаметру», 1997.

[2] А.А. Канаев, М.И. Корнеев «Парогазовые установки. Конструкции и расчеты», 1974. – 240с.



- [3] А.А. Сидоров, методическое пособие «Проектирование осевых ступеней большой веерности» М.: 2012г, 50с.
- [4] А.В. Щегляев «Паровые турбины», т. 1, т. 2, 1993.
- [5] А.Д. Трухний «Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки» М.: Издательство МЭИ, 2002г, 539с.
- [6] В.И. Кирюхин «Паровые турбины малой мощности КТЗ» М.: Энергоатомиздат, 1987г, 215с.
- [7] В.Я.Рыжкин «Тепловые электростанции» М.: Энергоатомиздат, 1987г, 327с.
- [8] Г.С. Жирицкий «Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин» М.: 1968г, 517с.
- [9] Дейч, Атлас профилей турбинных лопаток.
- [10] Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе «Теплофикационные паровые турбины», 1986.
- [11] И.И. Кириллов «Теория турбомашин», 1972.
- [12] К.В. Холщевников «Теория и расчет авиационных лопаточных машин». М.: Машиностроение, 1970. - 611 с., ил.
- [13] М.А. Трубилов «Паровые и газовые турбины» М.: Энергоатомиздат, 1985г, 350с.
- [14] М.П. Вукалович, С.Л. Ривкин «Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара» М.: Издательство стандартов. 1969г,84с.
- [15] Электронный ресурс: <http://www.iqlib.ru/book/preview/6E0D457CF26F4288B5839EAD4433AC60>

**Сафронова Яна Андреевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: safronovayna17@gmail.com

Д.В. Шевелев, А.С. Матвеев

## **АНАЛИЗ СХЕМ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ГТУ И ПТУ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ОДНОКОНТУРНЫМ КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Производство электрической энергии осуществляется путем преобразования различных видов энергии в электрическую на промышленных объектах, называемых электростанциями. В настоящее время, наибольшая доля вырабатываемой электроэнергии в мире приходится на тепловые электрические станции (ТЭС). На электростанциях этого типа, в электричество преобразуется химическая энергия органического топлива (газа, мазута, угля). Этот процесс осуществляется в три этапа. В начале, за счет сжигания топлива происходит выделение тепла. Вторым этапом, полученное тепло преобразуется в механическую энергию практической реализацией цикла теплового двигателя. Третьим этапом происходит преобразование механической энергии вращающегося вала двигателя в электрическую за счет привода электрогенератора.

Основными типами тепловых двигателей, используемых на современных ТЭС, являются газотурбинные (ГТУ) и паротурбинные установки (ПТУ). ТЭС на базе ПТУ отличается сравнительно высоким КПД, большая единичная мощность, возможность работы на твердом топливе. К числу основных недостатков следует отнести большое время строительства, сложность инфраструктуры. К числу основных достоинств ТЭС на базе ГТУ (ГТЭС) следует отнести высокую маневренность, быстрое время строительства. Основным недостатком ГТЭС – это сравнительно низкий КПД, обусловленный большими потерями энергии с горячими выхлопными газами газотурбинного двигателя.

Достоинства ТЭС на базе ГТУ и ПТУ сочетают в себе парогазовые установки (ПГУ). В ПГУ теплота уходящих газов ГТУ направляется в котел-утилизатор, в котором происходит генерация пара, который совершает полезную работу в ПТУ. Парогазовые установки отличаются [1]:

- высокий КПД – в зависимости от используемой схемы от 50 до 64%;
- умеренная стоимость установленной единицы мощности, что связано с меньшим объемом строительной части, отсутствием сложного энергетического котла, дорогой дымовой трубы, использованием более простой паровой турбины и системы технического водоснабжения;
- существенно меньший строительный цикл (9-12 мес.);
- большая по сравнению с ГТУ единичная мощность.

В России мощность газомазутных энергоблоков, работающих с КПД 35-40 % составляет 35 ГВт. Замена их парогазовыми установками россий-

ского производителя в рамках импортозамещения позволит сэкономить 30-40% природного газа или вырабатывать на том же газе на 30-40% больше электроэнергии [3]. В настоящее время в РФ разработано, производится и может поставляться на электростанции все основное оборудование и для создания парогазовых установок: котлы-утилизаторы, паровые турбины, насосы и т.д. В Таблицах 1-2 представлены параметры ключевых компонентов ПГУ российского производства [5]

Таблица 1

Отечественные ГТУ, применяемые в парогазовых установках

	ГТЭ-18 "Уфа"	ГТУ- 25П	ГТЭ-30	ГТЭ-65	ГТД-110
Мощность на валу, МВт	18	25,6	30,5	65	114,5
КПД на валу, %	34	39,2	26,6	35,2	36
Температура газа на выхлопе, °С	515	488	430	555	517
Расход газа на выхлопе, кг / с	67	79,6	190,3	184	362
Стоимость, млн. руб	-	375	-	-	1000

Таблица 2

Отечественные ПТУ, применяемые в парогазовых установках

	К-40-62	К- 55-90	К-63-8,8	К-100-90	К-110-140
Мощность на валу, МВт	40	55	63,5	110	110
Расход свежего пара, т / ч	162	235	247	420	325
Температура свежего пара, °С	505	535	535	535	535
Давление свежего пара, МПа	6,1	8,8	8,8	8,8	13,7
Стоимость, млн. руб	250	300	300	400	400

Следует отметить, что в настоящее время в РФ освоено серийное производство энергетических установок в диапазоне мощности от 16 до 25 МВт. ГТУ большой мощности отечественного производства находятся только в опытно-промышленной эксплуатации.

Произведено исследование двух возможных схем ПГУ на базе паровых и газовых турбин:

- Схема 1 – 2 ГТД 110 и ПТУ К- 110-140 (Рис. 1);
- Схема 2 – 8 ГТУ-25П и ПТУ К-110-140 (Рис. 2);

Все дополнительное оборудование принимается одинаковым в двух схемах. Принимаем давление в конденсаторе равным 10 кПа.

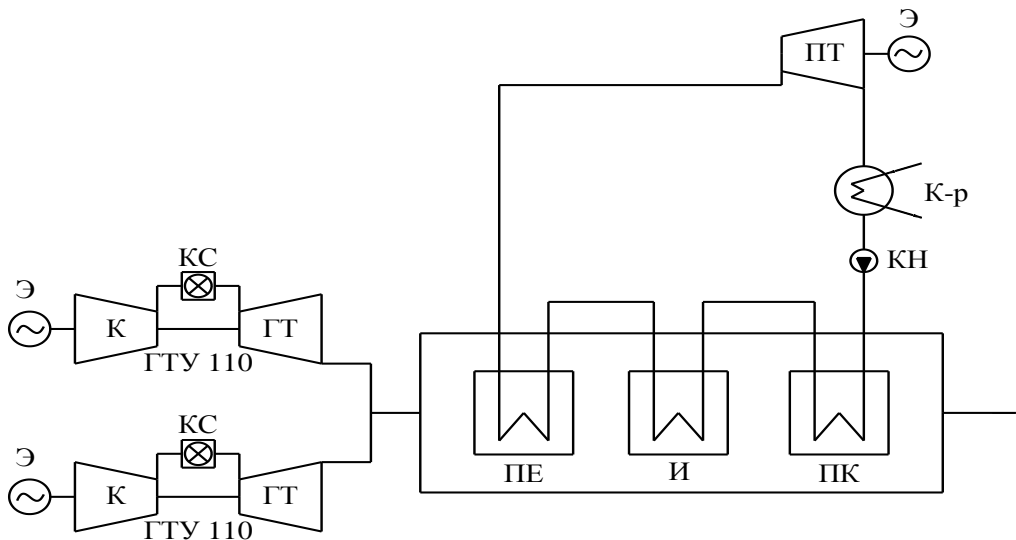


Рис. 1. Схема ПГУ на базе двух ГТД110:

К – компрессор; ГТ – газовая турбина; Э – электрогенератор; КС – камера сгорания;  
 К-р – конденсатор; КН – конденсационный насос; ПК – подогрев конденсата;  
 И – испаритель; ПЕ – перегрев пара

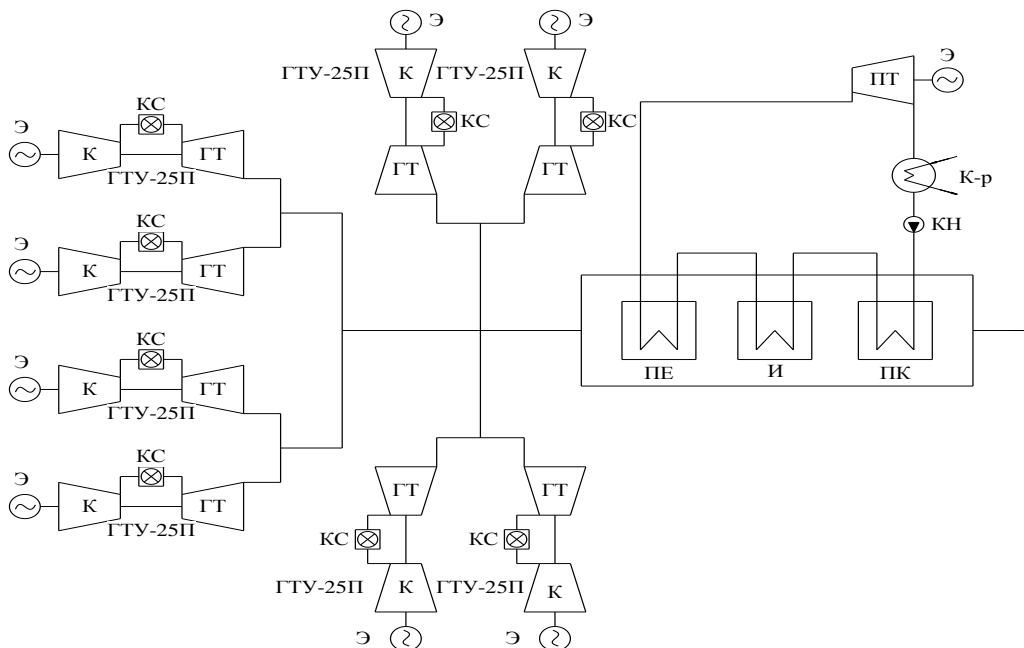


Рис. 2. Схема ПГУ на базе 8 ГТЭ-25П

Термодинамический расчет предложенных схем проводился в программе GateCycle. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

	ПГУ с ГТД 110	ПГУ с ГТЭ-25П
Мощность ГТ, МВт	216,7	214,9
Мощность ПТ, МВт	102,8	103,7
Тепловая мощность ПГУ, кДж/кВт*с	1,89	1,90
КПД ПГУ, %	52,9	52,6
Мощность ПГУ, МВт	319,5	318,6

Расчет показал, что мощностные показатели и показатели эффективности рассмотренных схем сопоставимы. Тем не менее, предпочтительным видится схема 1, так как использование большого количества ГТУ малой мощности приводит к следующим недостаткам:

- увеличение расходов на дополнительное оборудование ГТУ;
- усложнение системы газоходов;
- увеличение потерь полного давления в системе газоходов;
- меньшая надежность;
- меньше ресурс ГТУ на базе авиационных двигателей;
- большая стоимость газотурбинного оборудования 8 ГТЭ - 25П (3 млрд. рублей) вместо двух ГТЭ - 110 (2млрд. рублей),
- большие затраты на обслуживание и ремонт 8 установок, вместо двух.

### **Список литературы**

[1] *Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г.* Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 247 с., ил.

[2] *Зысин В.А.* Комбинированные парогазовые установки и циклы – 3-е изд., стер. – М.: ГЭИ, 1962. – 187 с.: ил.

[3] *Петрова С. С., Васильева О. А.* Производство электрической энергии. Учебное пособие. – СПб.: СПбГПУ, 2012.

[4] *Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.* Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – 3-е изд., стер. – М.: МЭИ, 2009. – 584 с.

[5] Каталог энергетического оборудования. Издательство «Газотурбинные технологии». 2010 г.

**Шевелев Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

**Матвеев Александр Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fomas553@yandex.ru

А.А. Каретин, Н.В. Гридчин

## **ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СТУПЕНИ НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для создания высокоэффективной центробежной турбомашины необходим комплексный подход проектировщика, который включает в себя точный расчет параметров ступени по одной из методик, и эксперимент, подтверждающий или опровергающий предъявляемые в технических требованиях характеристики изделия.

На сегодняшний день существует множество методик, разной степени сложности, позволяющие спроектировать компрессор [1-5]. Однако все они основаны на одно- и двумерных моделях потока, и содержат в себе массу допущений, что приводит к неточности расчета. Поэтому после получения в процессе расчета геометрии проточной части компрессора необходимо оценить его эффективность.

Оценить совершенство спроектированного компрессора можно двумя методами: экспериментальным и расчетным.

Первый метод предполагает создание спроектированного компрессора, испытание его в интересующих нас условиях и на разных режимах работы. Такой способ является наиболее точным. Однако он имеет ряд существенных недостатков. В частности, для проведения эксперимента необходимы значительные материальные и временные затраты, а также наличие специального стенда, вспомогательных систем и квалифицированного персонала. Кроме того, эксперимент не всегда может воспроизвести условия работы компрессора в самом изделии, а ограниченные возможности экспериментального стенда не позволяют получить исчерпывающую информацию обо всех параметрах.

Второй метод изучает структуру потока с помощью численных методов газовой динамики, основанных на решении уравнений Навье – Стокса, описывающие движение газа с минимальным количеством допущений (т.н. CFD расчет) [6-8].

Этот способ исследования требует существенно меньших материальных затрат и времени. Он обладает высокой интерактивностью результатов, позволяет узнать любой параметр в любой расчетной области, а также позволяет смоделировать любые условия работы компрессора. Однако не стоит забывать, что в основе численного моделирования лежит наше понимание физических процессов происходящих в турбомашине в виде уравнений.

Численное моделирование является относительно точным способом проверки эффективности и результатов расчета. Он позволяет многократно сократить необходимое число испытаний.

Данная работа включает в себя расчет центробежной ступени нагнетателя природного газа по заданным исходным данным, а также сопоставление результатов расчета и численного моделирования.

Нагнетатель природного газа – двухступенчатый, мощностью 25 МВт, степень повышения давления 1,44. Первая ступень нагнетателя состоит из осерадиального рабочего колеса закрытого типа с 12 лопатками, безлопаточного диффузора и лопаточного диффузора с 25 лопатками. Модель рабочего колеса представлена на рисунке 1.

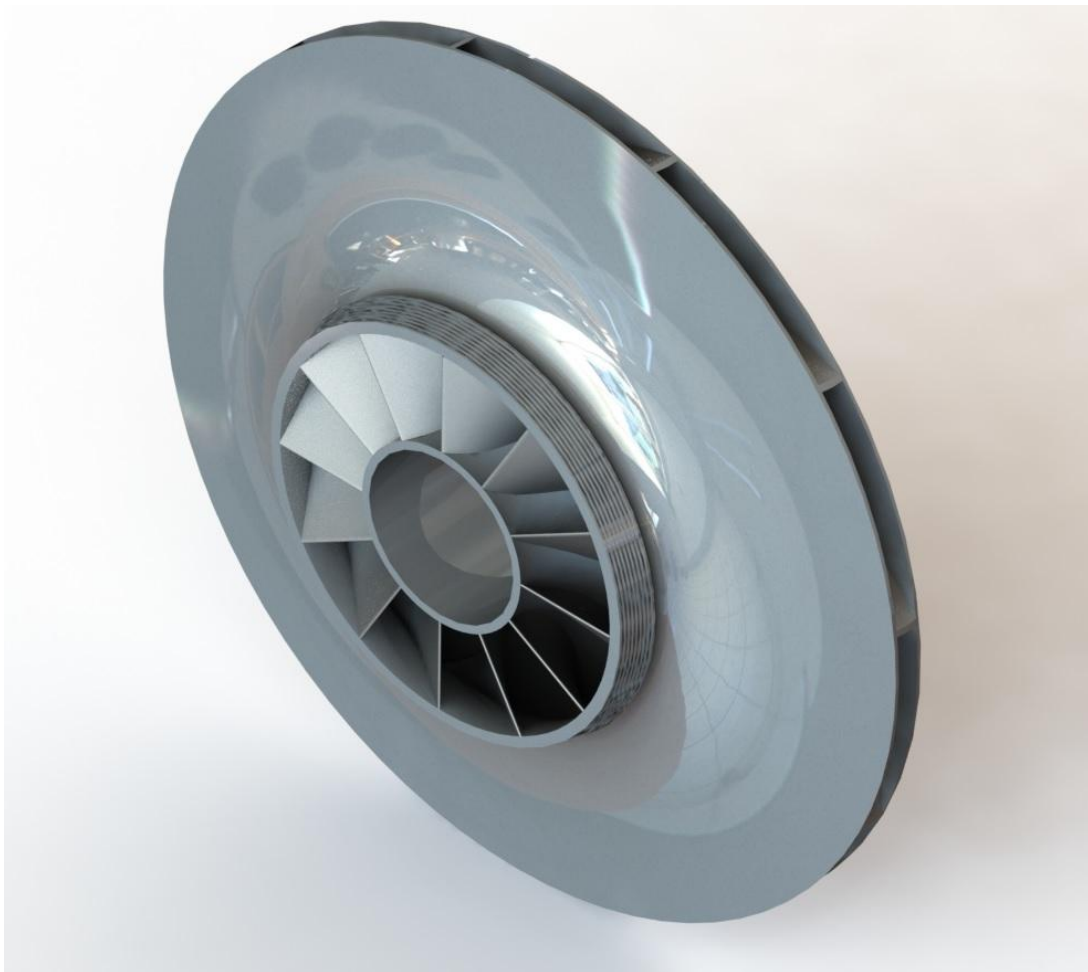


Рис. 1. Модель рабочего колеса первой ступени центробежного нагнетателя

Численное моделирование проводилось средствами программного комплекса Ansys CFX. Структурная схема расчетной задачи представлена на рисунке 2.

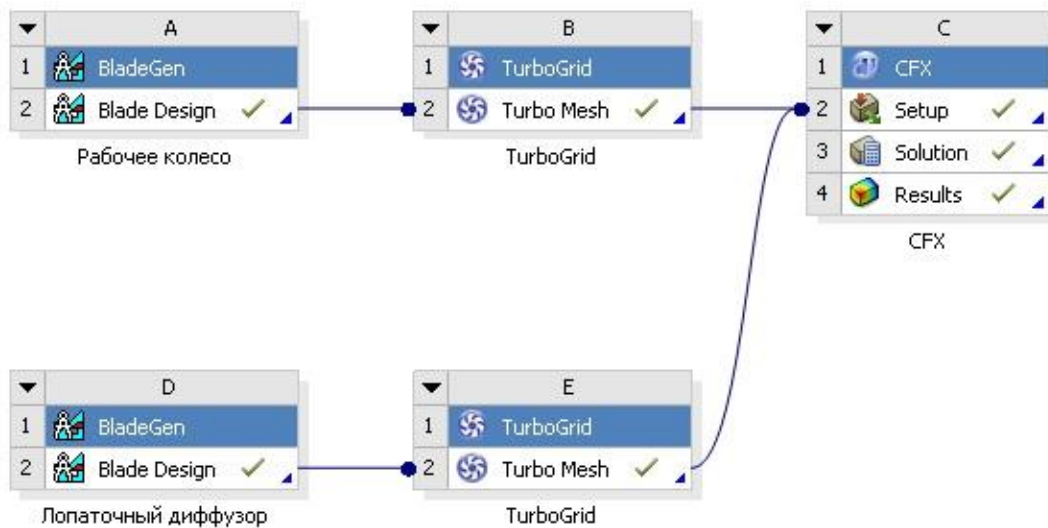


Рис. 2. Структурная схема расчетной задачи

Данная схема включает в себя:

- построение геометрии рабочего колеса и лопаточного диффузора средствами программы BladeGen, входящей в состав Ansys Workbench, на основе данных, полученных в расчете;
- создание расчетных моделей течения газа в рабочем колесе и лопаточном диффузоре и разбиение их структурной сеткой конечных элементов;
- создание численной модели ступени компрессора на базе созданных расчетных моделей, задание граничных условий (массовый расход на входе, статическое давление на выходе), расчет и обработка его результатов с помощью программы Ansys CFX.

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 3...5.

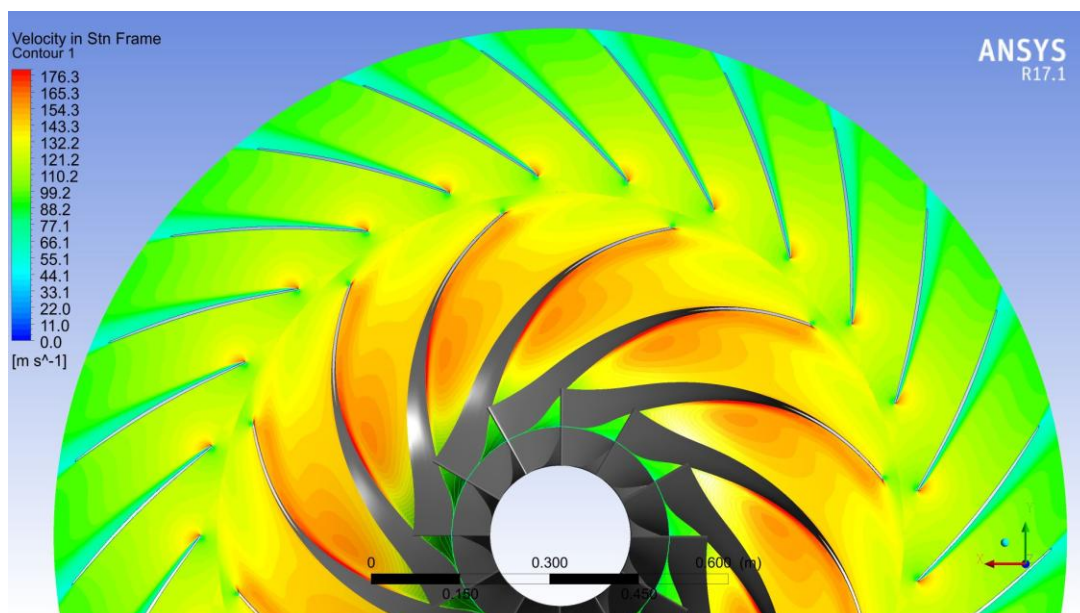


Рис. 3. Эпюра скоростей по средней линии тока



По рисунку 3 можно сказать, что сходимость результатов расчета и численного моделирования хорошая. Сравнивая значения в характерных точках ступени (на входе в рабочее колесо, на выходе из рабочего колеса, на выходе из безлопаточного диффузора, на выходе из лопаточного диффузора) разница составляет менее 5%.

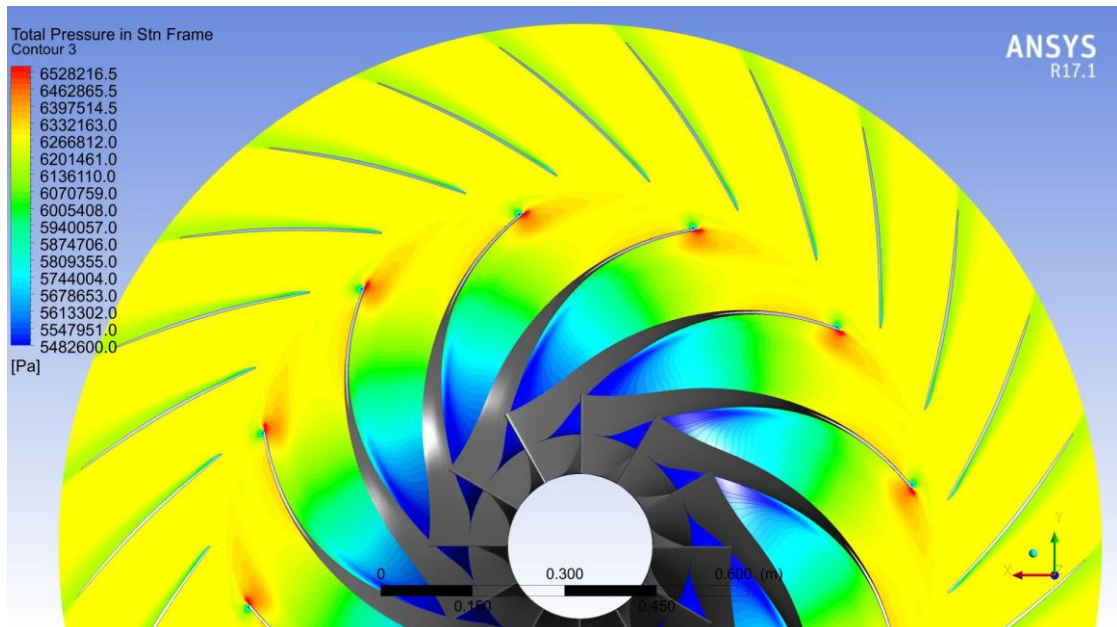


Рис. 4. Эпюра полного давления по средней линии тока

Рисунок 4 показывает изменение давления в ступени. Можно отметить, что в лопаточном диффузоре полное давление снижается, несмотря на однотонный цвет на рисунке из-за большого диапазона шкалы. Разница между степенью повышения давления, полученного в результате численного моделирования и расчетного, составила менее 2,5%.

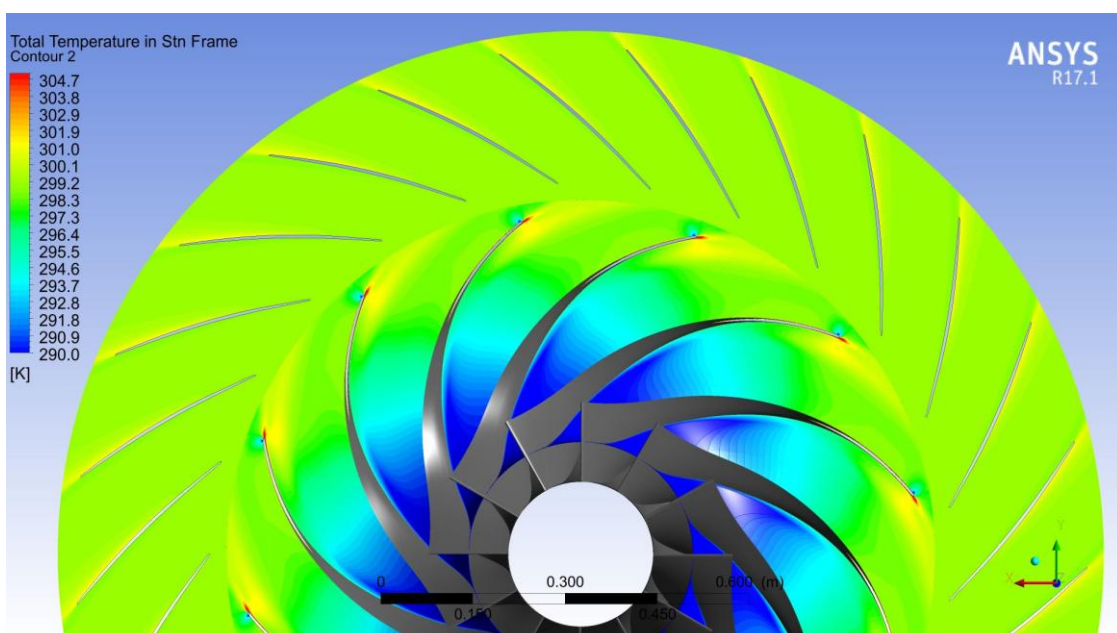


Рис. 5. Эпюра полной температуры по средней линии тока

На рисунке 5 можно наблюдать изменение полного давления в ступени. Повышение давления происходит только в рабочем колесе, где к рабочему телу подводится работа, причем можно отметить небольшое повышение температуры у спинки лопаток лопаточного диффузора. Это связано со срывными явлениями и трением между слоями жидкости, наблюдаемыми на рисунке 3, и является следствием несовершенности геометрии диффузора.

В дальнейшем необходимо более подробно исследовать безлопаточный и лопаточный диффузоры и процессы, происходящие в них, так как эта часть ступени сильно влияет на эффективность всего нагнетателя.

В ходе обработки результатов численного моделирования разница параметров с результатами расчета составила менее 5%, что может говорить о высокой точности данного метода моделирования.

### **Список литературы**

[1] Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

[2] Белоусов А.Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – Самара: ФГУП «Издательство Самарский Дом печати», 2003. – 336 с.

[3] Гридчин Н.В., Ладосин А.М. Расчет и проектирование ступени центробежного компрессора. Методические указания к курсовому проекту по курсу «Компрессоры» и выполнению выпускной квалификационной работы. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – 74 с.

[4] Jarice D., Baines N.C., Introduction to Turbomachinery. Concept NREC ETI INC.

[5] Lewis R. I., 1996, Turbomachinery Performance Analysis, Elsevier Science & Technology Books.

[6] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711с.

[7] Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах/ Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384с.

[8] Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2-х томах/ К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 1056с.

**Каретин Алексей Алексеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: karetin\_aleksei@mail.ru

**Гридчин Николай Викторович** – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Е.А. Юрик, Р.И. Мусин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рабочие лопатки и диски являются одними из основных и ответственных конструктивных элементов паровой турбины. Поэтому, вопросы прочностной и вибрационной надежности данных элементов имеют первостепенное значение как при проектировании, так и при эксплуатации. В данной работе описывается метод расчета вибрационных характеристик рабочего колеса (облопаченный диск) с использованием САЕ-системе ANSYS Mechanical.

Основными вибрационными характеристиками рабочего колеса выступают критические частоты вращения ротора, которые должны быть отстроены от рабочей частоты вращения согласно принятым в турбостроении нормам [1]. Они определяются из условия резонанса:

$$f_i^m(n) = kn_{кр},$$

где  $f_i^m(n)$  –  $i$ -я собственная частота рабочего колеса с  $m$  узловыми диаметрами при угловой скорости вращения ротора  $n$ , Гц;  $n_{кр}$  – критическая частота вращения ротора, об/с;  $k$  – кратность гармоника возмущающей силы.

Диски должны конструироваться таким образом, чтобы рабочее число оборотов не являлось критическим для колебаний с числом узловых диаметров от двух до шести. Для колебаний с двумя узловыми диаметрами рекомендуется иметь запас между рабочим числом оборотов и критическим в 15%, для колебаний с тремя и четырьмя узловыми диаметрами 10% и для колебаний с пятью и шестью узловыми диаметрами 5%.

### Построение модели рабочего колеса паровой турбины

В качестве исследуемого объекта было выбрано рабочее колесо последней ступени паровой турбины, прототипом которой, является турбина ОАО «КТЗ» Т – 8,5/10,2 – 3,4/0,18. Модель для проведения расчета была построена в программе SolidWorks по следующим исходным данным:

- Геометрические размеры диска снимались с прототипа;
- Модель пера лопатки строилась по альбому профилей ОАО «КТЗ»;
- Число рабочих лопаток в колесе  $z_p = 100$ ;
- Материал лопатки сталь 12Х13Ш;
- Диаметр проволок с вертикальным разъемом  $d_{пр} = 8$  мм;

Ввиду циклической симметрии задачи использовался сектор рабочего колеса, содержащий одну лопатку. Для проведения модального анализа модель рабочего колеса была существенно упрощена за счет удаления всех галтелей. С целью построить более точную расчетную сетку тело пера лопатки было разбито на три части. По этой же причине хвостовик лопатки и полотно диска были разделены на отдельные элементы. Полученная модель представлена на рисунке 1.

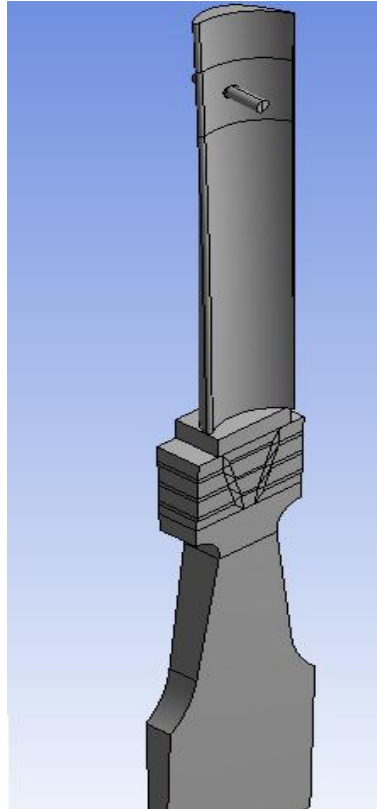


Рис. 1. Модель сектора рабочего колеса

### **Расчет вибрационных характеристик рабочего колеса**

Для проведения модального анализа модель рабочего колеса переносится в ANSYS Mechanical. Далее строится несогласованная расчетная сетка на отдельных телах модели. Конечно-элементная модель, состоявшая из 75461 преимущественно гексаэдральных конечных элементов, представлена на рисунке 2.

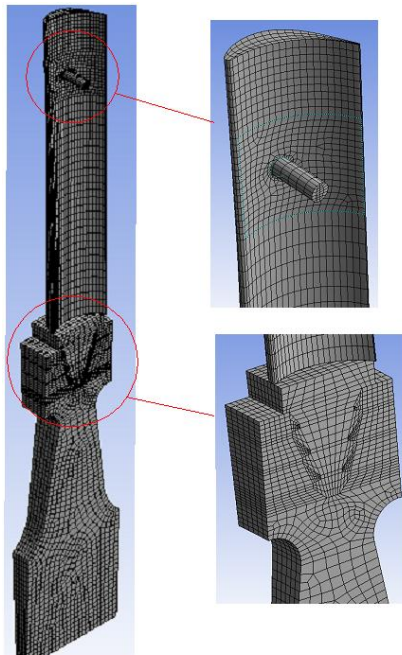


Рис. 2. Конечно-элементная модель сектора диска

После создания сетки необходимо установить требуемые для данного анализа граничные условия:

1. На опорных поверхностях зубьев хвостовика лопатки и гребней диска задавалось условие совместной деформации. Также связывались перемещения проволоки и лопатки в точке касания проволоки кромок отверстия;

2. На циклически симметричных поверхностях диска и проволоки задавалось условие циклической симметрии;

3. На поверхности втулки диска запрещались все перемещения;

4. Расчеты проводились в диапазоне изменения окружной скорости вращения ротора  $10 \div 60$  об/с с шагом 10 об/с;

5. Рабочее число оборотов ротора  $n_{\text{раб}} = 3000$  об/мин;

6. Свойства материала были приняты:

– модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;

– плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;

– коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

#### **Анализ результатов расчета**

Результаты расчета значений собственных частот вращающегося диска, при различных скоростях вращения представлены в таблице №1. Собственные формы колебаний с числом узловых диаметров  $m = 1 \div 6$ , полученные в ходе расчетов на рабочем числе оборотов (50 об/с) приведены в таблице №2.

По результатам расчета была построена Кемпбелл – диаграмма рабочего колеса, которая представлена на рисунке 3. Методика построения Кемпбелл-диаграммы представлена в [2]. Точки пересечения кривых частот назад бегущих волн с осью абсцисс являются критическими, так как образуются неподвижные в пространстве волны. Так же, критические скорости вращения появляются в точках пересечения формы колебания с соответствующей кратностью. Пересечение лучей кратности с линиями назад бегущих волн определяет резонансные числа оборотов. В практике конструирования турбин обычно считаются лишь с критическими числами оборотов. Анализ Кемпбелл – диаграммы показал, что вибрационные характеристики данного рабочего колеса отвечают принятым в стационарном турбостроении нормам, поскольку в соответствии с ними отстройка механической системы от низкочастотных возмущающих сил проводится до 6-й кратности включительно.

## Результаты расчета

Скорость вращения, об/с	Собственная частота вращающегося диска, Гц					
	m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6
10	261,2	269,3	293,3	320,8	340,7	354,6
20	262,5	270,5	294,7	322,2	342,1	356
30	264,7	272,7	296,9	324,4	344,4	358,4
40	267,6	275,6	299,9	327,6	347,7	361,7
50	271,4	279,3	303,7	331,5	351,7	365,9
60	275,9	282,8	308,4	336,3	356,7	371

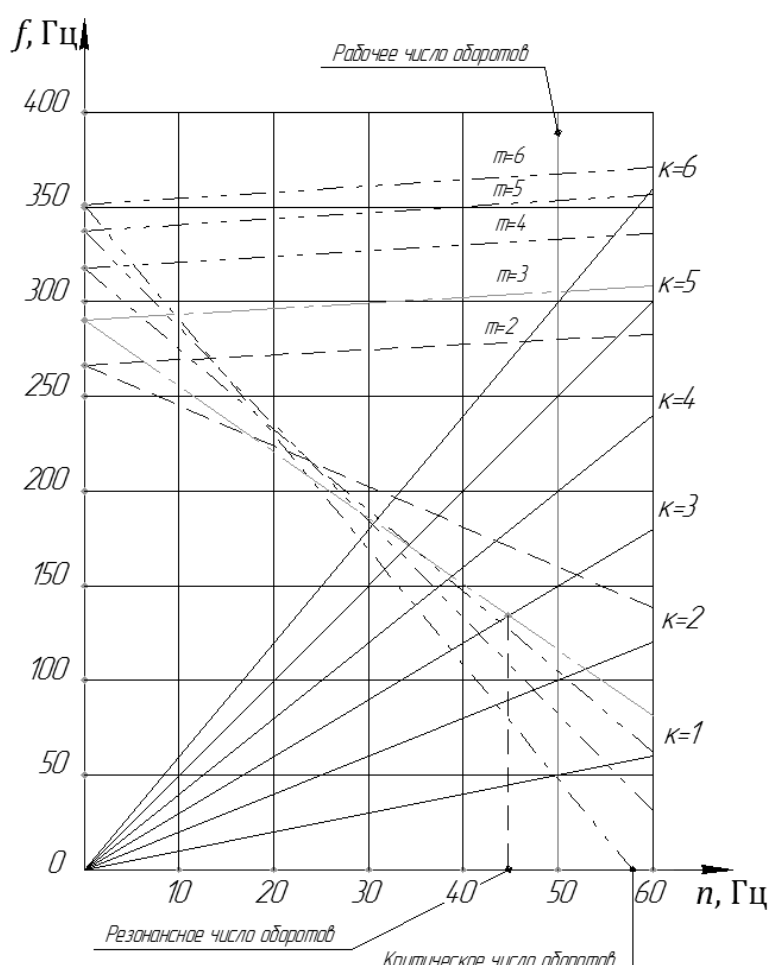
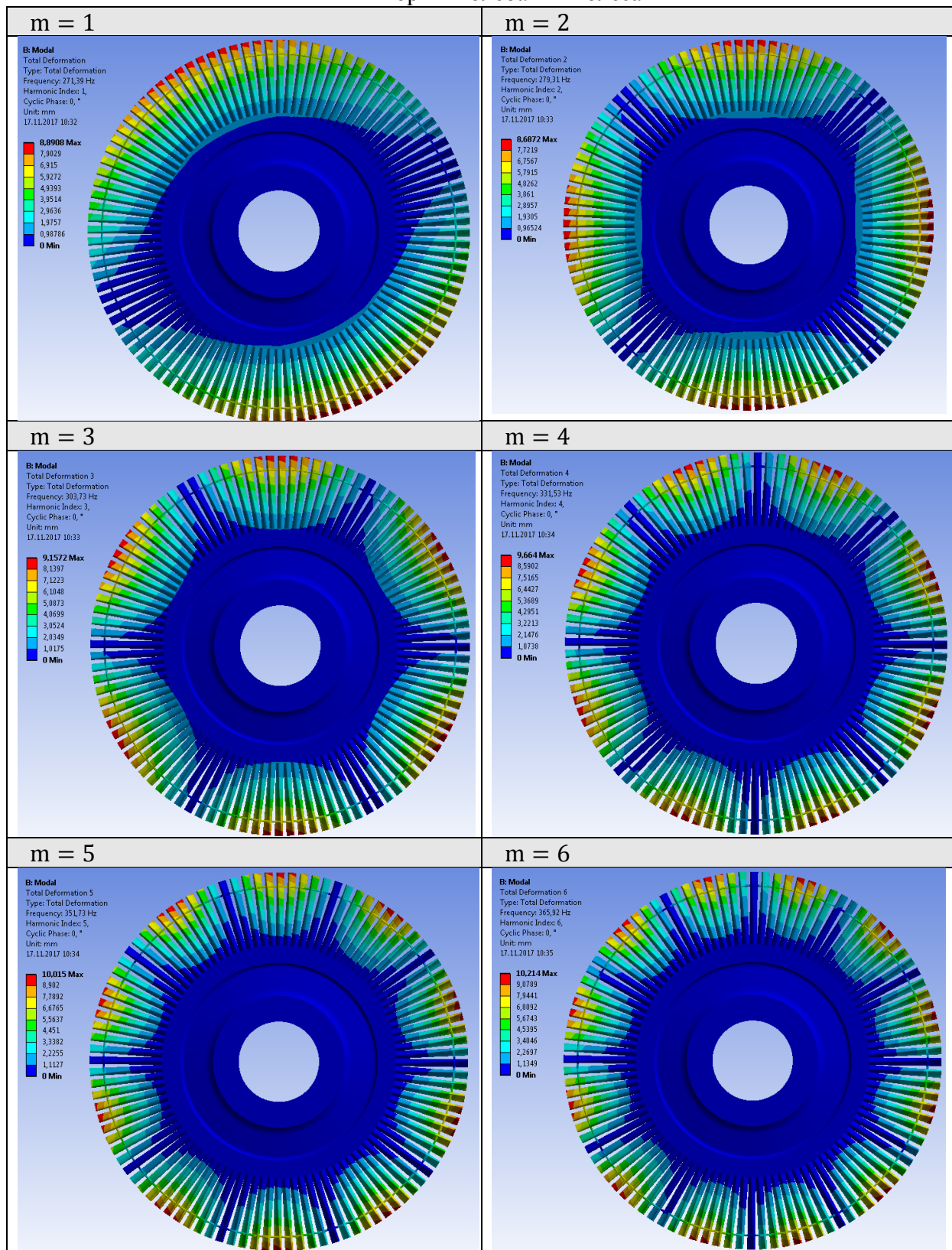


Рис. 3. Кемпбелл-диаграмма рабочего колеса



Формы колебаний колеса



## **Вывод**

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что данный метод расчета вибрационных характеристик рабочего колеса паровой турбины является достаточно точным. Это может подтвердить тот факт, что полученные значения частот совпадают с результатами расчета, проведенного в специализированной программе VIBR. Использование CAE-системы ANSYS Mechanical для данного вида расчета является вполне оправданным.

## **Список литературы**

[1] Нормы на вибрационную отстройку лопаток паровых турбин, РТМ 108.021.03-77, НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, 1978

[2] Г.С. Жирицкий «Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин» М.: 1968г, 517с.

[3] В. И. Кирюхин «Паровые турбины малой мощности КТЗ» М.: Энергоатомиздат, 1987г, 215с.

[4] Б.Т. Рунов «Исследование и устранение вибраций паровых турбоагрегатов» М.: Энергоатомиздат, 1982г, 351с.

[5] А.Д. Трухний «Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки» М.: Издательство МЭИ, 2002г, 539с.

**Юрик Елена Алексеевна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ea Yuri k@gmail.ru

**Мусин Роман Ильдусович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zenitromanmusin@gmail.com



П.М. Сидоров, Д.В. Шевелев

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА В CFD ПАКЕТЕ FLOWVISION

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Создание высокоэффективной центробежной ступени компрессора (ЦБК) требует проведения численного моделирования газодинамических процессов в CFD пакетах, т.к. традиционные методики расчета и профилирования [1, 2, 3, 4], не позволяют получить КПД такой ступени выше 76...81%. Численное моделирование позволяет получить трехмерную картину течения по всей проточной части компрессора, анализ которой дает возможность определить причину снижения его эффективности. Кроме того, процесс оптимизации геометрических характеристик ЦБК значительно упрощается и удешевляется снижением объема натурных экспериментальных исследований. Численное моделирование газодинамических процессов основано на приближенном решении уравнений Навье-Стокса, поэтому актуальной является задача верификации результатов моделирования сравнением с результатами натурального эксперимента.

Для проведения численного моделирования термогазодинамических процессов в исследуемой ступени центробежного компрессора был выбран программный комплекс FlowVision [5].

**Исходные данные для расчета.** На рис. 1 показана характеристика ступени центробежного компрессора, полученная в ходе натурального эксперимента. Для расчета была выбрана частота вращения ротора  $n=37280$  об/мин (3903 рад/с) и массовый расход воздуха  $G_{пр}=1,5$  кг/с (этому режиму работы ЦБК соответствует  $\pi_k^* = 3,25$ ;  $\eta=0,77$ ).

**Подготовка геометрии.** 3D-модель элементов проточной части ступени компрессора были создана в системе автоматизированного проектирования (CAD) вне программного комплекса FlowVision (рис. 2).

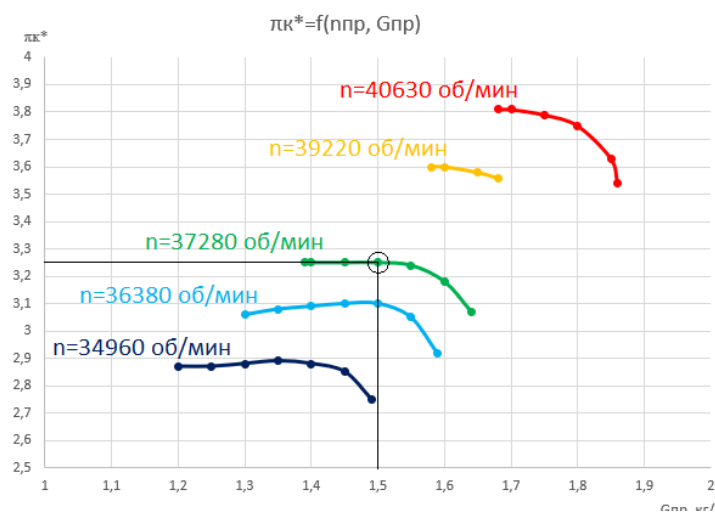


Рис. 1. Характеристика ступени центробежного компрессора, полученная в ходе натурального эксперимента



Рис. 2. 3D-модель элементов проточной части ступени компрессора

Далее, методом вычитания 3D-модели элементов ступени компрессора из замкнутого объема, была создана 3D-модель «жидкого» объема расчетной области, которая была разбита на 4 подобласти: входное устройство, рабочее колесо, радиальный диффузор, осевой диффузор. Так как течение в ступени компрессора осесимметричное, для ускорения расчета каждая из подобластей в свою очередь была разбита на сектора (рис. 3). В каждой подобласти был оставлен только один сектор, эта геометрия была импортирована во FlowVision.

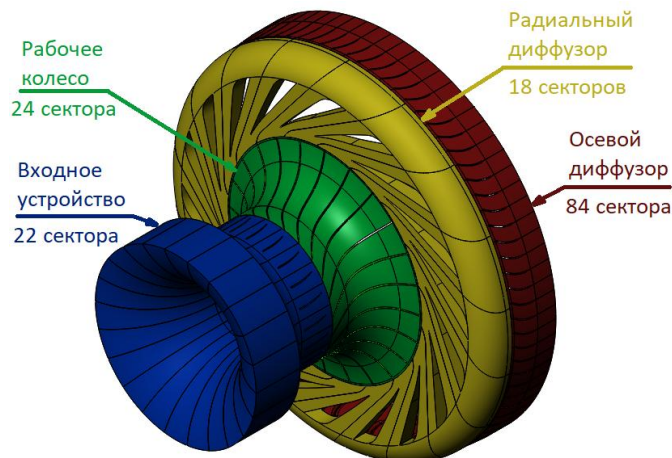


Рис. 3. Создание геометрии расчетной области во внешней CAD-системе

**Физическая модель.** В основе принятой расчетной модели лежит система уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости. В качестве модели турбулентности была задана стандартная  $k-\varepsilon$  модель;

**Граничные условия.** На рис. 4 показана расстановка граничных условий (ГУ).

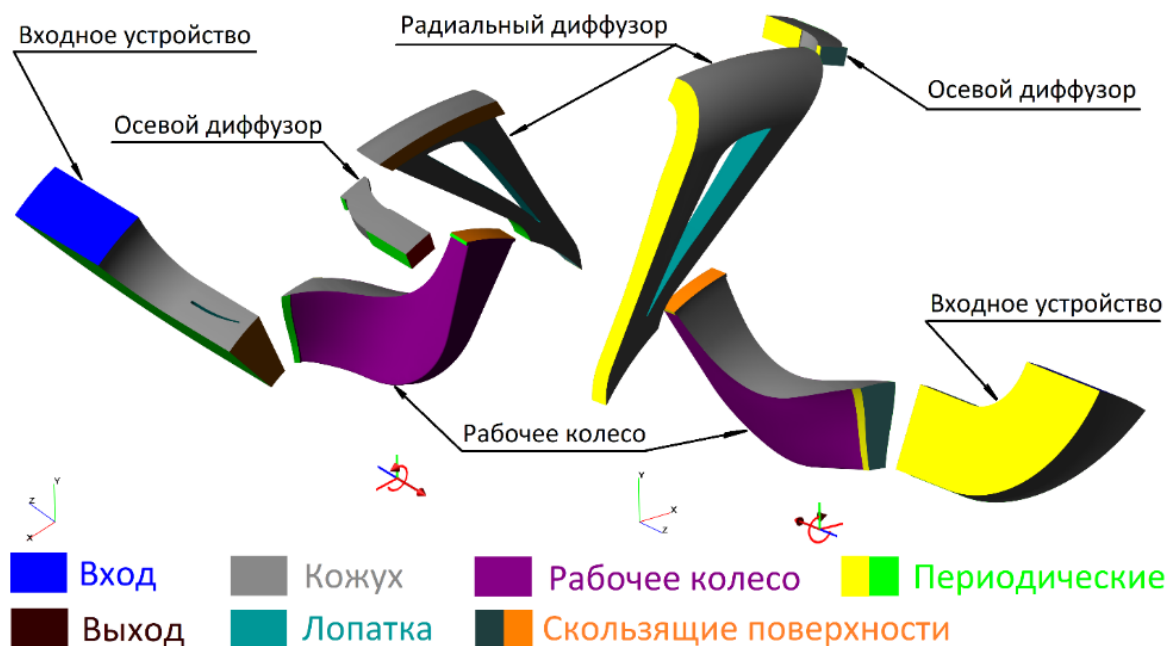


Рис. 4. Расстановка граничных условий

На входе в расчетную область заданы параметры окружающей среды ( $p_n = 101300$  Па,  $T_n = 288$  К).

На выходе из расчетной области была задана нормальная массовая скорость  $c_n = -150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ , ее значение было определено по формуле:

$$c_n = \frac{G}{F \cdot z}, \quad (1)$$

где  $G$ , [кг/с] – массовый расход воздуха через ступень компрессора (был задан согласно выбранной точке на характеристике);  $F$ , [м<sup>2</sup>] – площадь на выходе из одного сектора осевого диффузора (значение было взято в окне свойств граничного условия);  $z$  – число секторов осевого диффузора.

Для связи секторов каждой подобласти между собой были заданы периодические ГУ. Подобласти соединены друг с другом при помощи скользящих поверхностей.

**Параметры расчета.** Расчетная сетка была адаптирована по граничным условиям «Кожух», «Лопатка» и «Рабочее колесо». После адаптации было получено 353995 расчетных ячеек. Шаг по времени постоянный –  $5 \cdot 10^{-5}$  с. Метод расчета – «Замороженный ротор».

**Результаты расчета.** Для визуализации картины течения во время расчета, до его начала были заданы две плоскости, на которых были созданы слои с цветной заливкой, отображающие значение числа Маха (рис. 5).

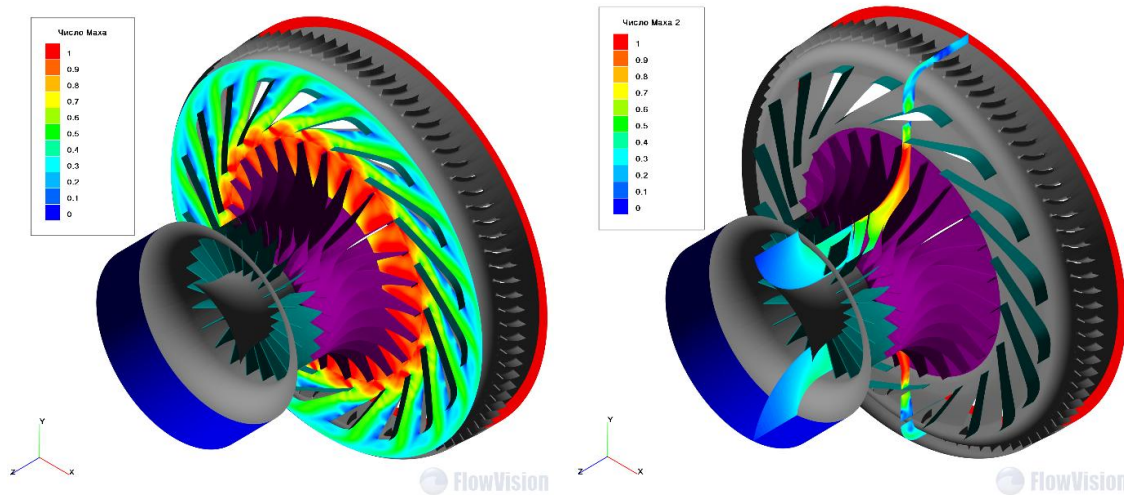


Рис. 5. Визуализация картины течения в процессе расчета (число Маха)

На рис. 6 и 7 показана динамика изменения массового расхода на входе в один сектор входного устройства и на выходе из одного сектора осевого диффузора, а также полного избыточного давления за ним.

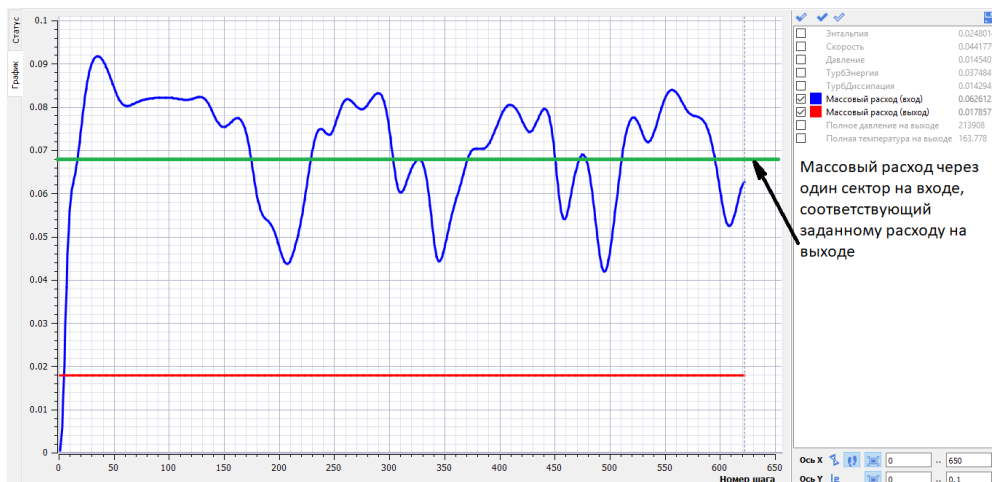


Рис. 6. Изменение значения массового расхода воздуха на входе в процессе расчета

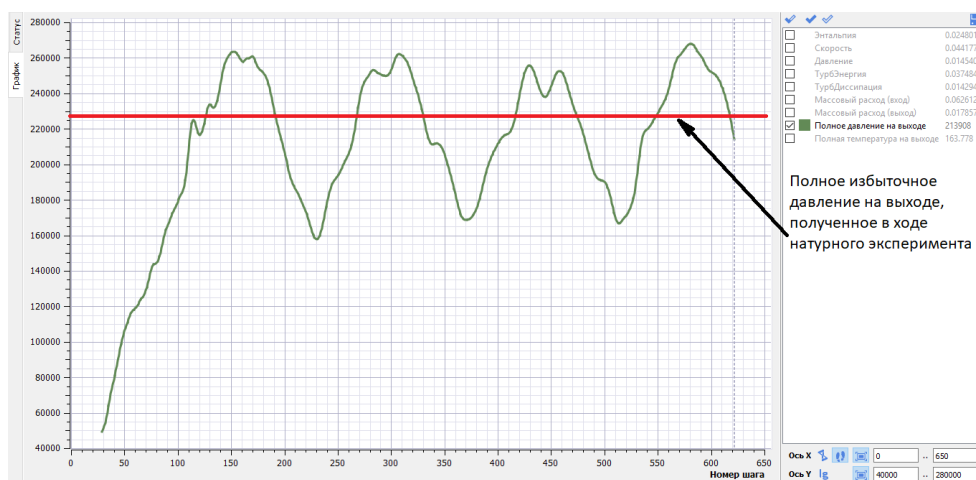


Рис. 7. Изменение значения полного избыточного давления на выходе в процессе расчета

**Анализ результатов расчета.** Визуализация картины течения в процессе расчета показала наличие отрывов и вихрей, которые образуются в межлопаточных каналах радиального диффузора ЦБК, они вызывают колебание значений массового расхода на входе и полного давления и температуры на выходе. Изменение числа расчетных ячеек в пределах 353995...489275 и шага по времени в пределах  $1 \cdot 10^{-4}$ ... $1 \cdot 10^{-5}$  с на результаты расчета существенно не повлияло. Однако, величины исследуемых параметров колеблется вокруг значений, полученных в эксперименте (рис. 6 и 7).

Степень повышения давления ступени  $\pi_k^*$  по осредненным параметрам  $-p_{\text{изб.ср}}^* = 213134 \text{ Па} \Rightarrow \pi_{k(\text{расч.})}^* = 3,104$ , что на 4,49% меньше полученного в натурном эксперименте ( $\pi_k^* = 3,25$ ).

Адиабатный коэффициент полезного действия ступени по осредненным параметрам на выходе:  $\eta_k^* = \frac{\pi_k^{*k} - 1}{\left(\frac{T_2^*}{T_1^*}\right) - 1} = \frac{3,104^{1,4} - 1}{\left(\frac{441,6}{288}\right) - 1} = 0,716$ , что на 7,01%

меньше полученного в эксперименте ( $\eta_k^* = 0,77$ ).

#### **Выводы:**

1. Сходимость результатов численного эксперимента с натурным по  $\pi_k^*$  и  $\eta_k^*$  удовлетворительная, что позволяет использовать полученные результаты в качестве референтных при геометрической оптимизации модели ЦБК.
2. Отмечен отрыв потока от лопаток радиального диффузора ЦБК.
3. Требуется дальнейшая верификация расчетной модели, исследованием влияния на результаты расчета количества расчетных ячеек, используемой модели турбулентности, размеров расчетной области.

#### **Список литературы**

- [1] Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 612 с.
- [2] Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.Э. Расчет и проектирование центробежных компрессоров ГТД. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 44 с.
- [3] Ден Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термогазодинамические расчеты. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 232 с.
- [4] Ржавин Ю.А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет: Учебник. – М.: МАИ, 1995. – 344 с.: ил.
- [5] Сайт FlowVision. – URL: <https://flowvision.ru>.

**Сидоров Павел Михайлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: SidorowPawel95@yandex.ru

**Шевелев Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Е.А. Юрик, Д.С. Таганов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ЭРОЗИОННЫМ ИЗНОСОМ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из наиболее проблем, возникающих при эксплуатации турбин на ТЭС и АЭС, является эрозионный износ металла деталей проточной части. Особо сильным эрозионным разрушениям подвержены лопатки последних ступеней ЦНД (рис. 1), что снижает не только надежность работы турбоагрегата, но и его КПД.



Рис. 1. Поврежденные лопатки последней ступени ЦНД

В паровых турбинах ударному эрозионному износу подвержены рабочие лопатки последних и предпоследних ступеней конденсационных турбин, где поток с повышенным содержанием влаги имеет высокую скорость, в особенности в ЦНД турбин АЭС.

Для защиты рабочих лопаток от эрозионного разрушения применяют следующие мероприятия:

1) снижение влажности пара на выходе из турбины, которое достигается повышением температуры свежего пара, применением выносных сепараторов в сочетании с промежуточным пароперегревателем для влажно-паровых турбин АЭС;

2) применение различных влагоулавливающих устройств в проточной части турбины (внутриканальная сепарация, влагоулавливающие устройства на периферии ступени, ступени - сепараторы);

3) увеличение осевых зазоров между соплами и рабочими лопатками, способствующее дроблению капель и снижению рассогласования скоростей влаги и пара (эти зазоры достигают 100-300 мм);

4) отказ от бандажных проволок, способствующих концентрации влаги;



5) применение продольных канавок на входной части стенки лопатки у периферии; влага в канавках демпфирует удары капель и, кроме того, канавки способствуют сепарации влаги лопаткой.

Эрозионный износ рабочих лопаток при ударах капель влаги о поверхность входных кромок лопаток проявляется вначале в появлении шероховатости поверхности, затем на поверхности появляются углубления, кратеры, язвины, искажается форма профиля лопаток. При длительной работе возможно постепенное полное разрушение верхней части рабочей лопатки. В результате снижается механическая прочность эродированных лопаток и КПД ступени.

Мелкодисперсная влага, как известно, эрозионного разрушения металла не вызывает. Величиной, отделяющей в расчетах крупнодисперсную влагу от мелкодисперсной (или эрозионно опасную от неэрозионно опасной), является пороговая скорость капель.

Механизм эрозионного износа рабочих лопаток связан в основном с усталостным разрушением материала лопаток вследствие высоких механических напряжений, которые возникают при ударе капли влаги о поверхность лопатки.

Известен способ создания противоэрозионной защиты входных кромок рабочих лопаток паровых турбин от ударного воздействия капельной жидкой фазы рабочего тела, движущегося во влажнопаровой проточной части турбины, путем нанесения слоя (нескольких слоев) износостойких материалов различными видами напыления, насыщения или осаждения [1]. Недостатком данного способа является относительно малая толщина защитного слоя поверхности лопатки, что не позволяет обеспечить ее защиту в течение заданного срока эксплуатации турбины и исключить изменение первоначальной аэродинамически гладкой формы лопаточного профиля.

Также известен способ создания противоэрозионной защиты входных кромок рабочих лопаток паровых турбин от ударного воздействия капельной жидкой фазы рабочего тела, движущегося во влажнопаровой проточной части турбины, путем закрепления (напайки или наплавки) предварительно изготовленных пластин из износостойких материалов [2]. Недостатками данного способа являются значительная неравномерность эрозионного изнашивания и размеров зоны износа среди совокупности лопаток одной турбинной ступени и, как следствие, ухудшение вибрационных характеристик ступени из-за прогрессирующего с течением времени дисбаланса.

Наиболее близким является способ закрепления вплотную друг к другу стеллитовых пластин определенного размера, вырезанных из исходной цельной профилированной стеллитовой отливки, которые повышают долговечность входной кромки рабочей лопатки паровой турбины от ударного воздействия капельной жидкой фазы рабочего тела (Рисунок 2) [3].

Способ припайки износостойкой стеллитовой накладкой на входную кромку стальной лопатки влажнопаровой ступени паровой турбины.

Засыпают порошок припоя в смеси с противоокислительным флюсом между очищенными контактными поверхностями указанных спаиваемых деталей.

Нагревают соединение до температуры плавления припоя и прижимают накладку к лопатке до отверждения припоя после отключения нагрева, отличающийся тем, что часть припоя предварительно наносят тонким слоем на обе спаиваемые поверхности методом электроискрового легирования с использованием в качестве легирующего электрода прутка припоя.

Существенными недостатками является несоответствие индивидуальной стойкости пластины уровню ударного воздействия жидкой фазы рабочего тела на входную кромку лопатки в месте установки пластины и, как следствие, снижение в целом долговечности противоэрозионной защиты турбинной лопатки и увеличение размеров зоны разрушения защитной полосы вдоль входной кромки лопатки в ее периферийной части.

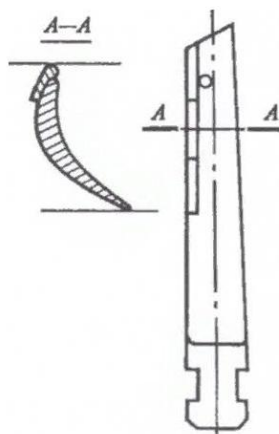


Рис. 2. Рабочая лопатка со стеллитовыми накладками

Рассмотренные способы позволяют повысить долговечность противоэрозионной защиты входной кромки рабочей лопатки паровой турбины от ударного воздействия жидкой фазы рабочего тела, повысить однородность эрозионного износа и минимизировать размеры зоны эрозионного разрушения поверхности лопатки в ее периферийной части, примыкающей к вершине, в процессе эксплуатации паровой турбины.

### Список литературы

- [1] Фаддеев, И.П. Эрозия влажнопаровых турбин / И.П. Фаддеев. – Л.: Машиностроение, 1974.
- [2] Кириллов, И.И. Паровые турбины и паротурбинные установки / И.И. Кириллов, В.А. Иванов, А.И. Кириллов. – Л.: Машиностроение, 1978.
- [3] Напайка стеллитовых пластин на рабочие лопатки паровых турбин. Технологический процесс N 577790.503.80, 00051, ПО "ЛЗТЛ" им. 50-летия СССР, 1987.

**Юрик Елена Алексеевна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eaYurik@gmail.ru

**Таганов Дмитрий Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dimbos404@yandex.ru



А.А. Жинов, П.М. Сидоров

## КОМПОНОВКА ТРУБНОГО ПУЧКА РЕКУПЕРАТОРА ГТУ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При работе газотурбинной установки (ГТУ) температура выхлопных газов за турбиной достигает 350...550 °С. Для повышения эффективности установки целесообразно использовать тепло выхлопных газов для подогрева воздуха, поступающего в камеру сгорания. Для этого за турбиной ГТУ устанавливают регенеративный теплообменник – рекуператор. Оптимизация конструкции рекуператора, а именно компоновка его трубного пучка – важная задача при проектировании.

В данной работе был выполнен многовариантный расчет гладкотрубного рекуператора ГТУ мощностью 200 кВт при различных значениях относительного шага трубок ( $\psi$ ) в трубном пучке, диаметра трубок ( $d$ ) и количества ходов подогреваемого воздуха ( $z$ ). Методика расчета приведена в [1]. Схема рекуператора ГТУ представлена на рисунке 1.

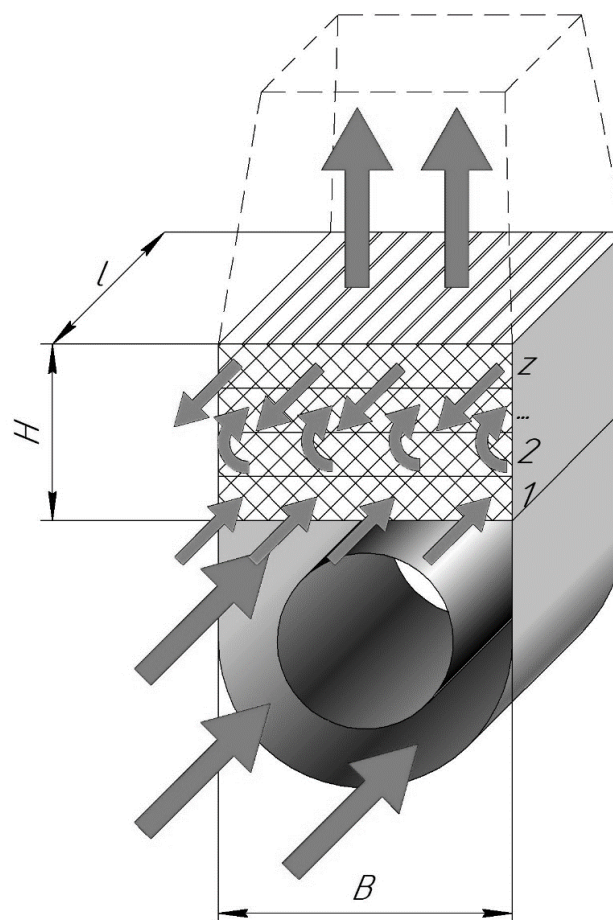


Рис. 1. Схема рекуператора

В результате моделирования были получены зависимости габаритных размеров рекуператора от диаметра и относительного шага трубок при разном количестве ходов по воздуху. Эти зависимости представлено на рисунках 2 – 4.

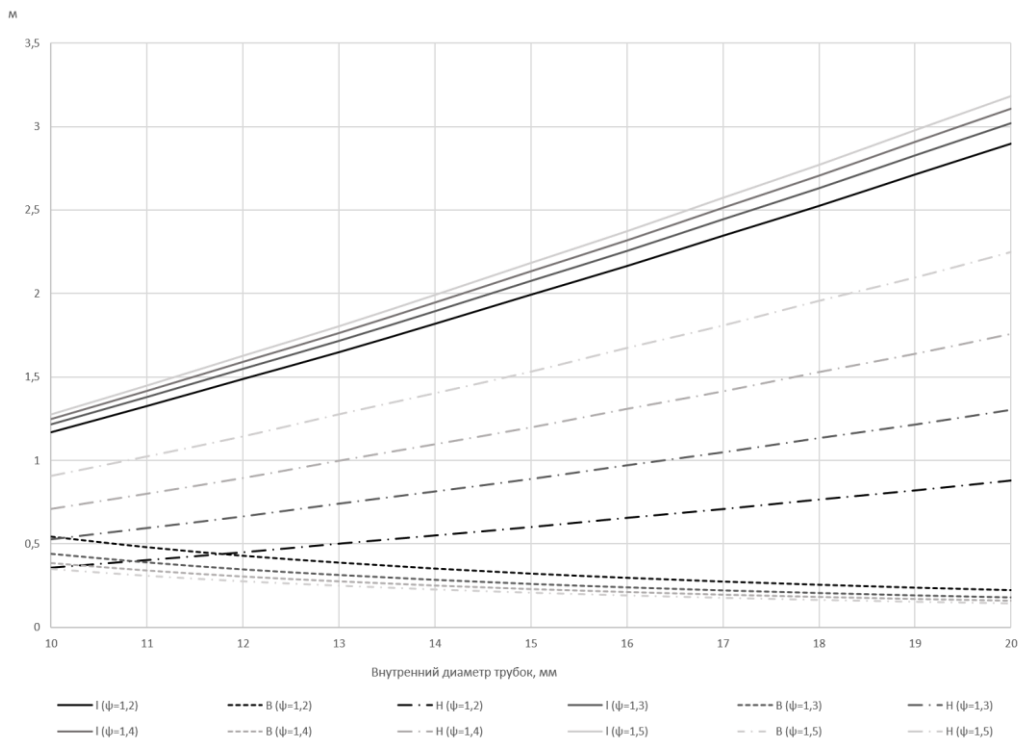


Рис. 2. Четыре хода по воздуху

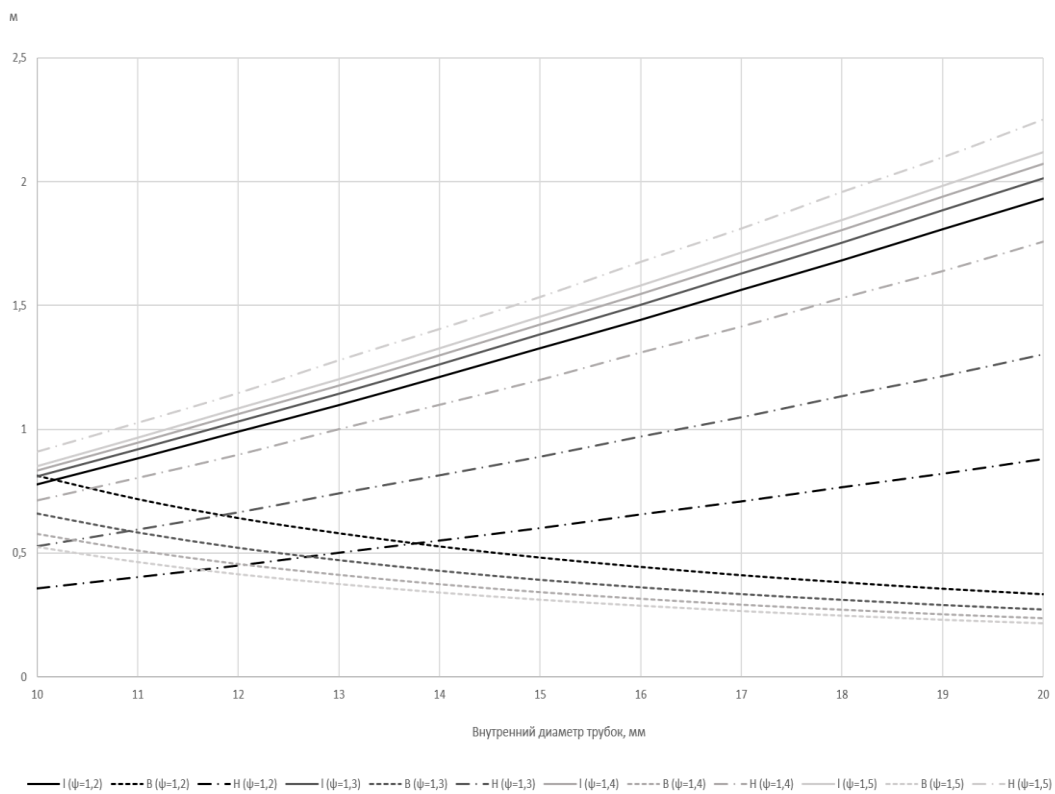


Рис. 3. Шесть ходов по воздуху

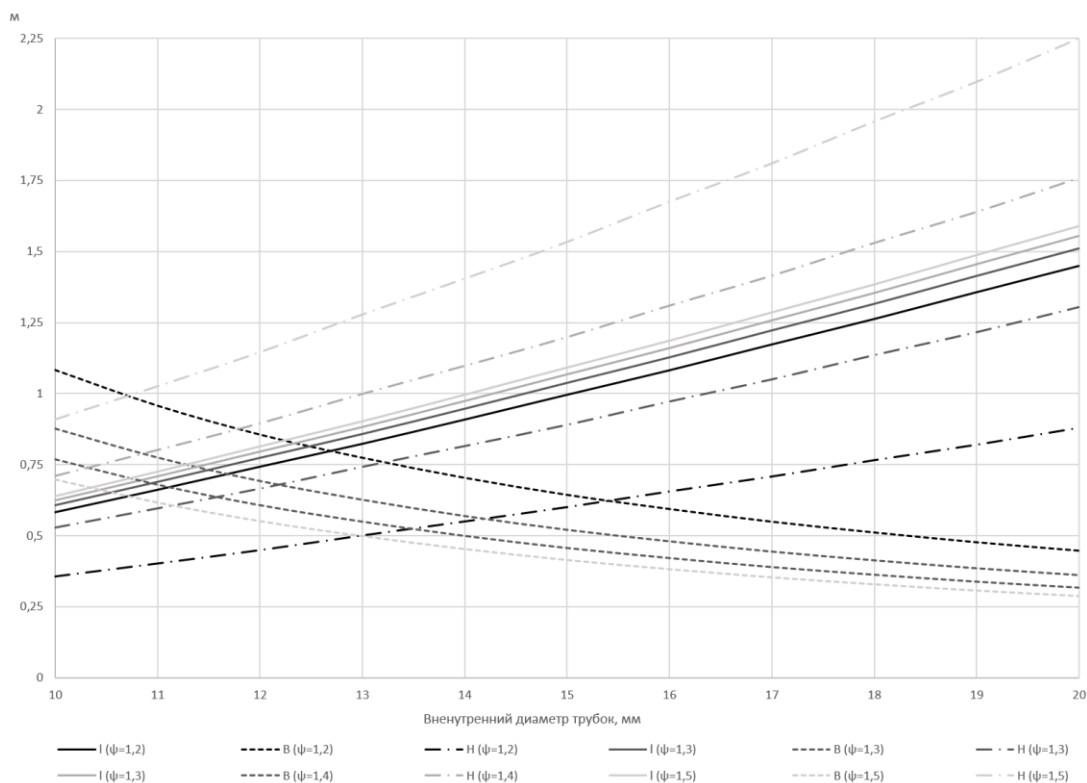


Рис. 3. Восемь ходов по воздуху

Полученные зависимости позволяют упростить многомерную задачу компоновки трубного пучка рекуператора ГТУ.

Например, для определения значения диаметра трубок и числа ходов воздуха, обеспечивающих квадратное сечение рекуператора (оптимальное с точки зрения гидравлических потерь и материалоемкости [2]), необходимо найти пересечение пунктирной линии (размер  $B$ ) и непрерывной линии (размер  $I$ ) на соответствующем графике.

### Список литературы

[1] Григорьев В.Г., Расчет теплообменных аппаратов газотурбинных установок. М.: издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана 2001.

[2] Кузнецов В.В., Соломонюк Д.Н. Проектирование теплообменных аппаратов для ГТУ сложных циклов. Вестник Национального Технического Университета «ХПИ» №35, Харьков 2008.

**Жинов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, E-mail: jinov@mail.ru

**Сидоров Петр Михайлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SidorowPM@yandex.ru

С.В. Киселев, А.А. Сидоров

## **МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПРОФИЛЕЙ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Широкое использование в практике турбостроения аэродинамических методов расчета и профилирования прямых лопаточных решеток позволило существенно повысить коэффициент полезного действия лопаточных аппаратов. Большинство применяемых в настоящее время лопаточных профилей в отечественных паровых турбинах разработано на основе теоретических методов расчетов решеток [2]. На сегодняшний день благодаря развитию ЭВМ и программных комплексов для расчета газодинамических процессов и смежных задач можно ставить вопрос о широком использовании численных методов расчета пространственного потока при проектировании турбинных ступеней.

Опытные данные показывают, что в аэродинамически совершенных решетках вязкость оказывает слабое влияние на распределение скоростей вне пограничного слоя. Последний можно считать малым в сравнении с толщиной профиля, и поэтому его практически можно не учитывать. Однако в области входной и выходной кромок обычно имеют место большие градиенты давления, вызывающие во многих случаях отрыв потока и возникновение вихревых зон. Кроме того, аэродинамические следы за сопловой решеткой вызывают возмущающие силы, оказывающие влияние на рабочую решетку.

Совершенствование эффективности проектируемых турбоустановок в целом достигается за счет повышения начальных параметров пара. Проведенные численные эксперименты показывают, что изменение температуры основного потока существенно влияет на характер течения потока и на скорость в следах прямой решетки сопловых лопаток. В свою очередь это изменит возмущающее воздействие потока на рабочие лопатки. Таким образом, повышение эффективности турбоустановок за счет увеличения начальных температур пара неизбежно повлияет на надежность лопаточного аппарата, как от теплового воздействия, так и от нестационарных аэродинамических сил. На сегодняшний день стоит задача оценить опасность для вновь проектируемых высокотемпературных паровых турбин от подобных воздействий и выработать рекомендации для снижения рисков и повышения надежности.

Для того чтобы оценить тенденцию изменения аэродинамических следов за сопловой решеткой с повышением температуры основного потока необходимо проведение натурального эксперимента. Безусловно проведение эксперимента с температурами основного потока порядка 700-800 °С

технически выполнить очень трудно и даже опасно. Целью эксперимента является подтверждение численных расчетов на более низких температурах (например, 200-300 °С) основного потока. В случае достаточно близких полученных результатов и одинаковой тенденции изменения скорости в аэродинамическом следе за сопловой решеткой при изменении температуры основного потока, можно будет утверждать, что результаты, полученные с помощью ЭВМ для более высоких температур - адекватные и программные комплексы позволяют, с определенной точностью, моделировать интересующие нас процессы при различных условиях.

Таким образом, из вышесказанного следует, что необходимо поставить натурный эксперимент, с возможностью подогрева воздушного потока, наличием датчиков температуры перед прямой решеткой и датчика скорости в аэродинамическом следе непосредственно за выходной кромкой лопатки.

Математическое моделирование процесса обтекания решетки профилей проводилось в программной среде STAR-CCM+v9.02.005, позволяющей решать прикладные задачи с высокой степенью точности. Создание расчетной сетки из многогранных ячеек помогло сократить время решения задачи при наименьшем использовании объема памяти.

Объектом исследований была решетка полых сопловых профилей С-9022А. Влияние предыдущей рабочей решетки не учитывалось.

- количество профилей в решетке – 5,
- хорда профиля – 45 мм,
- относительный шаг решетки – 0,6,
- рабочее тело – воздух.

Начальные параметры:

- полные температуры  $t_0 = 500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$
- полное давление 101325 Па
- скорость потока на входе в решетку  $V_0 = 100$  м/с
- Давление окружающей среды – атмосферное 101325 Па

Была применена k-ε модель турбулентности

- охлаждающая среда – воздух с параметрами:
- температура  $t_{охл} = 100$  °С
- давление 101425 Па
- скорость охладителя  $V_{охл} = 100$  м/с

Теплофизические свойства воздуха выбирались программой из стандартной библиотеки, заложенной в нее, и автоматически пересчитывались в зависимости от конкретных условий в каждой ячейке расчетной сетки.

Математическая модель прямой сопловой решетки профилей показана на рис.1.

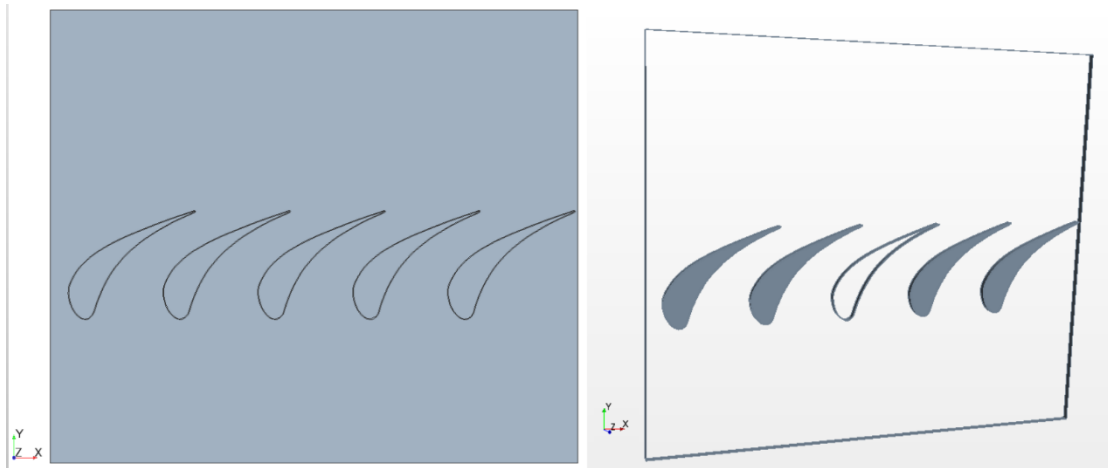


Рис. 1. Модель прямой сопловой решетки профилей С-9022А

Расчеты были проведены при температурах основного потока  $t_0 = 500^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 800^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 1000^\circ\text{C}$ .

На рис.2 представлено поле скоростей потока при температуре основного потока  $t_0 = 500^\circ\text{C}$  (с подачей охладителя).

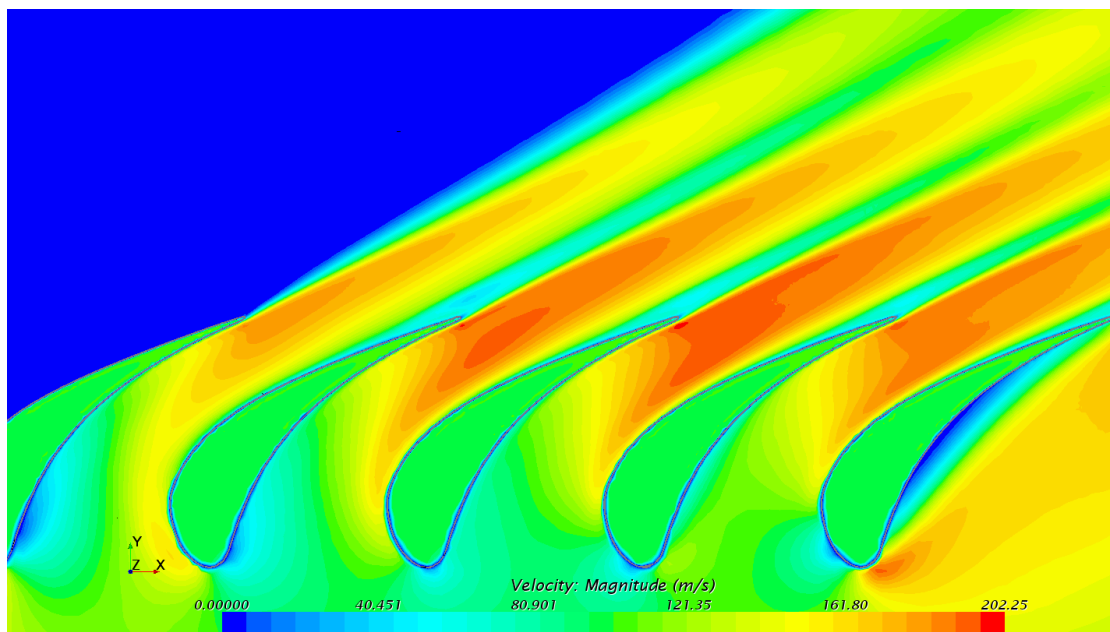


Рис. 2. Поле скоростей потока при  $t_0 = 500^\circ\text{C}$

На рис.2 отчетливо можно увидеть аэродинамические следы за выходными кромками сопловых лопаток. Аналогичная картина наблюдается и при других температурных режимах.

Далее необходимо оценить влияние охлаждения лопаток на аэродинамические следы.

На рис.3 показаны графики скоростей в аэродинамических следах.

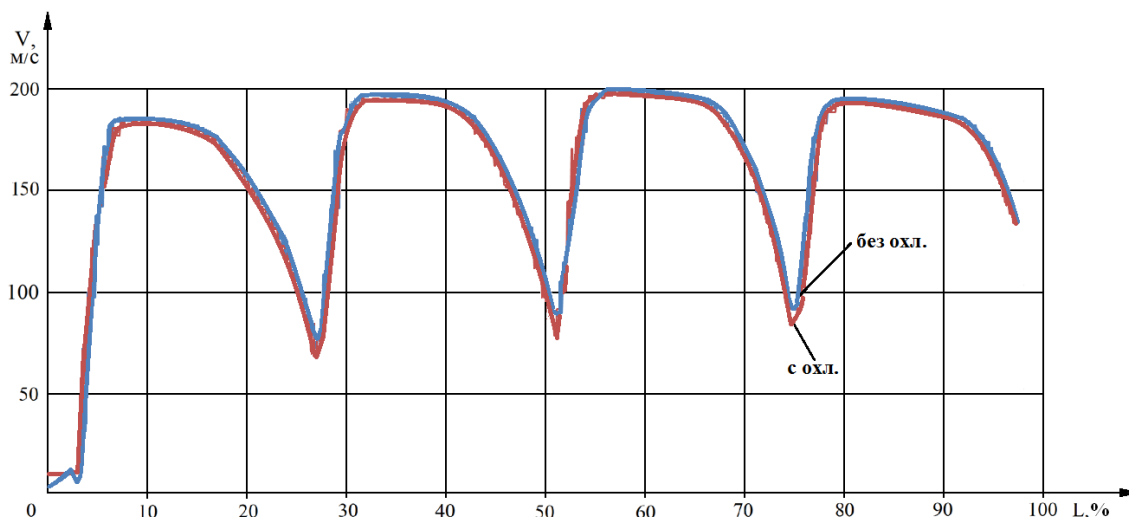


Рис. 3. Графики скоростей в аэродинамических следах при режимах с охлаждением и без охлаждения лопаток ( $t_0 = 500^{\circ}\text{C}$ )

Здесь сравниваются два режима работы решетки лопаток – с охлаждением и без охлаждения. Мы видим, что при режиме с охлаждением лопаток происходит увеличение провала скоростей (в среднем на 7 м/с скорость в аэродинамическом следе становится ниже) по сравнению с режимом без охлаждения лопаток. Подобная тенденция наблюдается при любом температурном режиме и на различном расстоянии от выходных кромок лопаток. Объяснить данный эффект можно тем, что при добавлении охлаждения лопаток охлаждается как сам материал лопаток, так и пограничный слой вокруг лопатки. Понижение температуры пограничного слоя увеличивает плотность рабочего тела в пристеночных областях, соответственно увеличиваются силы трения между слоями рабочего тела, а также между рабочим телом и материалом лопатки. Скорость потока в пограничном слое при этом снижается, а скорость в аэродинамических следах напрямую зависит от скорости потока в пограничном слое, именно поэтому при охлаждении лопаток скорость в аэродинамических следах падает.

Для подтверждения результатов численного моделирования необходимо провести натурный эксперимент. Была разработана модель прямой охлаждаемой решетки сопловых профилей. Данная модель представлена на рис.4,5.

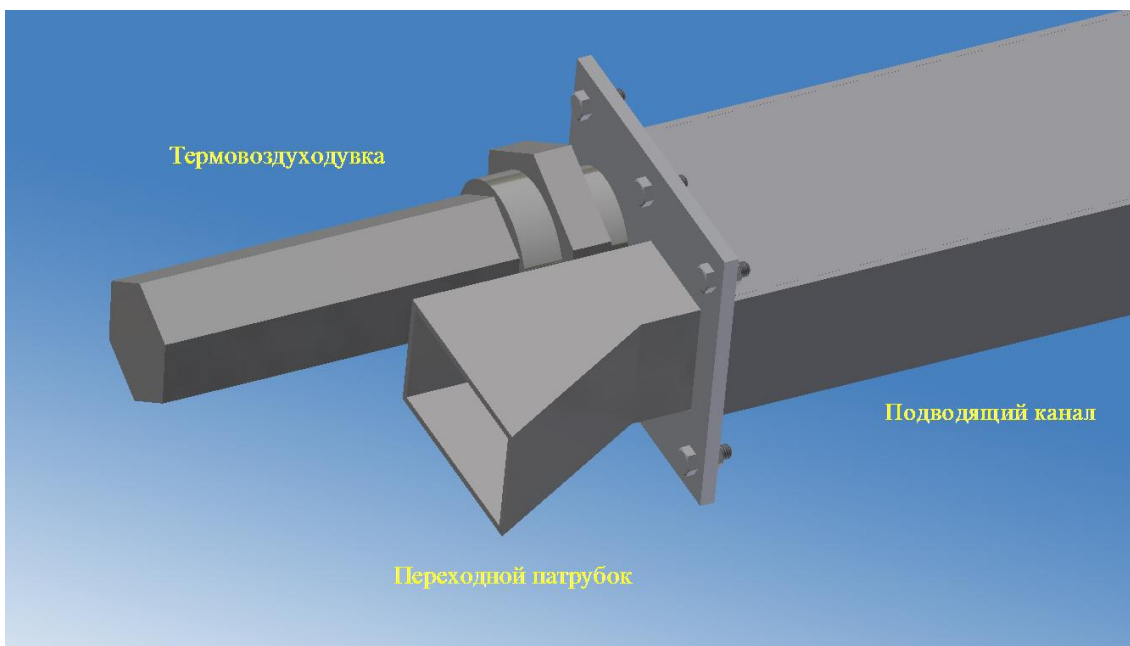


Рис. 4. Модель экспериментальной установки (входная часть)

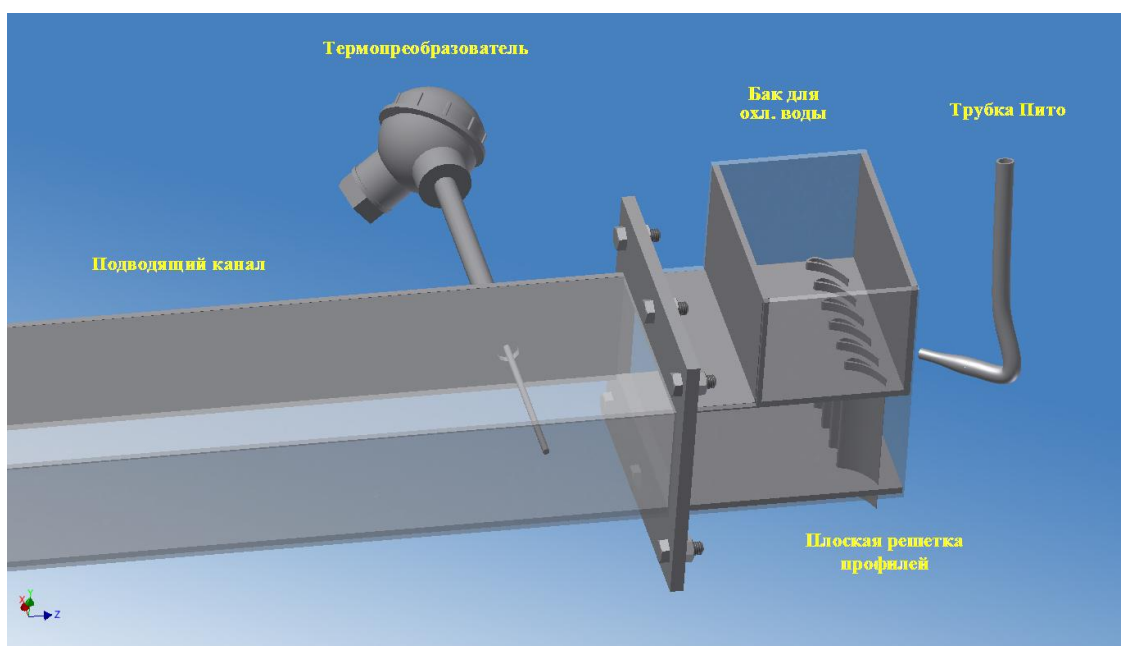


Рис. 5. Модель экспериментальной установки (выходная часть)

Экспериментальная модель состоит из двух блоков с разъемным фланцевым соединением. Первый блок представляет собой подводящий канал длиной 1 м и проходным сечением 50x100 мм. На входе данного подводящего канала монтируется термовоздуходувка Steinel HG 5000 E (Рис.6)





Рис. 6. Термовоздуходувка Steinel HG 5000 E

Промышленная термовоздуходувка большой резервной мощности HG5000E обеспечивает полный контроль за скоростью воздушного потока и температурой воздуха. Нагревательный элемент можно очень быстро заменить. Каждый заменяемый нагревательный элемент содержит чип с персональными данными, позволяющий управляющей системе прибора производить точную самокалибровку цикла. Термовоздуходувка HG 5000E идеально подходит для быстрого нагрева больших объемов воздуха. Мощный мотор прокачивает до 800л горячего воздуха в минуту через специальную форсунку. Предварительно заданные поток воздуха и температура могут быть изменены в любое время, а система управления, соответствующая самым современным экологическим стандартам (EN61000-3-3 и EN61000-3-2), быстро оптимизирует условия работы. Модель HG 5000E обладает следующими важными характеристиками: цифровым дисплеем температуры, быстросменным нагревательным элементом, бесщеточным мотором. Особенности:

- Мощность 3400 Вт
- Питание от сети 220 В, 50 Гц
- Максимальная рабочая температура 600°C
- Электронное регулирование потока воздуха и температуры
- Бесступенчатая регулировка подачи воздуха и температуры
- Интеллектуальная система управления двигателем и температурой
- Индикатор заданных и действительных значений температуры
- Легкосменный нагревательный элемент
- Высокопроизводительный, долговечный бесщеточный двигатель
- Массивный монолитный корпус
- Сетевой провод может быть легко заменен без демонтажа всего корпуса

- Прямая форма для оптимальной стационарной работы
- Диаметр выходного сопла 30 мм
- Ресурс мотора 20000 ч
- Ресурс нагревательного элемента 500-800 ч
- Вес: 1,19кг
- Габариты: 350 x 122 x 122 мм

На входе подводящего канала также присутствует сменный переходной патрубок для соединения с выходным патрубком аэродинамического стенда ТМЖ-1М (Рис.7).



Рис. 7. Стенд аэродинамический универсальный ТМЖ-1М

Аэродинамический стенд позволяет исследовать пространственные и плоские течения воздуха, их структуру течений и характер возникающих в потоках гидроаэродинамических явлений, изучать методы и средства измерения основных гидроаэродинамических параметров, измерять их и устанавливать между ними зависимость. Стенд эксплуатируется в помещении при температуре от + 10 °С до +35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при температуре +25 °С. Технические характеристики стенда указаны в табл.1.

Таблица 1

Технические характеристики аэродинамического стенда

Время подготовки к работе, мин.	30
Диапазон скорости рабочего потока воздуха, м/с	от 20 до 50
Электропитание от трехфазной сети переменного тока:	
напряжением, В	380
частотой, Гц	50
Потребляемая мощность, В·А	1000
Габаритные размеры стенда, мм	1300×670×1700
Масса (с модулями), кг	170

Совместная/раздельная работа термовоздуходувки и аэродинамического стенда позволит регулировать поток воздуха и температуру.

На выходе подводящего канала для замера температуры рабочего тела устанавливается термопреобразователь **КТХК 01.03–С<sub>10</sub>–И–3.0–80** - кабельный термопреобразователь градуировки хромель-копель конструктивной модификации 01.03 с изолированным (И) рабочим спаем в оболочке из стали 12Х18Н10Т (С<sub>10</sub>) диаметром (d) 3.0 мм, монтажной длиной (L) 80 мм, с монтажными элементами: приварное кольцо диаметром 18 мм и подвижный штуцер с резьбой М20х1,5 (Рис.8).

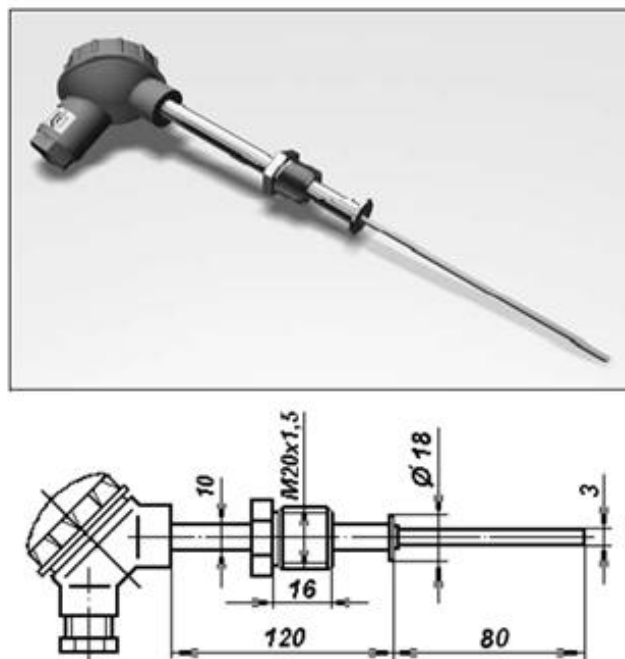


Рис. 8. Термопреобразователь **КТХК 01.03–С<sub>10</sub>–И–3.0–80**

Второй блок экспериментальной модели представляет собой канал с прямой решеткой профилей С–9022А. Данный блок выполнен заодно с баком для охлаждающей воды – охладитель для лопаток [3]. В лопатках предусмотрено внутриканальное охлаждение. На выходе прямой решетки профилей за выходной кромкой средней сопловой лопатки располагается трубка Пито – для замера скорости потока в аэродинамическом следе [1]. Замеры скорости производятся за средней лопаткой для того, чтобы исключить негативные краевые эффекты (вихри и застойные зоны потока, возникающие у крайних лопаток).

Показания датчиков (термопреобразователь, трубка Пито) отражаются на универсальном стенде.

Первая серия экспериментов проводится с выключенным нагревательным элементом. Меняется расход (и соответственно скорость потока). Замеряется температура и скорость потока в следе за сопловой лопаткой [4, 5].

Вторая серия экспериментов аналогичная. Нагревательный элемент включен.

После получения итоговых результатов эксперимента, будет произведен сравнительный анализ результатов с аналогичным экспериментом на ЭВМ и сравнив все полученные данные можно будет сделать определенные выводы по дальнейшей работе.

### Список литературы

[1] *Александров В.Ю., Климовский К.К.* Измерение полного давления в относительном движении потока за рабочим колесом лопаточной машины: Вестник машиностроения, 2013, №12, с.13-17.

[2] *Краева Е.М.* Теоретический анализ обтекания решетки профилей малорасходного центробежного насоса потоком вязкой жидкости. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева 2010, С.96-99.

[3] *Криони Н.К., Новиков А.В., Мингажев А.Д., Бекишев Р.Р.* Повышение стойкости блока сопловых лопаток турбомашин из никелевых и кобальтовых сплавов к термомеханическим нагрузкам. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» 2014, №4, С.215-238.

[4] *Повх И.Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении. – М.-Л.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1959, 395 с.

[5] *Радциг А.Н.* Экспериментальная гидроаэромеханика: учебник – М.: изд. МАИ, 2004, с.274.

[6] *Соляников В.А.* Разработка метода эквивалентных испытаний лопаток турбин в лабораторных условиях: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Работа выполнена в Самарском ГНПП «Труд», Самара, 1993, 19 с.

**Киселев Сергей Викторович** – инженер КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: SKV1985@yandex.ru

**Сидоров Альберт Александрович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alb.sidoroff2017@yandex.ru

С.В. Ибрагимов, В.Ю. Ильичев

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСИЛИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ГРЕБНИ ЛАБИРИНТНОГО УПЛОТНЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Осевые усилия, воспринимаемые упорными подшипниками паровой турбины, появляются в результате [1]:

- статической разности давлений по обе стороны рабочих лопаток и дисков;
- разности осевых составляющих скоростей пара на входе и выходе рабочих лопаток;
- статической разности давлений, действующих на уступы ротора;
- наклона оси ротора;
- неуравновешенного давления, действующего на гребни лабиринтных уплотнений;
- наличия различного рода дополнительных нагрузок, обусловленных конструктивными особенностями турбин, а также дефектами монтажа.

Осевое усилие, действующее на уступы ротора, определяется как произведение площади уступа на величину перепада давления пара на уступ:

$$P_y = f_1 \Delta p,$$

где  $f_1$  – площадь уступов ротора,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta p$  – перепад давлений на уступ ротора, Па.

Усилие из-за неуравновешенного давления, действующего на гребни лабиринтных уплотнений, в зависимости от конструкции уплотнения определяется по приближенной формуле:

$$P_y = f \frac{p_0 - p_z}{2} \frac{z-1}{z},$$

где  $z$  – число уплотнительных гребней,  $p_0$  и  $p_z$  – начальное и конечное давления пара, Па.

Направление усилия определяется знаком «плюс» или «минус», стоящими перед формулами. Знак «плюс» соответствует случаю, когда усилие совпадает с направлением движения пара. Знак «минус» соответствует случаю, когда усилие противоположно направлению движения пара [2].

Приведенные выше формулы выражают усилия, которые возникают внутри самого уплотнения, и не учитывают усилий, действующих на наружные стороны первого и последнего гребней. Усилия, действующие на наружные стороны первого и последнего гребней, определяется так же, как и усилия, действующие на уступы ротора.

Таким образом, по методике [2] усилие, действующее на уплотнение, рассчитывается следующим образом:

$$P_y^{\Sigma} = P_1 + P_{уп} + P_z,$$

где  $P_1$  и  $P_z$  – усилия, действующие на наружные стороны первого и последнего гребней, Н;  $P_{yn}$  – усилие, возникающее внутри самого уплотнения, Н.

Методика расчета усилия, действующего на гребни лабиринтного уплотнения, приведенная в источнике [2], подходит только для уплотнений с прямыми гребнями. С помощью этой методики невозможно рассчитать, например, уплотнения с наклонными гребнями. В связи с этим, необходимо разработать новую методику, позволяющую рассчитывать усилия в лабиринтных уплотнениях любого конструктивного исполнения.

Для разработки такой методики предлагается использовать программный пакет Solid Works Flow Simulation, который входит в состав программного обеспечения Solid Works 2016.

Расчетная модель надбандажного лабиринтного уплотнения представляет собой кольцо с чередующимися длинными и короткими гребнями. Граничными условиями на входе потока в формируемый канал являются полное давление перед уплотнением ( $P_0^*$ , Па) и температура ( $T_0$ , К), на выходе задаются следующие граничные условия: статическое давление за последним уплотнительным гребнем ( $P_z$ , Па) и температура ( $T_z$ , К).

Для отработки новой методики и сравнения полученных величин осевого усилия с рассчитанными по приближенным формулам [2], выполнено моделирование процесса течения пара в надбандажном и диафрагменном уплотнениях первой ступени давления турбины К-12-4,2. На рис.1 приведена схема уплотнения.

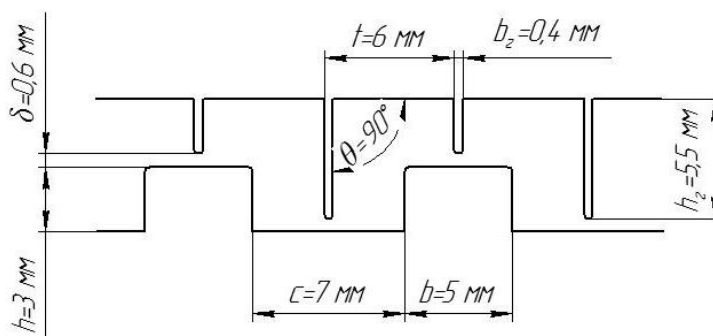


Рис. 1. Схема лабиринтного уплотнения

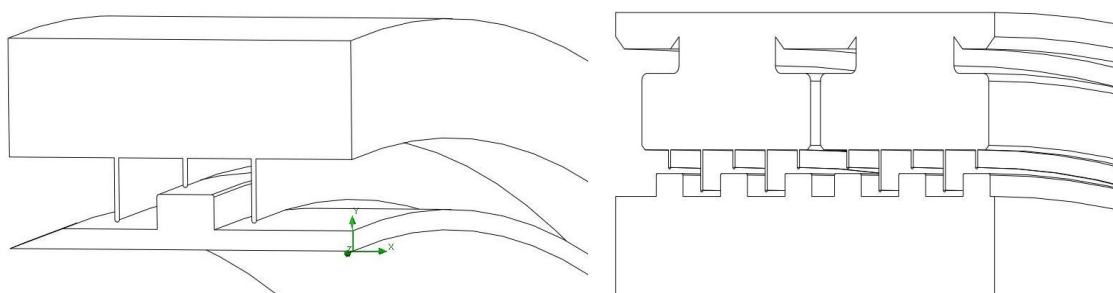


Рис. 2. Модели надбандажного и диафрагменного уплотнений

Полученные значения величин усилия представлены в таблице 1. Расхождение в полученных результатах составляет примерно 2,8%.

Таблица 1

Значения величин усилия, действующего на гребни надбандажного и диафрагменного уплотнений

Величина	Тип уплотнения	РТМ	Моделирование	$\Delta$ , %
$P_{уп}$ , Н	надбандажное	341,85	351,43	2,8
	диафрагменное	919,32	943,57	2,6

По разработанной методике были рассчитаны надбандажные и диафрагменные уплотнения с различными углами наклона. Расчетные модели для надбандажного и диафрагменного уплотнений с углом наклона 45 градусов на встречу движения потока представлены на рисунках 3.

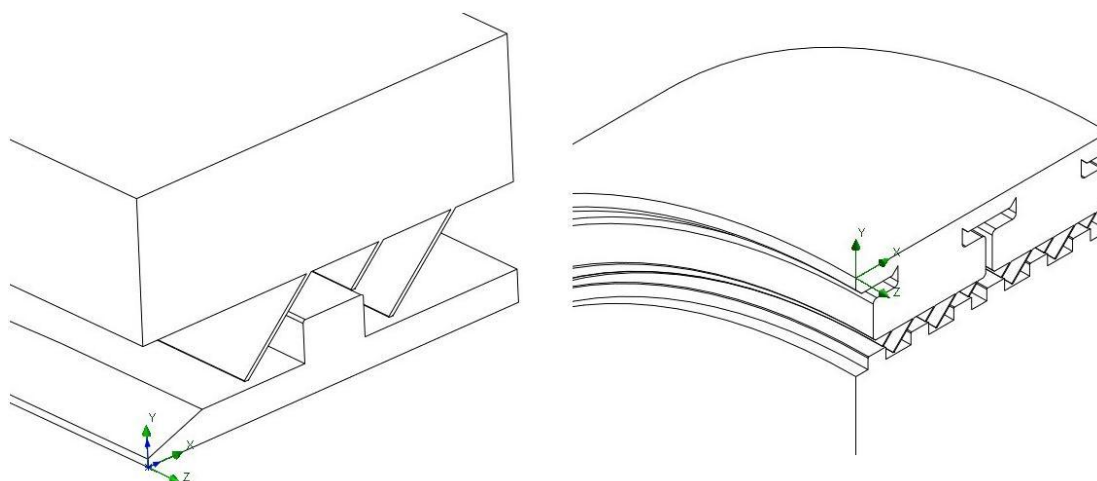


Рис. 3. Модели надбандажного и диафрагменного уплотнений ( $\theta=45^\circ$  встречный уклон)

В таблице 2 приведены результаты моделирования.

Таблица 2

Значения величин усилия

Величина	Без уклона	Попутный уклон		Встречный уклон	
$\theta$ , град	90	45	75	45	75
$P_6$ , Н	341,85	503,31	447,26	517,28	451,03
$P_{д}$ , Н	943,57	1081,71	993,47	1150,18	1023,91
$P_{\Sigma}$ , Н	1285,42	1584,02	1440,73	1667,46	1474,94

В дальнейших исследованиях разработанная методика расчета величины усилия в надбандажном уплотнении будет опробована при определении осевого усилия, возникающего в концевых, диафрагменных и надбандажных уплотнениях с наклонными уплотнительными гребнями. Полученные значения усилий можно будет применять для дальнейшего прочностного расчета уплотнений.

### **Список литературы**

[1] Сережкина Л.П., Зарецкий Е.И. Осевые подшипники мощных паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.

[2] РТМ 108.021.08-86. «Турбины паровые стационарные. Расчет осевого усилия».

[3] РТМ 108.020.33-86. «Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет».

**Ибрагимов Станислав Валерьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [ibragish94@gmail.com](mailto:ibragish94@gmail.com)

**Ильичев Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [patrol8@yandex.ru](mailto:patrol8@yandex.ru)



Ф.Г. Завальный, Н.В. Гридчин, А.В. Птахин

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФРЕОНА В ПОМЕЩЕНИИ ПОСЛЕ УТЕЧКИ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

**Введение.** Вопрос безопасности хранения и эксплуатации органических теплоносителей актуален на предприятиях по ряду причин. Так, например, фреон R134a, являясь химически не опасным веществом, попадая в атмосферу быстро испаряется, вытесняя кислород из воздуха рабочей зоны, что при недостаточной эффективности системы газоудаления может привести к удушью. Таким образом, система вентиляции постоянно должна поддерживать безопасные условия для здоровья персонала, находящегося внутри помещения, в непосредственной близости от объекта [1]. При ее проектировании в расчет закладываются различные аварийные ситуации. В данной работе рассматривается разрыв трубы ДУ20, находящейся под давлением 6 атм. и температуре 20°C. Выход 50 л фреона R134a в помещение, объемом 60 м<sup>3</sup>.

На концентрацию фреона окажут влияние следующие факторы: время гравитационного оседания частиц до уровня расположения воздухозаборных устройств, процентное распределение фаз после расширения и в процессе оседания, производительность системы газоудаления.

В зависимости от поставленных задач: определение времени процесса газоудаления, определение концентрации опасных веществ в помещении с течением времени, либо определение оптимальной производительности вентиляционной системы - данная методика может варьировать принятые и определяемые величины.

**Определение долевого состава смеси на момент утечки.** Так как рассматриваемый контур находится под большим давлением (6 атм.), выход фреона произойдет за короткий промежуток времени, следовательно, процесс расширения можно считать адиабатическим. Временем выхода фреона из контура пренебрегаем. Энтальпия фреона при заданных начальных параметрах определит степень сухости смеси после расширения 1-2 (рисунок 1)  $x = 28$ , т.е. 28% жидкого фреона испарятся.

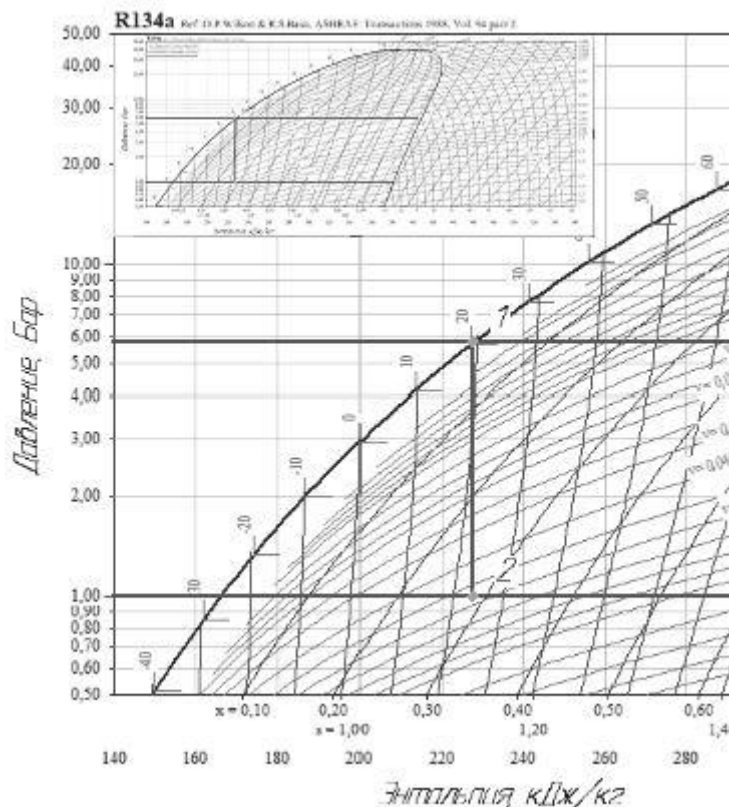


Рис. 1. h-P диаграмма процесса расширения фреона R134a

**Определение интенсивности оседания и испарения.** Остальная часть в виде капель размером, не превышающим критический диаметр, испарится до их оседания. Часть капель (10), размер которых превышает критический диаметр, в жидкой фазе достигнет нулевой отметки раньше, чем полностью испарится (2). Преобразовав формулу из [4], найдем интенсивность уменьшения размера (1) за время падения, учитывая постоянно меняющуюся скорость:

$$R = \left(1 - \frac{Kv / R_0^2}{2W_0q_w / Nu_{mo}} \ln(1 + W_0q_w t)\right)^{2/3} R_0 \quad (1)$$

где  $W_0$  – скорость падения капли (9), м/с;  $q_w$  – сопротивление (3);  $R_0$  – начальный радиус капли, м;  $Kv$  – константа испарения (4);  $Nu_{mo}$  – критерий подобия Нуссельта (5).

По формуле (2) определим время испарения капель в зависимости от скорости их движения и начального размера. Каплю размером 0,1 мм будем считать полностью испарившейся.

Преобразуем формулу из [4] для определения времени испарения капли. В результате преобразований получим:

$$T_{\text{исп}} = \frac{e^{\frac{1 - (\frac{R_k}{R_0})^{1.5} \cdot 2 \cdot W \cdot q_w \cdot R_0^2}{K_V \cdot Nu_{\text{мо}}}} - 1}{W \cdot q_w} \quad (2)$$

где  $R_k$  – принятый конечный радиус (0,05 мм);  $q_w$  – сопротивление среды.

Сопротивление среды можно определить из рекомендаций[4]:

$$q_w = \frac{3}{2} C_f \frac{\rho_B}{\rho_K} \cdot (3), \quad (3)$$

где  $C_f$  – коэффициент лобового сопротивления.

Константа испарения определяется по следующему соотношению

$$K_V = 2D \frac{\rho_{fn}}{\rho_{fж}} \quad (4)$$

где  $\rho_{fn}$  – плотность пара фреона;  $\rho_{fж}$  – плотность жидкого фреона;  $D$  – константа диффузии.

Критерий диффузии Нуссельта для числа Рейнольдса, лежащего в диапазоне  $2 < Re < 750$  определим по следующей формуле:

$$Nu_{\text{мо}} = 2 + 0.55 Re^{0.56} Sc^{0.33} \quad (5)$$

По формуле (9) для установившегося движения крупных частиц ( $d > 0,2$  мм) при условии турбулентного движения, выполним численный расчет скорости падения капель [3]:

$$c \cdot Re^2 = \frac{4}{3} Ar \quad (6)$$

где  $c$  – коэффициент сопротивления среды;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Ar$  – критерий Архимеда.

Критерий Рейнольдса определяется по соотношению:

$$Re = \frac{W_0 2R_0}{\nu_B} \quad (7)$$

где  $\nu_B$  – кинематическая вязкость воздуха при температуре  $-20^\circ\text{C}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для турбулентного режима движения коэффициент сопротивления шара равен  $c = f(Re) = 0,44$ .

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{g(2R)^3(\rho_{\text{ф}} - \rho_B)}{\nu_B^2 \rho_B} \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{ф}}$  – плотность капли фреона,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_B$  – плотность воздуха  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Из формул (6), (7) и (8) получим формулу для определения установившейся скорости падения капли:

$$W = \sqrt{3.03g2R \frac{\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}} \quad (9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

На основании проведенных расчетов построена зависимость времени падения и испарения капли фреона от размера капель, представленная на рисунке 3. Построена зависимость размера капли и пройденного расстояния от времени падения, представленная на рисунке 4. Определен критический диаметр капли, который составил  $D = 0,92$  мм.

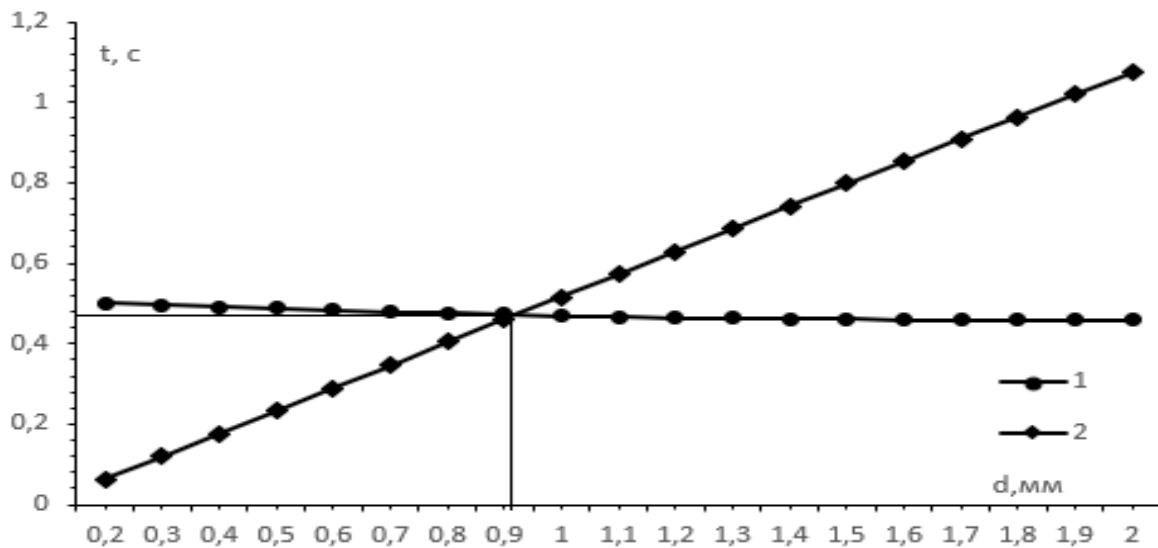


Рис 3. Зависимость времени падения и испарения от начального размера капли:  
1 – время падения, с; 2 – время испарения, с

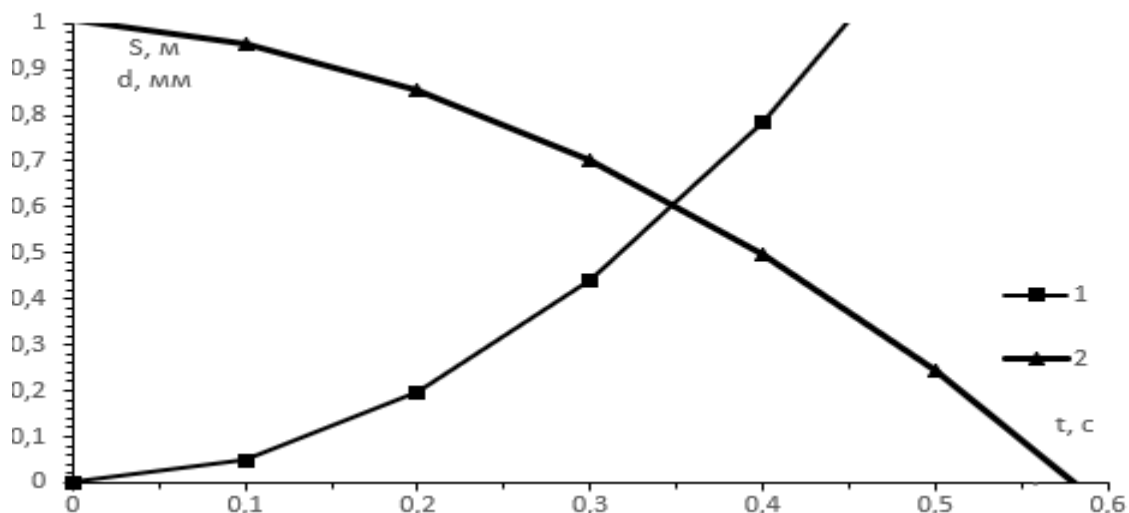


Рис. 4. Зависимость размера капли и пройденного расстояния от времени падения:  
1 – расстояние, м; 2 – диаметр, мм

**Оценка дисперсного состава капель.** Количество капель, размер которых превосходит критический диаметр определим, воспользовавшись законом нормального распределения Гаусса с ожидаемой величиной 1 мм в интервале размеров от 0,2 мм до 2 мм, что соответствует размерам капель коллоидной дисперсной среды [2].

Определим количество капель:

$$n = 100\% - \frac{\int_{0.2}^{0.92} \frac{e^{-\frac{(R-1)^2}{2 \cdot 0.09}}}{0.3\sqrt{2\pi}}}{\int_{0.2}^2 \frac{e^{-\frac{(R-1)^2}{2 \cdot 0.09}}}{0.3\sqrt{2\pi}}} 100\% = 60.73 \% \quad (10)$$

Таким образом, 40% капель упадут на землю, прежде чем полностью испарятся, затем они также превратятся в пар, но будут витать на уровне не выше, чем 20 см. Этот объем будет удален приточно-вытяжной вентиляцией менее чем за 5 секунд при заданной производительности и объеме помещения. После чего в помещении останется пар фреона, выделившийся изначально из контура 3,7 м<sup>3</sup> и объема испарений капель 5,7 м<sup>3</sup>. Таким образом, после удаления жидкой фазы, в помещении останется 9,4 м<sup>3</sup> паров фреона. Концентрация воздуха в помещении составит 84 %, что соответствует 17,6 % кислорода. Предположим, что объем паров фреона распределился равномерно по всему помещению, тогда долю воздуха в помещении, как функцию времени, можно оценить по формуле (11) и представить в виде графика, изображенного на рисунке 5, а время, потребное для достижения чистоты воздуха 99 % с помощью вентилятора с производительностью 0,86 м<sup>3</sup>, составит 192 с.

$$\bar{V}_B = 100\% - \frac{V_{f\_0} \cdot e^{-\frac{Q}{V_n} t}}{V_n} 100\% = 100\% - \frac{9,4 \cdot 2,71^{-\frac{0,86}{60} t}}{60} 100\% \quad (11)$$

где  $V_{f\_0}$  – начальный объем фреона в паровой фазе, м<sup>3</sup>;  $Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $V_n$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $t$  – время удаления, с.

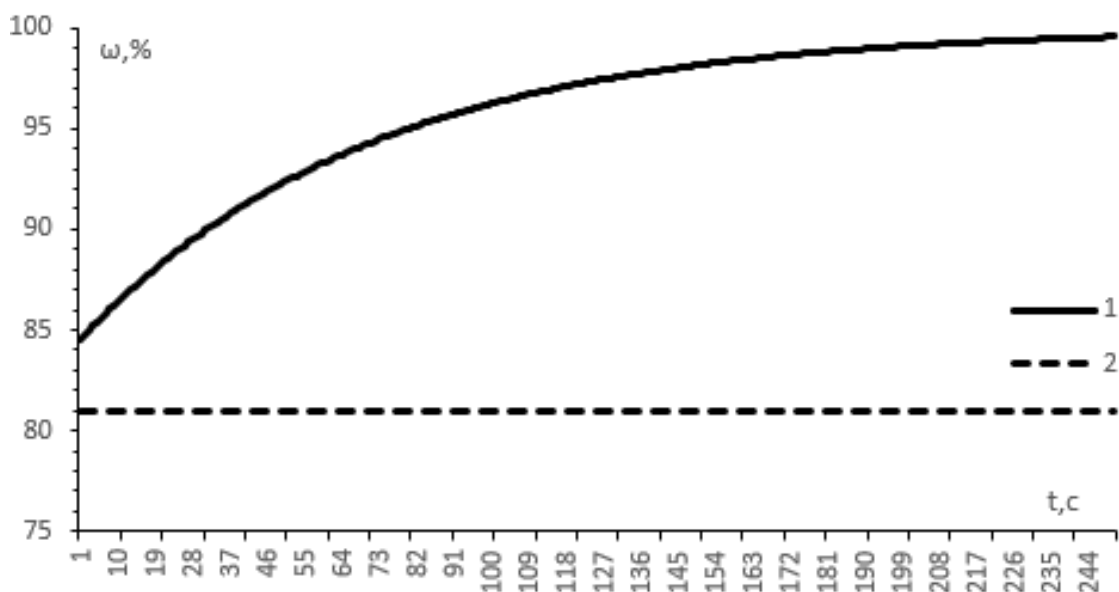


Рис. 5. Изменение чистоты воздуха с течением времени:  
1 – расчет по (11), 2 – граница допустимой концентрации по [1]

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{V_{\text{п}} / 100\%}{V_{f-0}}\right) * V_{\text{п}}}{Q} = -\frac{\ln\left(\frac{60 \cdot 0,01}{9,4}\right) 60}{0,86} = 192 \text{ с} \quad (12)$$

**Заключение.** Предложенная методика позволяет оценить динамику изменения концентрации кислорода в помещении и обосновать эффективность выбранной системы газоудаления.

### Список литературы

- [1] Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны // ГН 2.2.5.686-98.
- [2] Богдасhev Н., Попков В. А. Курс лекций коллоидная химия: [Электронный ресурс]. URL: <http://pandia.ru/text/78/117/27983-9.php>. (Дата обращения 21.02.2018).
- [3] Осаждение в гравитационном поле: [Электронный ресурс]. URL: <http://poznayka.org/s73731t1.html>. (Дата обращения: 21.02.2018).
- [4] Луканин В.Н. Теплотехника. – М.: Высш. Шк., 2000. – 671 с.

**Завальный Федор Геннадьевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [fedor.zavalnyj1995@gmail.com](mailto:fedor.zavalnyj1995@gmail.com)

**Гридчин Николай Викторович** – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [gridchin2610@gmail.com](mailto:gridchin2610@gmail.com)

**Птахин Антон Викторович** – ассистент кафедры КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [dr.ago.suv@mail.ru](mailto:dr.ago.suv@mail.ru)

А.А. Жинов, А.П. Железнов

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Геотермальные энергетические ресурсы подразделяются на насыщенный пар, влажный пар и горячую воду. Главным достоинством геотермальных энергоресурсов является их практическая неиссякаемость и независимость от окружающей среды.

В настоящее время эти ресурсы используются достаточно мало в связи со сложностью их добычи, удаленностью от потребителей, недостаточно разработанными технологиями и опытом использования.

Тепло геотермальных источников может быть использовано для производства электроэнергии по различным схемам (Рисунок 1) на геотермальных электростанциях (ГеоЭС) [2]. Применение в таких схемах низкокипящих рабочих тел (НРТ) дает возможность более эффективно использовать низкопотенциальное тепло. Одной из главных задач при этом является выбор оптимального НРТ с учетом параметров геотермального теплоносителя и основных требований термодинамики, экономики и экологии.

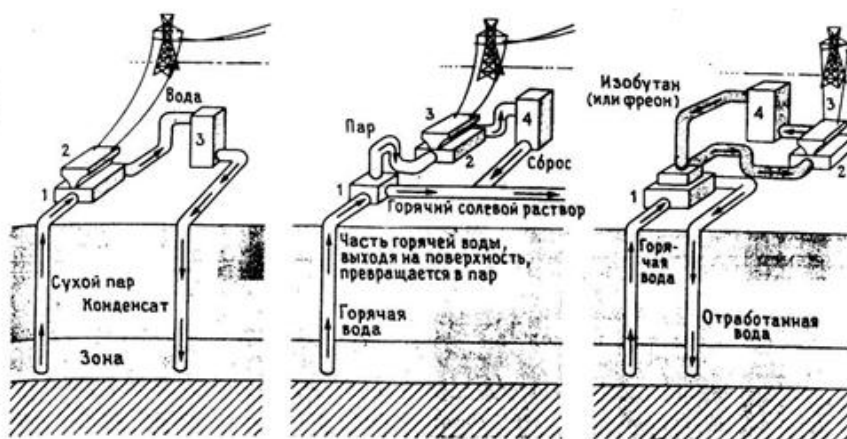


Рис. 1. Схемы выработки электроэнергии

Распространение получили следующие варианты тепловых схем для геотермальных энергоустановок:

Одноконтурная схема, представленная на Рисунке 2.

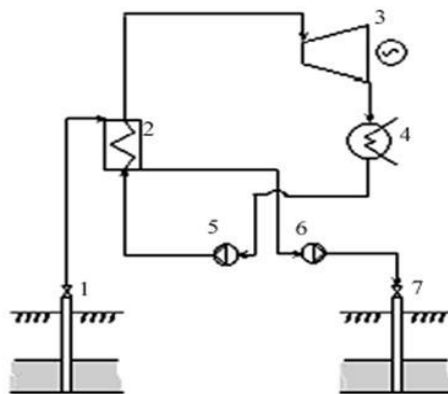


Рис. 2. Одноконтурная схема ГеоЭС

Пароводяная смесь подается из подъемной скважины 1 в сепаратор 2, откуда пар подается на турбину 3, а сепарат прокачивается насосом 6 в нагнетательную скважину 7. Реинжекция в скважину необходима для того, чтобы обеспечить требуемый уровень экологической безопасности, т.к. сепарат содержит в себе кремнезем, соединения бора, мышьяка, сероводород, вредные микрокомпоненты. Сброс отсепарированной геотермальной воды в водоемы не допустим, из-за солевого и теплового загрязнения.

Двухконтурная схема с НРТ, представленная на Рисунке 3.

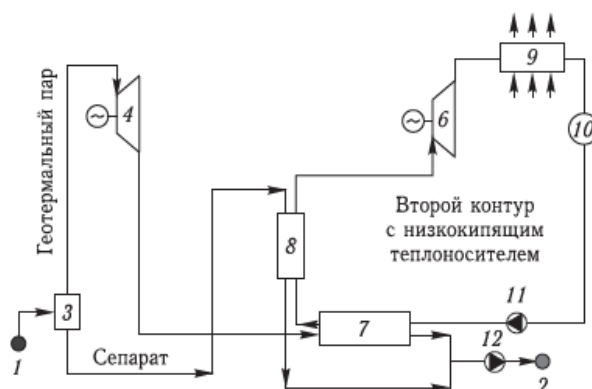


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема комбинированной ГеоЭС с бинарным циклом НРТ:

- 1 – питательная скважина; 2 – нагнетательная скважина; 3 – сепаратор; 4 – турбина;
- 5 – генератор; 6 – турбина на НРТ; 7 – конденсатор-испаритель; 8 – пароперегреватель;
- 9 – воздушный конденсатор; 10 – ресивер; 11 – циркуляционный насос;
- 12 – нагнетательный насос

В качестве рабочего тела бинарного цикла ГеоЭС вместо водяного пара используют такие вещества, как: н-пентан, толуол, гексан, изобутан, фреоны, аммиак, водоаммиачную смесь и т.д. Эти НРТ имеют хорошие теплофизические характеристики при использовании низкопотенциального тепла.



Достоинства НРТ:

- сравнительно низкая критическая и, следовательно, рабочая температура (130-280°C), температура кипения (для пентана 36°C, гексана 68,7°C), что позволяет утилизировать теплоту в широком температурном диапазоне;
- высокая температура конденсации при атмосферном давлении (35-45°C), благодаря чему можно использовать воздушные конденсаторы даже в тяжелых летних условиях, сохраняя при этом достаточно высокие температурные напоры в конденсаторах и выполняя их с атмосферным или близким к нему давлением, что существенно упрощает и удешевляет конструкцию.
- низкая температура замерзания (от -70 до -80°C), что является важным улучшающим обстоятельством для эксплуатации установки в зимнее время;
- высокая, существенно больше чем паров воды, плотность паров НРТ, что позволяет выполнять паровые турбины, паропроводы с заметно лучшими габаритными характеристиками;
- низкие скорости звука в парах НРТ, что упрощает конструкции, проектирование и изготовление турбин;
- использование НРТ позволяет избавиться от эрозии лопаток последних ступеней, т.к. турбина работает в области перегретого пара.
- небольшая потеря мощности станции при снижении со временем давления и температуры на устье скважины.

К недостаткам НРТ относятся:

- взрывопожароопасность ряда НРТ;
- невысокие транспортные свойства в передаче теплоты вследствие низкой теплопроводности, что приводит к необходимости существенно развить поверхности теплообмена и, следовательно, габариты и массу теплообменных аппаратов;

В работе рассмотрен следующий вариант тепловой схемы (Рисунок 4) бинарной ГеоЭС с различными НРТ. В качестве греющей среды используется геотермальный пар с температурой  $t = 180^\circ\text{C}$ , который проходя через испаритель 2, отдает тепло и меняет фазовое состояние НРТ, превращая его в пар, который поступает в турбину

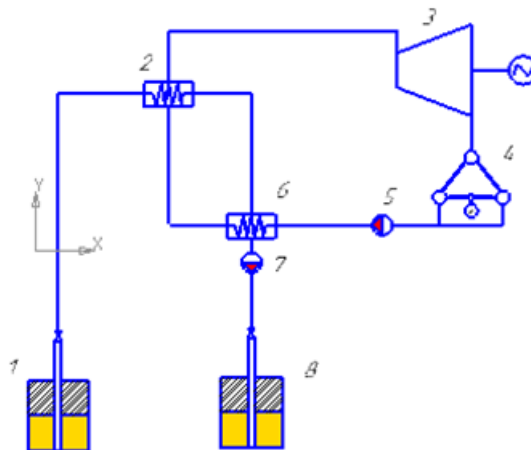


Рис. 4. Схема бинарной ГеоЭС

Например, для установки с фреоном R-134a во втором контуре при температуре за испарителем  $t=160^{\circ}\text{C}$  и давлении  $p=0,5\text{МПа}$ , используя термодинамическую диаграмму  $i\text{-lg}P$  [4] можно определить, что параметры фреона находится в области перегретого пара, следовательно данный вид НРТ подходит для заданных параметров.

Для других исследованных НРТ критические параметры представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Критические параметры исследованных НРТ.

	R-600a (изобутан)	R-170 (этан)	R-717 (аммиак)	Н-пентан	R-12
Ткр, °С	135,92	32,73	132,35	197,2	112
Ркр, бар	36,85	50,1	113,53	33,4	41,57
$V_{кр} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	0,0051	0,0046	0,0043	0,0087	0,0018

В результате исследования получено, что для заданных параметров геотермального пара, например, н-пентан не подходит в качестве НРТ для принятой схемы, т.к. параметры НРТ перед турбиной находятся ниже линии насыщения. Фреон марки R-12 не соответствует современным экологическим требованиям. Все остальные рассмотренные вещества удовлетворяют необходимым требованиям.

Наиболее подходящим из рассмотренных НРТ является R-717 (аммиак), т.к. он имеет хорошие теплофизические характеристики, а его стоимость ниже, чем у остальных НРТ.

### Список литературы

- [1] Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии МРСУ. 2004.
- [2] Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика 2-е издание. – М.: Физматлит, 2012
- [3] Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. – 2014. – №6
- [4] Термодинамические диаграммы  $i\text{-lg}P$  для хладагентов. М.: АВИА-САНКО, 2003. – 50 с.

**Жинов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

**Железнов Алексей Павлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alexej.zheleznov2016@yandex.ru

И.С. Хахалев, В.Ю. Ильичев

## **ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В ходе работы турбогенераторов неизбежно возникают вибрации. Природа вибраций может быть разной, но все пути возникновения возмущения негативно сказываются на деталях, узлах, модулях и всей установки в целом. При возникновении интенсивной вибрации не исключена возможность аварии.

Для выявления причин возникновения вибраций необходимо знать, что турбогенератор представляет собой систему элементов, способных возбуждать, а также воспринимать и усиливать колебания. Основными элементами данной системы можно считать:

- роторы;
- опоры роторов (подшипники со стойками);
- корпуса (цилиндры турбины, статор генератора);
- фундамент.

В литературе, для рассмотрения системы элементов, участвующих в восприятии и передаче вибрации, обычно рассматривают динамическую схему турбоагрегата. В данной схеме роторы турбины и электрогенератора опираются на выносные (стояковые) или встроенные в статор подшипники. В свою очередь подшипники и статоры установлены на общем фундаменте. Так же обычно используют систему «ротор-опоры», которая состоит из гибкого ротора на массивных, податливых опорах, включающих упругую масляную пленку. Фундамент представляет собой систему упругих элементов - стоек, ригелей, продольных балок и консолей.

Динамические схемы показывают взаимную связь этих элементов и пути передачи динамической нагрузки от одних элементов к другим. Динамическая схема современного турбоагрегата условно изображена на рис. 1, а ротора на упруго - массивных опорах на рис. 2. Источником возмущающих сил, вызывающих повышенную вибрацию, чаще всего являются роторы турбин и генератора. Как видно из приведенных схем, динамическая нагрузка от роторов передается через масляную пленку подшипникам, а от них фундаментным плитам и фундаментам.

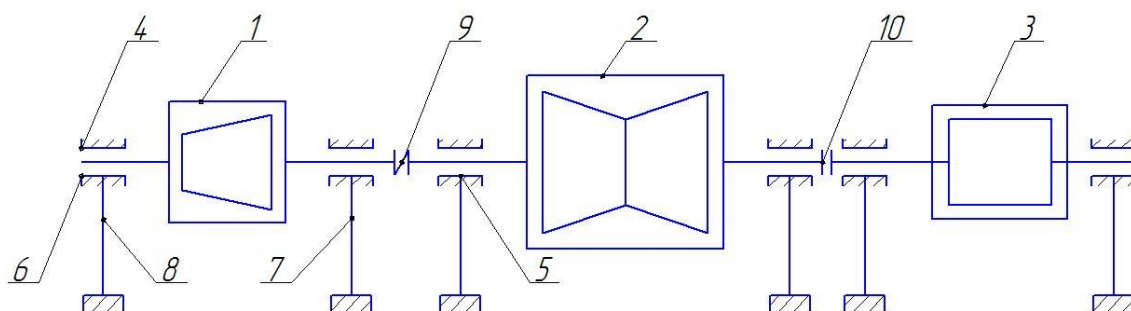


Рис. 1. Динамическая схема турбогенератора:

1 – ЦВД, 2 – ЦНД, 3 – генератор, 4 – стойка подшипника, 5 – фундаментальная плита, 6 – ригель фундамента, 7 – продольная балка фундамента, 8 – стойка фундамента, 9 – гибкая муфта, 10 – полужесткая муфта

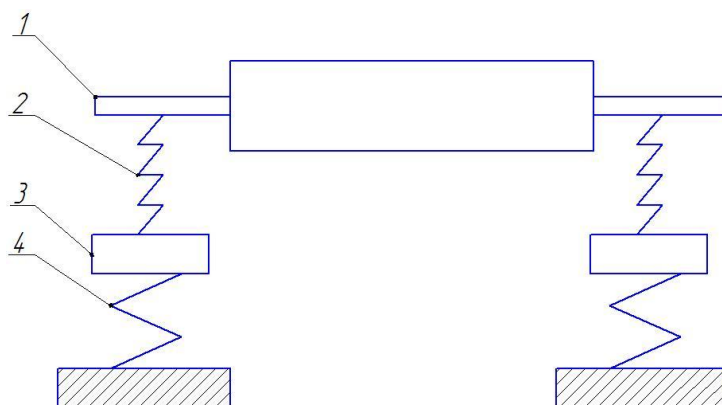


Рис. 2 Ротор на упруго-массивных опорах:

1 – ротор, 2 – масляная пленка, 3 – масса подшипника, 4 – упругость подшипника

Для исследования вибраций турбоагрегата, кроме его динамической схемы необходимо знать источники возникновения вибрации.

В ходе работы турбоагрегата, вибрация конструкции может быть вызвана:

- увеличением действующих или появлением новых возбуждающих сил;
- ослаблением статической жесткости;
- приближением системы к резонансу.

В отдельных случаях повышенная вибрация является следствием более сложных, нелинейных явлений, основные из которых рассмотрены далее [1].

Одна из наиболее распространенных причин вибрации - возникновение возмущающих сил механического характера. Основная причина появления таких сил - неуравновешенность элементов роторов, и как следствие, - действие на роторы центробежных сил. Следствием неуравновешенности элементов роторов является перераспределение масс в окружном направлении, в результате чего происходит смещение главной центральной оси инерции ротора относительно оси его вращения. Под действием центробежных сил от неуравновешенности вращающийся ротор приобретает динамический прогиб, конфигурация которого определяется параметрами

системы «ротор-опора» и характером распределения неуравновешенности по длине ротора.

Непосредственными причинами возникновения неуравновешенности роторов турбин и генераторов при их изготовлении и в процессе эксплуатации могут быть:

- нарушения круговой симметрии сечений ротора, заложенные в конструкции и возникающие из-за неточности механической обработки;
- прогиб, связанный с остаточными деформациями от механической и термической обработки;
- ослабления посадки рабочих дисков и полумуфт;
- упругий прогиб, определяемый термической нестабильностью материала ротора;
- обрыв лопаток или бандажей, разрушение дисков или других деталей ротора;
- неравномерный износ рабочих лопаток;
- неравномерный занос лопаточного аппарата турбины солями;
- смещение элементов обмотки ротора генератора;
- ослабление посадки бандажных и центрирующих колец и полумуфт;
- упругий прогиб вследствие неравномерного нагрева или охлаждения ротора по сечению.

Также немаловажной причиной механической вибрации может являться тепловая разбалансировка. Закономерности тепловой разбалансировки роторов турбоагрегатов, связанные с температурными деформациями ротора вследствие неравномерного нагрева или охлаждения по поперечному сечению, в настоящее время являются наименее изученными. В то же время значительное количество машин имеет высокий уровень вибрации именно в нагретом состоянии.

Также причиной повышенной вибрации может послужить ослабление жесткости системы. Известно, что амплитуда вибрации линейной системы обратно пропорциональна ее статической жесткости и прямо пропорциональна динамическому коэффициенту. Динамический коэффициент, характеризующий близость к резонансу, определяется отношением частоты возбуждения к собственным частотам системы и ее демпфирующими свойствами. Иными словами, изменение статической жесткости и приближение системы к резонансу взаимно связаны. Если в результате ослабления жесткости элементов турбоагрегата возникает резонанс, то он обычно наблюдается для колебаний того же направления, что и ослабление жесткости системы.

Еще одной причиной появления возмущающих сил может служить продольная вибрация подшипников. Продольная вибрация подшипников турбин и генераторов вызывается угловыми перемещениями шеек ротора, вращающегося с прогибом, и внецентровым приложением динамической нагрузки к подшипнику. Вращение изогнутого ротора вызывает соответ-

вующий поворот вкладышей, а с ним и корпусов. Следуя в своем движении за угловыми перемещениями цапф, подшипники совершают продольные колебания [2].

Также колебания роторов могут возникнуть из-за возбуждения низкочастотной вибрации. Практически у всех современных турбоагрегатов в общем частотном спектре вибрации подшипников и вращающихся роторов обнаруживаются низкочастотные составляющие. Низкочастотная вибрация иногда внезапно возникает и достигает угрожающей величины, что может вызвать повреждение машины. Основной причиной возбуждения низкочастотной вибрации является потеря ротором динамической устойчивости на масляном слое опорных подшипников. Также причиной низкочастотной вибрации иногда является появление циркуляционных сил в концевых лабиринтных уплотнениях. В отдельных, относительно редких, случаях низкочастотная вибрация возникает как следствие субгармонического резонанса системы «ротор-опоры» [3].

Проведенный обзор механизма вибраций турбоагрегатов позволит заложить способы их снижения в ходе отработки конструкции конкретного проектируемого турбоагрегата.

#### Список литературы

[1] *Брановский М.А., Лисицын И.С., Сивков А.П.* Исследование и устранение вибрации турбоагрегатов. – М.: Энергия. – 1969 г. – С. 22-92.

[2] *Липсман С.И., Музыка А.Т., Липсман В.С.* Предупреждение и устранение вибрации роторных машин. – Киев.: Техніка. – 1968 г. – С. 40-52.

[3] *Жирицкий Г.С., Стрункин В.А.* Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. – М.: Машиностроение. – 1968 г. – С. 107-180.

**Хахалев Игорь Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: Igreyty.Khakhalev@yandex.ru

**Ильичев Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

А.К. Карышев, М.А. Малинкина

## **РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТАКТНОЙ ГАЗОПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Структура оборудования энергосистем нашей страны характеризуется тем, что основная доля электрической и тепловой энергии производится на ГРЭС и ТЭЦ паротурбинными блоками, сжигающими минеральное топливо (преимущественно – каменный уголь и природный газ). Эти блоки, однако, имеют удельные экономические показатели, близкие к своему техническому пределу, даже с учетом перспективы их возможного совершенствования (за счет повышения начального давления и температуры, введения вторичного промперегрева, уменьшения затрат энергии на собственные нужды и т. д.).

Несмотря на то что в этой области имеются значительные резервы по дальнейшему улучшению основных удельных технико-экономических показателей использования топливно-энергетических ресурсов в рамках уже освоенных типов энергооборудования, вопрос о переходе на более совершенные способы с созданием соответствующих машин и аппаратов является весьма актуальным [1].

К числу мероприятий, направленных на повышение экономичности тепловых электростанций, следует отнести развитие работ в области комбинированных циклов, в первую очередь парогазовых установок, позволяющих значительно повысить КПД цикла в зависимости от схемы подключения газовой турбины. Комбинирование паро- и газотурбинных установок в одном тепловом цикле позволяет сочетать высокотемпературный (в ГТУ) подвод и низкотемпературный (в конденсаторе паровой турбины) отвод теплоты и в результате обеспечивает повышение термического КПД цикла, а, следовательно, экономичности производства электрической энергии, особенно значительное при повышении начальной температуры газов в ГТУ.

Простейшие комбинированные установки могут быть реализованы при использовании тепла отработавших в ГТУ газов для подогрева питательной воды и вытеснения вследствие этого паровой регенерации. Термодинамически они наименее эффективны (по сравнению со сбросной схемой здесь два потока уходящих газов, потери с которыми возрастают), однако практически весьма рациональны для модернизации действующих ТЭС: вследствие слабых технологических связей между паровой и газотурбинной частями облегчается компоновка ГТУ и выбор их типоразмеров; поскольку вытеснение паровой регенерации приводит к значительному повышению мощности паровых турбин, капитальные затраты, разнесенные на сумму газотурбинной и дополнительной паротурбинной мощности, оказываются небольшими.

Показатели ПГУ и эффективность использования газовых турбин в комбинированных циклах существенно зависят от параметров и показателей ГТУ. Повышение начальной температуры газов и совершенствование турбомашин, приводящие к повышению КПД ГТУ при автономной работе, при прочих равных условиях увеличивают долю газотурбинной мощности в комбинированных циклах. Это не только повышает КПД, но и снижает удельную стоимость всей ПГУ (растет ее мощность на единицу расхода газов, т.е. при тех же габаритах и массе).

Наиболее подходящим топливом для ПГУ является бессернистый природный газ, применение которого позволяет снижать температуры уходящих газов до экономически оптимального уровня (100–110 °С), не опасаясь низкотемпературной коррозии хвостовых поверхностей. Возможно применение в качестве топлива генераторного газа, получаемого путем газификации угля. ПГУ с газификацией угля или его прямым сжиганием в кипящем слое под давлением являются реальными установками для существенного повышения эффективности тепловых электростанций на угле при одновременном резком снижении вредных выбросов в атмосферу пыли, оксидов серы и азота.

Все комбинированные установки с паровыми и газовыми турбинами по принципу взаимодействия рабочих тел можно объединить в две основные группы 1) контактные схемы, в которых происходит смешение перед расширением продуктов сгорания топлива в камере сгорания ГТУ с пароводяным рабочим телом, 2) отдельные схемы, в которых пароводяное и газообразное рабочие тела движутся по самостоятельным трактам (контурам), взаимодействуя лишь посредством теплообмена в аппаратах поверхностного типа. В первых схемах расширение рабочего тела осуществляется в газопаровой турбине, а для вторых схем характерно наличие двух самостоятельных контуров, по которым циркулирует пар и газ отдельно.

Газопаровые установки характеризуются низким расходом пара, относительный расход которого  $d$  обычно не превышает 0,20–0,22 от расхода воздуха через компрессор. В ряде случаев генерация указанного расхода пара осуществляется в котле-утилизаторе только за счет отходящей от газовой турбины теплоты. Такую газопаровую установку будем называть бинарной и обозначать БГПУ[1].

Для исследования была выбрана схема газопаровой установки (ГПУ) с контактной газопаровой турбиной (ГПТ) (рис. 1), а также схема простой ГТУ без паровой части для сравнения эффективности применения пара.

В схеме (рис. 1) газ из камеры сгорания и пар из котла-утилизатора поступают в газопаровую турбину (ГПТ), приводящую во вращение компрессор. Пар расширяется в корневой зоне лопаточного аппарата турбины, совершая полезную работу и одновременно охлаждая прикорневую, наиболее напряженную, с точки зрения прочности, область. Это позволяет при одинаковой температуре перед турбиной увеличить запас прочности, а при одинаковом запасе повысить начальную температуру газа, а, следовательно, и КПД цикла.



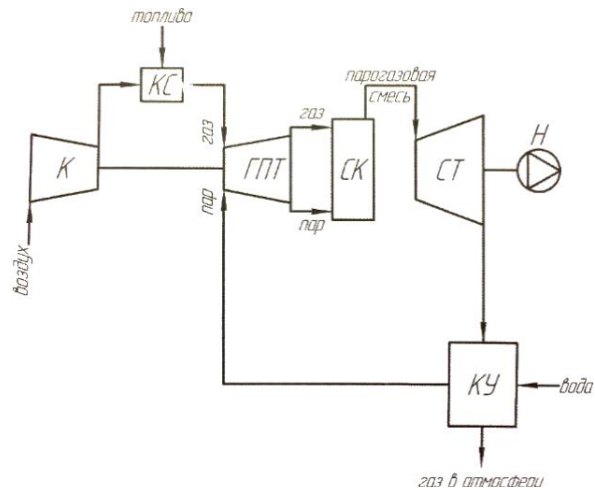


Рис. 1. Схема ГПУ с контактной ГПТ

При расчете тепловой схемы принимаются следующие допущения:

- Рабочие тела не смешиваются в ГПТ, что соответствует равенству давлений в зазорах между ступенями.
- В ГПТ не происходит теплообмена между газом и паром, что в определенной мере справедливо для соплового аппарата и в меньшей степени для рабочего колеса.

Сработав теплоперепады в ГПТ, после газопаровой турбины пар и газ поступают в смесительную камеру (СК), в которой происходит их смешение при постоянном давлении. Затем полученная парогазовая смесь направляется в силовую турбину, в которой совершает полезную работу, и сбрасывается в котел-утилизатор. За счет тепла уходящих газов генерируется пар, который направляется в газопаровую турбину.

Достоинством рассматриваемой схемы, по сравнению с отдельной, является более простота конструкции, не требующая дополнительного оборудования для паровой части.

Исходные данные для расчета: параметры окружающей среды:

- $p_n = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $T_n = 288 \text{ К}$ .
- температура торможения газа после камеры сгорания –  $T_3^* = 1500 \text{ К}$ ;
- давление заторможенного потока на выходе из силовой турбины  $p_4^* = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;
- температура уходящих газов из котла-утилизатора  $T_{yx} = 383 \text{ К}$ ;
- расход воздуха на охлаждение  $g_{охл} = 0,08$ ;
- температура пара –  $600 \text{ К}$ .

Коэффициенты восстановления давления, КПД элементов ГПТ принимались согласно рекомендациям [1].

Расчет был проведен по методике, описанной в [3] для простой схемы ГТУ и для схемы с паровой частью (рис. 1).

По результатам расчетов были построены зависимости основных параметров эффективности  $l_e$  и  $\eta_e$  от степени повышения давления в компрессоре  $\pi_k^*$  при разном соотношении давлений продуктов сгорания и пара перед турбиной, а также зависимость расхода пара от степени повышения давления в компрессоре. Результаты представлены на рисунках 2-4.

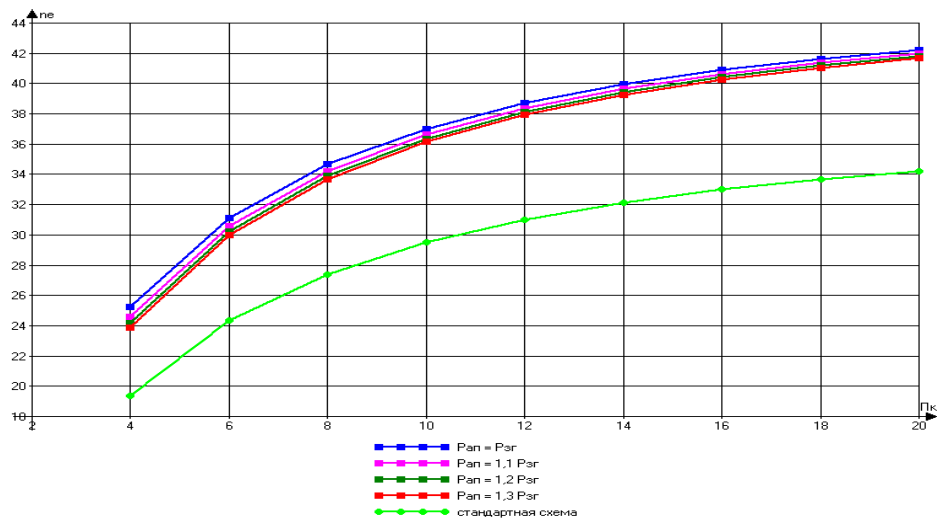


Рис. 2. Зависимость  $\eta_e$  от степени повышения давления в компрессоре

Как следует из результатов расчета КПД газопарового цикла практически на 8% выше соответствующего КПД цикла простой ГТУ. Оптимальная степень повышения давления по эффективности цикла при принятых параметрах практически совпадают. Влияние начального давления пара на КПД при оптимальном значении  $(\pi_k)_\eta$  не превышает 1%.

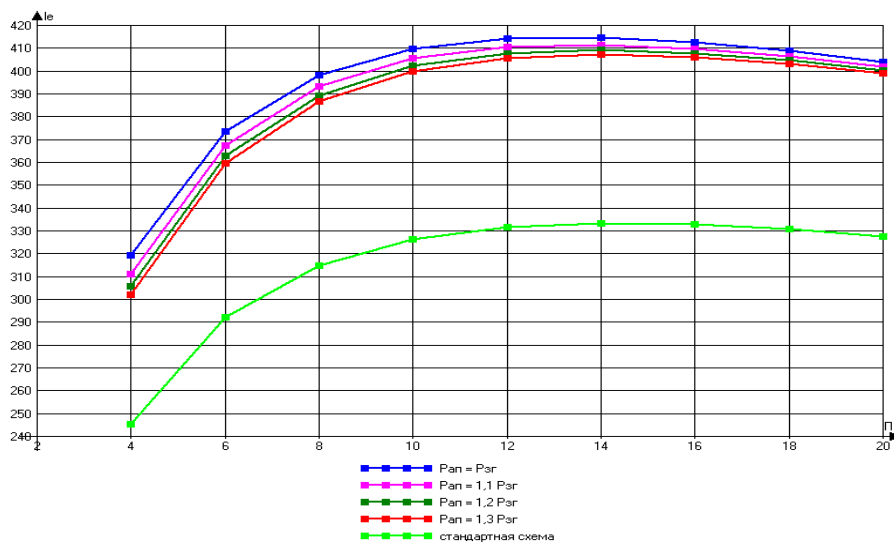


Рис. 3. График зависимости  $l_e$  от  $\pi_k^*$  при разном соотношении давлений газа и пара перед турбиной

Оптимальная степень повышения давления по удельной работе в газопаровом цикле смещается в сторону меньших значений (при принятых параметрах с 14 до 12) и значительно меньше оптимального значения степени повышения давления по эффективности цикла  $(\pi_k)_\eta$  для чисто газового цикла. Увеличение удельной работы газопарового цикла при оптимальной  $(\pi_k)_l$  достигает 30%, что приведет к снижению расхода воздуха через компрессор примерно на такую же величину.

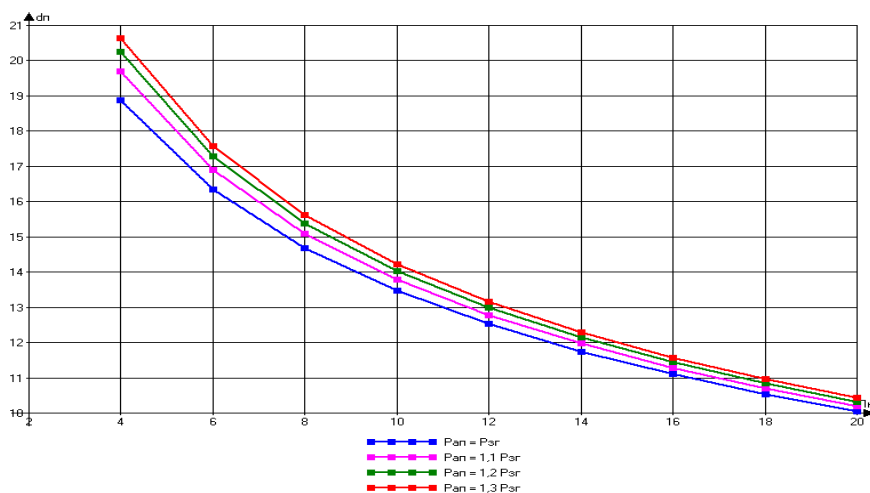


Рис. 4. График зависимости удельной выработки пара на 1 кг воздуха от степени повышения давления

**Вывод:** проанализировав полученные зависимости КПД и удельной работы от степени повышения давления в компрессоре ( $\pi_k^*$ ) при различных соотношениях давлений пара и продуктов сгорания, можно сделать вывод о том, что оптимальным является соотношение давлений пара и продуктов сгорания  $P_{ап}^* = P_{зг}^*$ . Так как при данном соотношении, при фиксированном степени повышения давления получается наибольшее значение КПД и удельной работы цикла. В свою очередь для данного соотношения давлений оптимальной является  $\pi_k^* = 12$ , так как при данном степени повышении давления достигается наибольшая удельная работа цикла, а при дальнейшем повышении  $\pi_k^*$  КПД возрастает незначительно.

### Список литературы

- [1] Арсеньев Л. В., Тырышкин В. Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982 г.–247 с.
- [2] Зысин В.А., Комбинированные парогазовые установки и циклы. – Государственное энергетическое издательство, Ленинград 1962 г., – 184 с.
- [3] Канаев А.А., Корнеев М.И. Парогазовые установки. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974 г.–240 с.
- [4] Степанов И.Р., Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы – Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2000г., 169 с.

**Карышев Анатолий Константинович** – канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru

**Малинкина Мария Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mariamalinkinaa@yandex.ru

А.С. Голиков

## СИСТЕМА УПРУГОЙ ПОДВЕСКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЛОПАТКИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Физический эксперимент занимает значительную часть научного познания, в том числе и в области аэродинамики проточной части турбомашин [1]. Однако, эти исследования сопряжены с трудностями, обуславливаемыми особенностями течения рабочего тела по проточной части турбомашин. Поэтому реализация натурального эксперимента на реальной машине не всегда представляется возможным, и из-за этого изучение взаимодействия потока с рабочими органами чаще проводятся на экспериментальных установках различной степени сложности.

Одним из самых сложных явлений для изучения является вибрация лопаточного аппарата под воздействием потока. Поскольку непосредственное использование реальных лопаток сопряжено как проблемами размеров и материалов, из которых они сделаны, так и создания действительных условий функционирования в машине, то в основном для исследований используются экспериментальные лопатки, имитирующие реальные, по определенным параметрам.

В основном, экспериментальная лопатка состоит из двух основных частей (рис.1) [2]: аэродинамического профиля (1) и упругой системы (2). Упругая система имитирует прочностные свойства реальной лопатки, а аэродинамический профиль воспроизводит обтекание профиля реальной лопатки и передает аэродинамическое усилие на упругую систему.

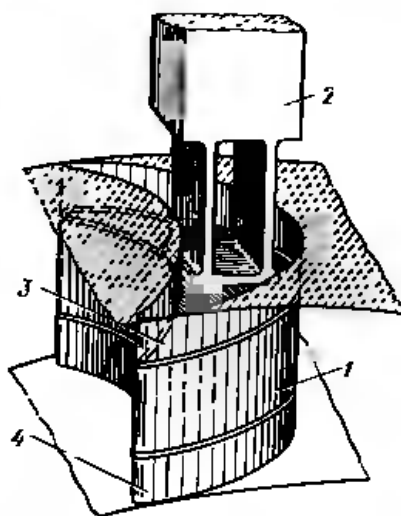


Рис. 1. Экспериментальная лопатка

Для научно-учебной установки, созданной для исследования вибрационных характеристик рабочей лопатки, была разработана специальная система закрепления экспериментальной лопатки в решетке профилей. Система состоит из универсальной кассеты 4 (рис. 3.) и сменной решетки профилей 3, в которой установлен профиль 1, закрепленный на упругой системе 2.

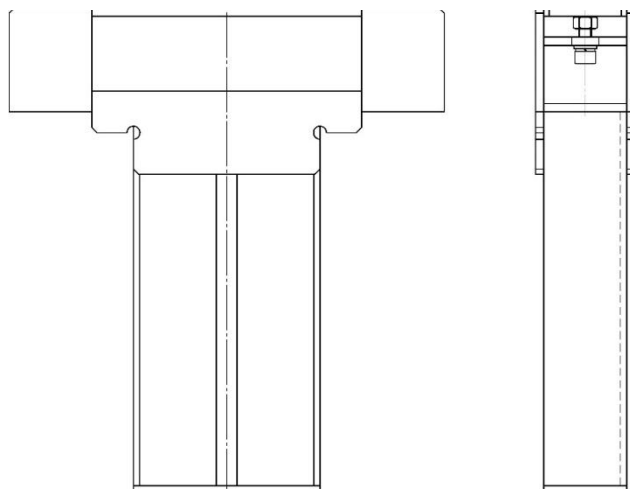


Рис. 2. Внешний вид кассеты

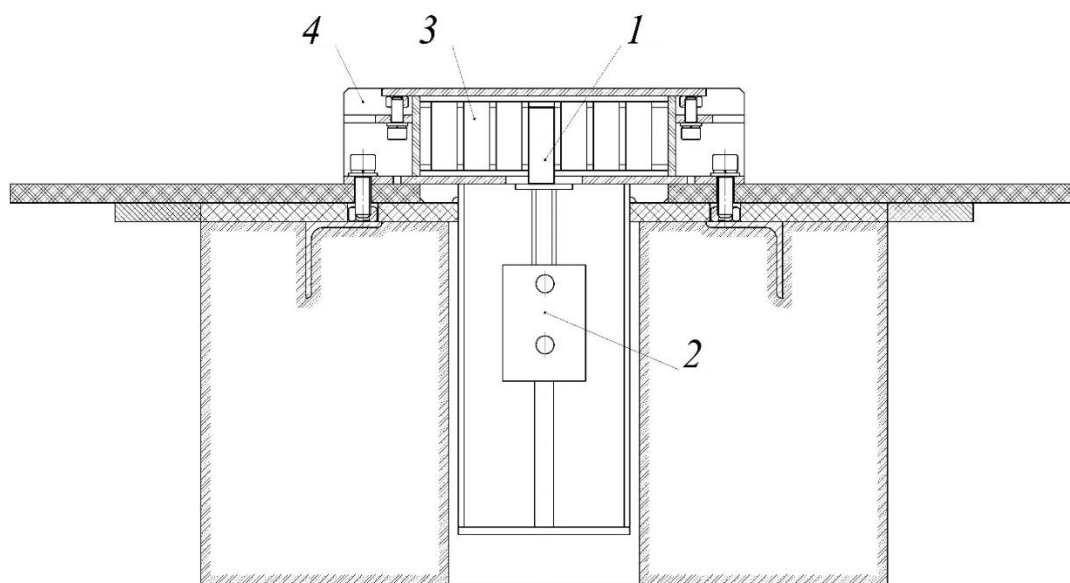


Рис. 3. Кассета с установленной решеткой в установке

Созданная система позволяет проводить физические эксперименты по исследованию аэроупругих явлений в решетках турбомашин.

#### Список литературы

- [1] Повх Н. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх Н. Л. – «Машиностроение», 1974. – 480 с.
- [2] Самойлович Г. С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин / Самойлович Г. С. – М.: 1969 – 444 с.

**Голиков Андрей Сергеевич** – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: golickov.a.s@yandex.ru

А.А. Жинов, С.А. Иванов

## **СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН ОТ КРУПНОДИСПЕРСНОЙ ВЛАГИ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Жидкая фаза в рабочем теле в последних ступенях паровых турбин вызывает множество проблем, в числе которых эрозионный износ элементов проточной части, что может привести в последствии к авариям агрегата. Удаление крупнодисперсной влаги из проточной части турбины существенно снижает эрозионный износ лопаток и наряду с этим способствует уменьшению потерь энергии от влажности, т.е. повышению относительного внутреннего КПД ступеней. Опыт, полученный в ходе большого числа экспериментов и эксплуатации турбин с установленными средствами влагоудаления, показывает, что эффективно удаётся удалить только крупнодисперсную влагу, которая составляет небольшую долю общего влагосодержания пара. Для защиты проточной части от влаги применяются комплексные меры: установка сепарационных ступеней, защита специальными покрытиями и усиление конструкции рабочих лопаток. Сепарационные устройства можно разделить на три группы, соответствующие способам сепарации влаги в турбинах: периферийная сепарация в ступени, внутриканальная сепарация, внешняя сепарация в выносных сепарационных устройствах.

Так как вращающееся рабочее колесо уже само по себе является сепаратором, применяется периферийная сепарация, при которой влага за счет инерционных сил отбрасывается к периферии ступени, где улавливается специальными камерами с влагозадерживающими выступами, и затем удаляется из проточной части турбины. Отвод влаги в область пониженного давления сопровождается отсосом некоторого количества пара. При периферийной сепарации влагоудаление осуществляется из зазора за сопловой решеткой и с рабочих лопаток, а также из зазора за рабочими лопатками. Окружная скорость крупнодисперсной влаги за рабочими лопатками, как правило, выше, чем перед ними. Поэтому эффективность влагоудаления за рабочими лопатками существенно выше, чем за сопловыми лопатками из-за этого комбинируют сепарацию в рабочем колесе и в сопловой решетке.

Удаление влаги в сопловой решетке происходит за счет специальных прорезей или щелей в лопатках, расположенных в периферийных частях пера лопаток (выше чем 0,6...0,8 относительной длины лопатки) [1]. Подобный способ называется внутриканальной сепарацией. Щели, через которые отсасывается жидкая пленка, соединяют с областью низкого давления, например, с конденсатором, через внутренние полости сопловых лопаток. Весьма эффективно располагать щель на выходной кромке сопел. В этом случае практически вся крупнодисперсная влага отводится через

щель. При отсутствии сепарации пленка, достигая выходных кромок лопаток, дробится потоком пара на крупные капли, которые, ударяясь о рабочую лопатку, вызывают эрозионный износ и создают тормозной момент на роторе турбины.

Еще один способ сепарировать влагу предполагает отвод из турбины всего потока пара к специальному сепаратору, который обычно располагается между ЦВД и ЦНД турбины и чаще всего встречается в турбинах АЭС. Сепараторы отличаются небольшим гидравлическим сопротивлением и, соответственно, малыми скоростями движения пара при сепарации. Осаждение влаги в сепараторах осуществляется в различного типа жалюзийных каналах, на сетках из проволок диаметром 250...300 мкм с относительным объемом пустоты  $\varepsilon = 98 \dots 99,5\%$  при толщине набивки 100...150 мм, а также в циклонных устройствах [2].

Важно отметить, что увеличение эффективности влагоудаления не должно приводить к снижению экономичности паровых турбин, в связи с этим возникает необходимость точного моделирование процессов сепарации влаги и их исследований. Традиционный расчет влажнопаровых турбин с использованием результатов экспериментов на модельных установках не всегда надежен. Это связано с трудностью соблюдения соответствия основных критериев подобия в модельных и натуральных условиях [3]. Состояние равновесия двухфазной системы, в которой содержатся капли различного диаметра, неустойчиво. Капли малого размера испаряются за счет избыточной поверхностной энергии, в то время как более крупные капли растут. Данный процесс будет продолжаться, пока вся жидкость не будет сосредоточена в частицах достаточно большого размера. Кроме того, крупные капли под воздействием потока и соударений с более мелкими каплями разрушаются. В [3, 4] рассмотрен процесс возникновения капель жидкости в межлопаточном канале турбинной решетки. Переохлаждение пара, возникающее в решетках турбомашин [3, 4, 5] зависит от геометрии канала, параметров потока в нем и от состояния пара на входе в ступень.

К настоящему моменту в мире проведено много экспериментальных аналитических и численных исследований структуры влажно-парового потока, но до сих пор нет достаточно универсальной и точной модели таких потоков.

Большое количество экспериментов выполнено газодинамическим отделом кафедры ПГТ МЭИ [6]. Например, было исследовано как в межлопаточном канале сопловой решетки формируются потоки капель различного диаметра. Показано, что образующаяся в канале влага состоит из:

- первичной влаги, пролетающей решетку без взаимодействия с лопатками;
- капель, образованных взаимодействием первичной влаги и основного потока с жидкой пленкой на вогнутой поверхности профиля;
- влаги возникшей при взаимодействии первичной влаги и основного потока у входной кромкой лопатки;

- потока капель, появившихся в косом срезе решетки из пленки на диффузорном участке спинки профиля;
- капель, срывающихся и дробящихся в области выходной кромки лопатки;
- парокapельного слоя, образующегося над пленками.

При совершенствовании систем удаления влаги на периферийных обводах ступеней решается комплексная задача повышения эффективности отбора влаги с одновременным снижением утечек рабочего тела во влагу-улавливающие щели [7].

Другим эффективным средством ослабления вредного влияния влаги на рабочие процессы может оказаться специальное профилирование направляющих лопаток, выполненное на основе уменьшения хорды в верхней трети направляющих лопаток последней ступени.

Перспективы совершенствования систем внутриканального влагоудаления связываются с применением сепарационно-испарительного влагоудаления, когда помимо отвода влаги в щели на направляющих лопатках используется нагрев лопатки перегретым или насыщенным паром с возможным последующим выдувом этого пара через выходные кромки лопаток [8].

Одно из направлений защиты от воздействия капель влаги являются мероприятия по совершенствованию и модернизации рабочих лопаток. В настоящее время в качестве защиты рабочих лопаток от воздействия эрозии применяются различные защитные покрытия. Широкое распространение получило плазменно-ионное покрытие рабочих лопаток последних ступеней турбин. Данный метод основан на распылении материала катода в плазме газового разряда ионизированными молекулами разряженного газа, либо путем распыления в высоком вакууме сформированным пучком ионов, в ходе которого на поверхности лопаток «конденсируется» распыляемое вещество. Покрытие имеет высокую твердость и хорошо противостоит эрозии. Важным достоинством данной технологии является практически неизменяющиеся собственные частоты лопаток.

Так же применяется напайка пластин из износостойкого сплава на входные кромки и спинки лопаток, для упрочнения областей наиболее подверженных ударам капель. Данный способ часто применяют при ремонте лопаток, на которых начинают проявляться следы эрозии. Напаянные пластины существенно изменяют собственные частоты колебаний лопаток и влияют на характер течения пара в межлопаточном канале, как правило с ухудшением к.п.д. ступени.

Таким образом, защита лопаток последних ступеней влажнопаровых турбин остается актуальной и требующей дополнительных исследований задач. Можно сформулировать наиболее важные направления для дополнительного изучения методов эффективной борьбы с влагой в последних ступенях:



- исследование механизмов образования водяных пленок на элементах проточной части;
- поиск и совершенствование существующих моделей образования и срыва водяных пленок с поверхности лопаток;
- совершенствование математических моделей каплеударной эрозии;
- совершенствование и модернизация систем сепарации влаги в проточной части турбины;
- исследование возможности применения современных численных методов для прогнозирования и анализа состояния лопаток, подверженных эрозионному износу.

### Список литературы

[1] *Филиппов Г.А., Поваров О.А., Пряхин В.В.* Исследования и расчеты турбин влажного пара – М.: Энергия, 1973.

[2] *Филиппов Г.А., Поваров О.А.* Сепарация влаги в турбинах. – М.Энергия, 1980.

[3] *Дейч М.Е., Филипов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред – Москва Энергоиздат, 1981.

[4] *Ятчени И.А.* Исследование конденсации пара в вихревых областях Энергетика и транспорт 1971 № 6 – С. 90-98.

[5] *Фаддеев, И.П.* Вероятностная оценка напряженного состояния поверхностного слоя рабочей лопатки турбомашин при каплеударном нагружении / Фаддеев И.П., Лагерев А.В. // Изв. вузов. Сер. Энергетика. – 1984. – № 3. – С. 62-67

[6] *Шубенко-Шубин Л.А.* Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков / Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46-50

[7] *Шубенко А.Л., Ковальский А.Э.* Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты, *ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ Й УСТАТКУВАННЯ*, – 2012. – С. 76-87

[8] *Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф.* Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно- паровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9.

**Жинов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, зав. каф. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

**Иванов Сергей Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Sergio.kotildo@yandex.ru

## **СЕКЦИЯ 5.**

# **КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ**

Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, А.М. Макаренков

## **АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе рассматривается применение принципа активной компенсации [1] влияния фактора случайности параметров стохастической системы на статистические характеристики ее выходного сигнала.

В качестве примера рассматривается решение задачи компенсации влияния случайности физических параметров электрогидравлического следящего привода (ЭГСП) виброиспытательного стенда на статистические характеристики воспроизводимого вибрационного воздействия, прикладываемого к испытываемому изделию. Проблема состоит в том, что из-за нестационарности параметров ЭГСП, обусловленной как внешними (температура окружающей среды), так и внутренними (содержание газовой фазы в рабочей жидкости) случайными факторами, имеет место искажение упомянутых статистических характеристик. Таким образом, ЭГСП следует рассматривать как стохастическую систему со всеми особенностями ее поведения.

В качестве исходной математической модели ЭГСП рассматривается типичная линеаризованная модель, где случайными являются следующие физические параметры: коэффициент вязкого трения на золотнике электрогидравлического усилителя (ЭГУ), модуль объемной упругости рабочей жидкости, коэффициент передачи электронного усилителя сигнала ошибки, коэффициент передачи цепи электрической обратной связи по положению штока гидроцилиндра. Все перечисленные параметры представляют собой случайные величины с нормальным законом распределения плотности вероятности.

Математические ожидания (номинальные значения) и дисперсии данных параметров считаются известными. В качестве случайного параметра рассматривался только один из вышеперечисленных параметров. На практике это означает выделение некоторого параметра, случайный характер которого в наибольшей степени влияет на точность ЭГСП в конкретном приложении.

Рассмотрим пример, где ЭГСП описывается моделью в виде одного дифференциального уравнения 5-го порядка со случайными коэффициентами [1], построенной на основе упомянутой модели. Начальные условия полагаются нулевыми, то есть компенсация будет выполняться для переходного режима работы ЭГСП. Случайный физический параметр – коэффициент вязкого трения на золотнике электрогидравлического усилителя, обозначаемый как  $h_3$ . Данный параметр является гауссовой случайной величиной с математическим ожиданием  $m_{h_3} = 0,25$  и дисперсией  $D_{h_3} = 0,001$ . При этом в уравнении модели случайными будут коэффициенты  $a_1, a_2, a_3, a_4$ , математические ожидания и дисперсии которых опре-

деляются через заданные  $m_{h_3}$  и  $D_{h_3}$ . В качестве ортогонального базиса используется базис из 128-ми функций Уолша.

На задающий вход электронного усилителя сигнала ошибки поступает сигнал в виде случайного процесса с математическим ожиданием  $m_y(t) = 0,01\sin(15,7t)$  и корреляционной функцией  $R_{yy}(t_1, t_2) = 6 \cdot 10^{-7} e^{-20|t_1 - t_2|}$ . Корреляционная функция выходного сигнала детерминированной системы  $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ , представлена на рис. 1, из которого видно, что дисперсия данного сигнала изменяется по апериодическому закону, достигая некоторого установившегося значения.

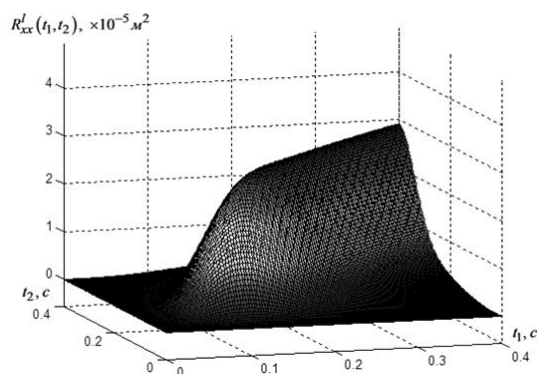


Рис. 1. Корреляционная функция выходного сигнала детерминированной модели ЭГСП

Корреляционная функция выходного сигнала  $R_{xx}^l(t_1, t_2)$  стохастической модели ЭГСП представлена на рис. 2, где хорошо заметны колебания дисперсии  $D_x^l(t) = R_{xx}^l(t_1, t_2)|_{t_1=t_2=t}$  с двойной частотой изменения  $m_y(t)$ . Результат активной компенсации представлен на рис. 3, где показана корреляционная функция выходного сигнала стохастической модели ЭГСП, вычисленная для скорректированного входного сигнала в виде случайного процесса с найденными характеристиками  ${}_{cor}m_y^l(t)$  и  ${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2)$ .

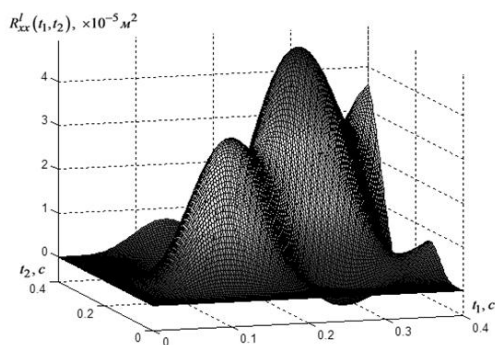


Рис. 3. Корреляционная функция выходного сигнала стохастической модели ЭГСП до компенсации

За исключением небольших колебаний дисперсии  $D_x^l(t)$ , график рис. 3 близок к графику корреляционной функции выходного сигнала детерминированной системы рис. 1 со значением дисперсии в установившемся режиме около  $3 \cdot 10^{-5}$ . Имеющиеся отличия объясняются принципиально приближенным характером используемого метода компенсации [1] и неточностью вычисления  $R_{xx}^l(t_1, t_2)$  из-за удержания ограниченного числа членов матричного ряда, аппроксимирующего стохастический оператор системы.

Результаты компенсации с использованием еще одного подхода, также описанного в [1], представлены на рис. 4 и рис. 5. На вход системы поступает детерминированный сигнал  $\bar{y}(t) = 0.01 \sin(34.89t)$  с наложенной на него центрированной случайной составляющей  $\tilde{y}(t)$  с корреляционной функцией  $R_{\tilde{y}\tilde{y}}(t_1, t_2) = 4 \cdot 10^{-5} e^{-60|t_1 - t_2|}$ .

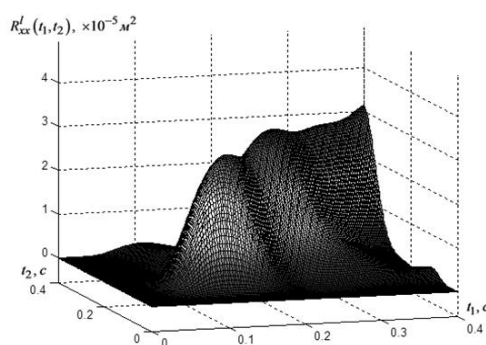


Рис. 3. Корреляционная функция выходного сигнала стохастической модели ЭГСП после компенсации случайности параметра  $h_3$

После компенсации находим такие оптимальные значения параметров компенсатора [1]:  $r = 0,5267$ ,  $\phi = 0,2213$ ,  $k = 0,4664$ .

На рис. 4 представлены графики дисперсии выходного сигнала до и после компенсации влияния случайности параметра  $h_3$  (1 – для детерминированной модели; 2 – для стохастической модели до компенсации; 3 – для стохастической модели после компенсаций). На рис. 5 приводится график корреляционной функции скорректированного входного сигнала.

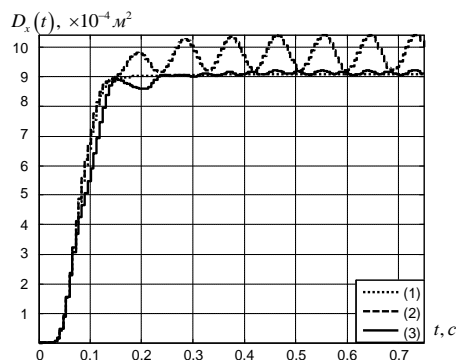


Рис. 4. Дисперсия выходного сигнала ЭГСП

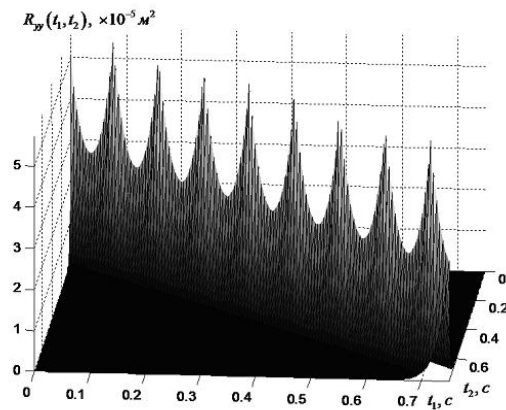


Рис. 5. Корреляционная функция входного сигнала ЭГСП

Таким образом, рассмотрены примеры реализации двух подходов к активной компенсации случайности физических параметров систем управления.

### Список литературы

[1] Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, Мью Паинг Сат, Макаренков А.М. Принцип активной компенсации влияния случайности параметров систем управления // Матер. Всеросс. НТК "Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе", 14-16 ноября 2017 г. Т. 1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – С.221-226.

**Тун Тун Чжо** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com

**Тин Эй Чжо** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com

**Макаренков Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

Нгуен Ти Тхань, Д.С. Афанаскин, А.В. Фиошин

## АЛГОРИТМ ИНТЕГРАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ СЛЕЖЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе рассматривается методика интегрального управления, предлагается подход, позволяющий повысить качество управления путем увеличения астатизма системы.

В работе приводится один из подходов к синтезу на основе интегрального управления. Представлен пример применения методики для синтеза алгоритма стабилизации для линейного объекта и результаты компьютерного моделирования.

### Постановка задачи

Рассматривается линейная модель объекта управления (ОУ) в регулярной форме.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T \in R^n$  – вектор состояния ОУ,  $u \in R^1$  – управление,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}, b_n \neq 0.$$

Целью управления (ЦУ) является ограниченность всех траекторий системы (1) и достижение предельного соотношения:

$$\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0} \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (2)$$

где  $\mathbf{e} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^*$  – ошибка слежения,  $\mathbf{x}_1^* = (x_1^* \ x_2^* \ \dots \ x_n^*)^T \in R^n$ ,  $\mathbf{x}_1^*$  – желаемая траектория – ограниченная и дифференцируемая вектор-функция.

### Методика синтеза

Синтезируем алгоритм управления. Выберем управление в виде суммы двух составляющих

$$u = b_n^{-1}(u_1 + u_2), \quad (3)$$

где  $u_1 = -\sum_{i=1}^n a_{ni}x_i$  – компенсация слагаемых.

С целью увеличения точности повысим астатизм системы и обеспечим гладкость управления за счет добавления интегратора [1] к системе. Тогда расширенная система (1) с учетом (3) примет вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = u_2, \\ \dot{u}_2 = v, \end{cases} \quad (4)$$

где  $v$  – новый вход. Таким образом, составляющее управление  $u_2$  определяется как интеграл от  $v$ . Относительная степень подсистемы (4) от нового входа  $v$  к  $x_1$   $\rho = n + 1$ . Рассмотрим задачу синтеза нового входа  $v$  на основе теории пассивации [2].

Введем новый информационный выход  $y_{\text{inf}}$  в виде комбинации от ошибки слежения выхода выходного каскада и ее производных

$$y_{\text{inf}} = g(p)e_1, \quad (5)$$

где  $e_1 = x_1 - x_1^*$ ,  $g(p) = p^{\rho-1} + g_{\rho-2}p^{\rho-2} + \dots + g_0$ ,  $\deg g(p) = \rho - 1$ ,  $g_i > 0$ ,  $i = \overline{1, \rho-1}$ ,  $g(s)$  – гурвицевый многочлен,  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования.

Задаем желаемую траекторию в виде  $g(p)x_1^* = g_0 r$ ,  $r$  – гладкая, ограниченная функция. Представим (5) во временной области

$$y_{\text{inf}} = x_1^n + g_{(n-1)}x_1^{(n-1)} + \dots + g_0 x_1 - g_0 r = \mu(\cdot) + u_2, \text{ где } \mu(\cdot) = \sum_{j=1}^n g_{j-1}x_j - g_0 r \quad (6)$$

Очевидно, что из  $y_{\text{inf}} \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$  и гурвицевости многочлена  $g(s)$ , следует достижение ЦУ (2). Выберем  $v$  в виде релейной функции от информационного выхода

$$v = -\gamma \text{sign } y_{\text{inf}}, \quad \gamma > 0. \quad (7)$$

Рассмотрим систему (4), (6), (7). Докажем, что  $y_{\text{inf}} \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , методом функций Ляпунова. Выберем кандидатуру на роль функции Ляпунова

$$Q_y(y_{\text{inf}}) = 0.5 y_{\text{inf}}^2. \quad (8)$$

Производная по времени функции (8) в силу системы (4) с учетом (6)

$$\dot{Q}_y(y_{\text{inf}}) = y_{\text{inf}}(\dot{\mu}(\cdot) + \dot{u}_2) = y_{\text{inf}}(\dot{\mu}(\cdot) - \gamma \text{sign } y_{\text{inf}}) = y_{\text{inf}}\dot{\mu}(\cdot) - \gamma |y_{\text{inf}}| a. \quad (9)$$

Выберем коэффициент  $\gamma$ , удовлетворяющий неравенству

$$\gamma \geq \|\dot{\mu}(\cdot)\| + \gamma_0, \text{ где } \gamma_{v0} > 0. \quad (10)$$

Получаем

$$\dot{Q}_y(y_{\text{inf}}) \leq -\gamma_v \sqrt{Q_y(y_{\text{inf}})}. \quad (11)$$

Интегрируя (11), получаем

$$\sqrt{Q_y(y_{\text{inf}}(t))} \leq \sqrt{Q_y(y_{\text{inf}}(0))} - \frac{\gamma_0}{2} t.$$

Так как  $Q_y \geq 0$ , то существует момент времени  $t_*$ , такой, что  $Q_y = 0$  при  $t \geq t_*$ . Следовательно,  $y_{\text{inf}}(t) \equiv 0$  при  $t \geq t_*$ ,  $t_* \leq \frac{2}{\gamma_0} \sqrt{Q_y(0)}$ , и ЦУ (2) достигается.



### Пример

Покажем применение предложенной методики для задачи слежения линейного объекта второго порядка. Система описывается системой линейных уравнений

$$\text{ОУ: } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \end{pmatrix}.$$

Цель управления:  $\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Управление в форме (3)  $u = b_2^{-1}(u_1 + u_2)$ , где  $u_1 = -a_{21}x_1 - a_{22}x_2$  Информационный в форме (6)  $y_{\text{inf}} = g_0x_1 + g_1x_2 + b_2u_2$ , новый вход  $v = -\gamma \text{sign } y_{\text{inf}}$ , составляющее управление  $\dot{u}_2 = v$ .

На рис. 1-3 приведены результаты моделирования при параметрах объекта управления  $a_{21} = 5$ ,  $a_{22} = -2$ ,  $b_2 = 2$ , задающий воздействие  $r = \sin(t)$ , начальных условиях  $x_{11}(0) = 2$ ,  $x_{12}(0) = 2$ , параметрах регулятора  $g_1 = 4$ ,  $g_0 = 6$ ,  $\gamma_v = 60$ .

Результаты моделирования системы представлены на рис. 1-3.

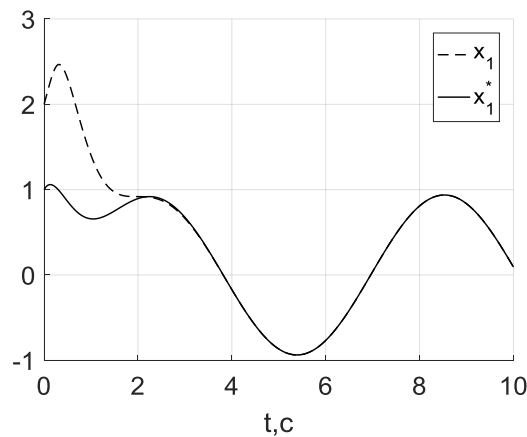


Рис. 1. Выход  $x_1$  и желаемая траектория  $x_1^*$

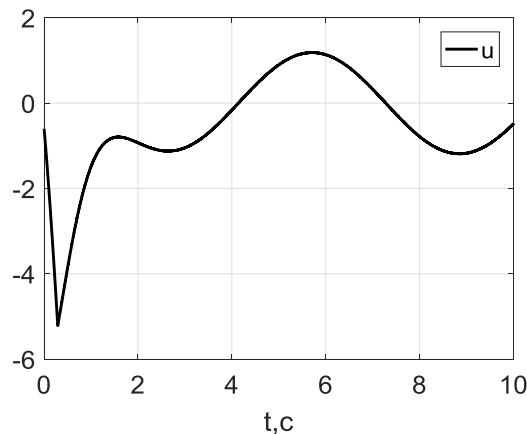


Рис. 2. Управление

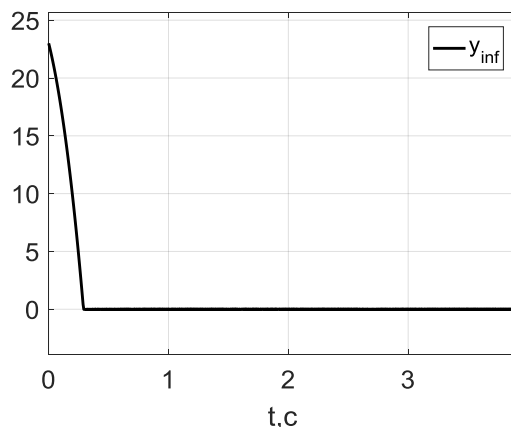


Рис. 3. Информационный выход

Из графиков 1 видно, что ЦУ (2) достигается. Из рис. 2 видно, что управление – ограничено. Из рис. 3 видно, что  $y_{inf}(t) \equiv 0$  за конечное время.

### Заключение

В работе представлена методика управления линейными объектами. Подтверждение достигается цели управления системой. Предложенная методика применена для решения задачи слежения. Представлено компьютерное моделирование системы управления, подтверждающее достижение заданной цели управления.

### Список литературы

- [1] Халил Х.К. Нелинейные системы. – М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2009.
- [2] Б.Р. Андриевский, А. Л. Фрадков, Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации, Автомат. и телемех., 2006, выпуск 11, 3–37.
- [3] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2010.

**Нгуен Ти Тхань** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nct1101@gmail.com

**Афанаскин Денис Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ad94@bk.ru

**Финошин Александр Викторович** – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: earlov@gmail.com

Мин Чжо Ту

## **АЛГОРИТМ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Исследования динамики регулирования турбин при случайных возмущениях ведутся преимущественно методом математического моделирования, т.к. организация натуральных экспериментов в необходимом для подробных исследований объеме представляет на практике значительные трудности. Поэтому, как правило, натурные исследования направляют, прежде всего, на получение необходимой информации о процессе случайных возмущений, приложенных к данной системе в реальных условиях[0].

Большую часть времени эксплуатации турбины ее система регулирования, находится под воздействием малых отклонений, носящих случайный характер. Источники подобных возмущений находятся как в самой системе – это прежде всего пульсации параметров рабочего тела, используемого для привода элементов, так и вне ее – это колебания параметров энергоносителя до и после проточной части турбины и, наконец, колебания нагрузки у потребителей энергии. К внутренним источникам случайных возмущений относятся также изменения в процессе эксплуатации параметров настройки системы: коэффициентов усиления, постоянных времени, уровней срабатывания.

Реагируя на случайные возмущения, система регулирования меняет режим работы турбины. Следовательно, качество поддержания регулируемых параметров в длительной эксплуатации существенно зависит от поведения системы в этих условиях. С другой стороны, реакция системы на поступающие постоянно случайные воздействия снижает качество вырабатываемой энергии, ускоряет износ подвижных деталей системы, а также приводит к образованию усталостных повреждений в турбине. Поэтому динамика регулирования турбины при случайных возмущениях играет важную роль при анализе и синтезе системы регулирования, во многом определяя ее качество функционирования и надежность [1].

При эксплуатации турбины в системе самые чувствительные возмущения – это пульсации давления свежего пара и нагрузка генератора. Исследуем динамику регулирования паровой турбины К-800-130/3000 производства Ленинградского турбинного завода на рис. 1.



Постановка задачи синтеза формулируется следующим образом, при известных вероятностных характеристиках изменения нагрузки генератора и пульсаций давления свежего пара, определить параметры формы кромок отсечного золотника  $\mathbf{K} = \{k_1, k_2, k_3, k_4\}$ :

$$F(z) = \begin{cases} 0, & \text{при } |z| \leq \varepsilon_0, \\ k_2 \tilde{z} + k_3 \frac{\tilde{z}^2}{k_1} \text{sign} \tilde{z}, & \text{при } |z| \leq k_1, \quad \tilde{z} = z - \text{sign}(z) \varepsilon_0 \\ \tilde{z} - k_4 k_1 \text{sign}(\tilde{z}), & \text{при } |z| > k_1 \end{cases} \quad (1)$$

$\varepsilon_0$  - степень нечувствительности;  $z$  - отклонения поршней сервомотора и золотника

Таким образом, чтобы дисперсия (или СКО) частоты вращения ротора была минимальной.

$$J = \left\| \mathbf{C}^{D_{\varphi_3}} - \mathbf{C}^{D_{\varphi}}(\mathbf{K}) \right\| = \left\| \mathbf{E}(\mathbf{K}) \right\| \rightarrow \min_{\mathbf{K}} \quad (2)$$

где  $\mathbf{C}^{D_{\varphi_3}}$  – спектральная характеристика дисперсия эталонного выходного сигнала;  $\mathbf{C}^{D_{\varphi}}$  – спектральная характеристика дисперсия реального выходного сигнала

При решении задачи синтеза для детерминированных воздействиях была получена проекционно-матричная форма описания динамики регулирования турбины [3]. Эту форму описания можно использовать и при решении статистической задачи. Метод детерминированных эквивалентов удачно сочетается с проекционно-матричными методами. Он состоит из следующих основных этапов:

1. Замена случайных функции их детерминированных функций который зависит от случайных величин.

(а) Представление случайных функций в виде неканонического представления.

(б) Расчет выборок случайных величин

(в) Расчет коэффициентов Гаусса.

2. Вычисление спектральных характеристик выходного сигнала при конкретных значениях случайных величин.

(а) Вычисление проекционно-матричным методом спектральных характеристик выходного сигнала для всех вариантов комбинаций значений случайных величин

(б) Вычисление спектральных характеристик математического ожидания и дисперсии выходного процесса

3. Обработка результатов

Рассмотрим подробно алгоритм параметрического синтеза системы регулирования турбины К-800/130-3000 при случайных возмущениях на рис. 2.

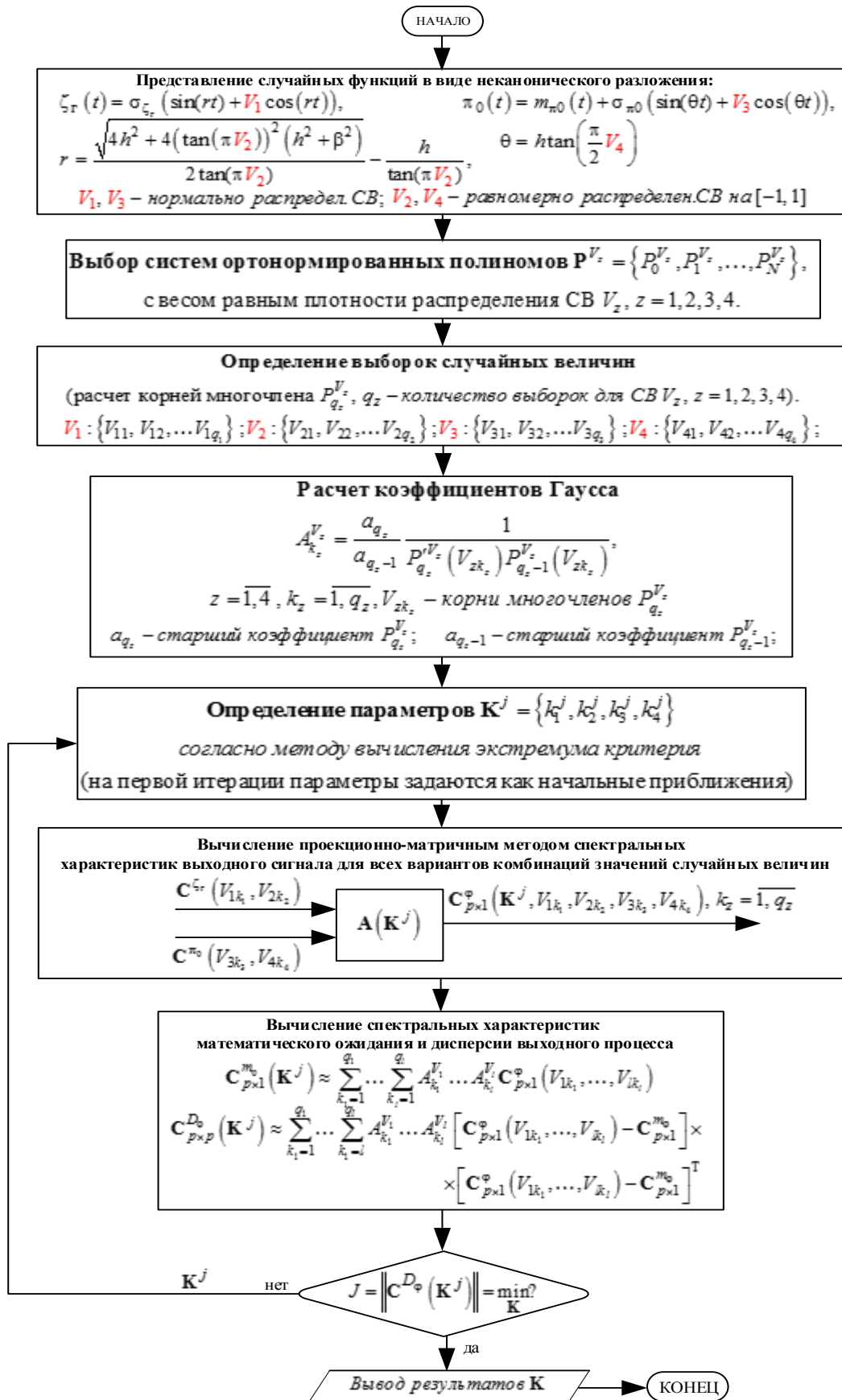


Рис. 2. Алгоритм параметрического синтеза систем регулирования турбины при случайных возмущениях

В результате реализации алгоритма были найдены параметры формы кромок отсечного золотника, которым отвечает качество регулирования частоты вращения турбины.

$$\mathbf{K} = \{0,35; 0,4; 0,2; 0,7\}$$

$$J = \left\| \mathbf{C}^{D_{\varphi_3}} - \mathbf{C}^{D_{\varphi}}(\mathbf{K}) \right\| = \left\| \mathbf{E}(\mathbf{K}) \right\| = 0.0000065$$

Качество регулирования частоты вращения сети регуляторами турбогенераторов при случайных отклонениях нагрузки принято характеризовать отношением среднеквадратических отклонений  $\sigma_{\varphi}$  и  $\sigma_{\zeta_r}$  частоты и нагрузки  $k_k = \sigma_{\varphi} / (\delta \sigma_{\zeta_r}) \leq 4$ . Чем меньше показатель качества  $k_k$ , тем эффективнее регуляторы. С найденными результатами показатель качества показывает на рис. 3.

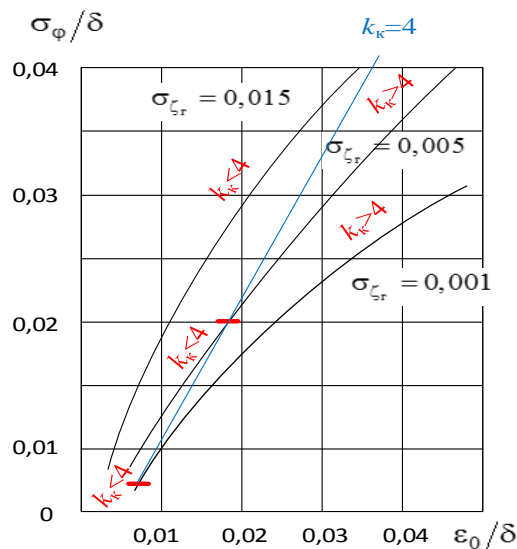


Рис. 3. Качество регулирования частоты вращения ротора турбины при случайных отклонениях нагрузки генератора

### Список литературы

[1] Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000 / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Специальный выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение» 2011. С. 197-215.

[2] Мин Чжо Ту. Особенности динамики регулирования энергетических турбин при случайных возмущениях // Научное обозрение 2014. № 5 – С. 175-180.

[3] Мин Чжо Ту. Алгоритм расчета контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000. Материалы региональной научно-технической конференции 2013, Т.1.-М.:Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. С.15-28.

Мин Чжо Ту – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: minkyawthu07@gmail.com

Пью Чжо Кхаунг, Ю.И. Мышляев

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

**Введение.** В работе рассматривается задача синтеза алгоритма автоматической посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) по заданной глиссаде. Представлена линеаризованная математическая модель БПЛА в вертикальной плоскости с учетом динамики привода. Для двухкаскадной модели ставится задача обеспечения желаемой динамики движения по глиссаде конечного каскада (аэродинамической подсистемы) при ограниченности траекторий системы с учетом входного каскада (привода рулей высоты). В работе предлагается использовать построение модального управления для посадки беспилотного летательного аппарата. В данной работе рассматривается двухэтапная методика синтеза алгоритмов для управления двухкаскадными динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности.

### Постановка задачи

Рассмотрим модель беспилотного летательного аппарата (БЛА) при постоянной скорости движения в горизонтальной плоскости с учетом динамики привода [1] в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \text{ОУ:} \quad S_1: \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{b}_1 u \\ S_2: \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{b} u, \quad y = (1 \quad 0) \mathbf{x}_2 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_1 = (h \quad \theta)^T$ ,  $\mathbf{x}_2 = (\delta \quad \omega)^T$  – векторы фазовых переменных,  $y = \delta(t)$ ,  $\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{b}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ a_{23} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$ ,  $S_1$  – динамика летательного аппарата,  $S_2$  – динамика рулевого привода,  $h$  – высота,  $\theta$  – угол наклона траектории,  $\delta$  – угол отклонения руля высоты,  $\omega$  – скорость отклонения руля высоты,  $a_{ij}, b$  – параметры объекта управления (ОУ),  $u$  – входное воздействие.

Предполагается, что все параметры системы (1) известны и квазистационарные по отношению к собственной динамике ОУ и желаемой динамики системы управления, а глиссада задана уравнением

$$h^*(t) = \begin{cases} l \cdot \operatorname{tg} \beta, & \text{при } t_0 \leq t < T \\ 0, & \text{при } t \geq T \end{cases}, \quad (2)$$



где  $l = l_0 - Vt$  – желаемый закон изменения дальности,  $l_0$  – начальная дальность снижения,  $T = l_0/V$  – расчетное время посадки,  $t_0$  – начальный момент времени захода на посадку,  $\beta$  – угол наклона глиссады.

Структурная схема объекта управления представлена на рис. 1.

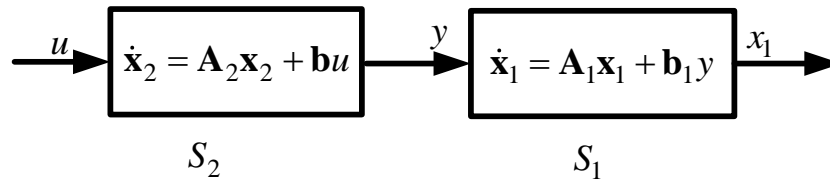


Рис. 1. Структурная схема ОУ

*Целью управления (ЦУ)* является обеспечение движения объекта (1) по глиссаде (заданной динамикой) при параметрической неопределенности, т.к. определяется движение выходной подсистемы  $S_1$ , то на языке теории управлений, сформулировать задачу как обеспечения ограниченности движения замкнутой системы для объекта (1) и обеспечения желаемой динамики по переменной состояния, а именно по переменной состояния выходного каскада.

#### **Методика синтеза алгоритмов управления**

Проведем синтез алгоритма управления в два этапа.

На первом этапе введем дополнительный информационный выход входного каскада  $y_u$ , обеспечивая возможность пассивации входной подсистемы  $S_1$  системы (3) по каналу вход  $u$  – информационный выход  $y_u$ . Проведем преобразование модели (3) относительно информационного выхода  $y_u$ , который формально будем рассматривать в качестве нового входа выходной подсистемы  $S_2$ . При этом будет иметь место расширение подсистемы  $S_1$  по вектору состояния. На втором этапе синтезируем виртуальное управление  $y_u^{virt}$  расширенной подсистемы  $\hat{S}_1$ , обеспечивающее желаемую динамику расширенной выходной подсистемы с виртуальным управлением. Сформируем отклонение информационного выхода от виртуального управления и синтезируем класс алгоритмов управления системой, обеспечивающие парирование указанного отклонения с заданной точностью.

**Этап 1.** Производная по времени от выхода  $x_1$ , подсистемы  $S_1$  не зависит от входа  $y$ , вторая производная имеет вид  $\ddot{x}_1 = a_{22}\dot{x}_1 + \bar{b}y$  и явно зависит от входа. Следовательно, выходной каскад имеет относительную степень  $\rho = 2$ . Для обеспечения относительной степени равной 1 введем информационный выход входного каскада в виде

$$y_u(s) = (\tau s + 1)y(s), \quad (3)$$

где  $\tau > 0$ .

Относительно информационного выхода исходная структурная схема (рис. 1) преобразуется к виду, представленному на рис. 2.

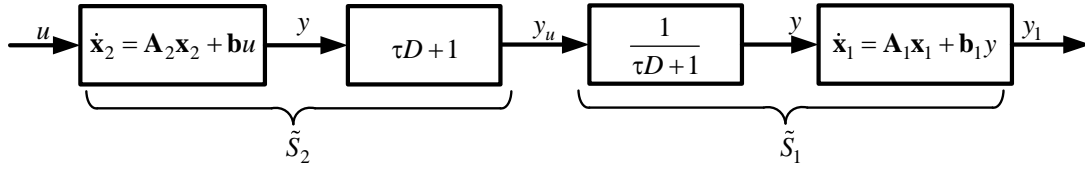


Рис. 2. Расширенная структурная схема объекта управления

На рис. 2 введены обозначения  $\tilde{S}_1, \tilde{S}_2$  – соответственно расширенные подсистемы. Модель в форме пространства состояний имеет вид

$$\tilde{S}_1: \begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{A}_z \mathbf{z}_1 + \mathbf{b}_z y_u, \\ y_1 = (1 \ 0) \mathbf{z}_1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{S}_2: \begin{cases} y_u = \tau \dot{y} + y, \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{b} u, \quad y = \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{x}_2, \end{cases}$$

$$\text{где } \mathbf{z}_1^T = (\mathbf{x}_1^T \quad y) \in R^3, \mathbf{A}_z = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & -\tau^{-1} \end{pmatrix}, \mathbf{b}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau^{-1} \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{C}} = (1 \ 0).$$

Заметим, что желаемая глиссада описывается линейно-убывающей по времени функций (2). С целью повышения качества синтезируемой системы управления добавим астатизм в подсистему  $\tilde{S}_1$ . При этом модель подсистемы будет иметь вид

$$\bar{S}_1: \dot{\bar{\mathbf{z}}}_1 = \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{z}}_1 + \bar{\mathbf{b}} y_u \quad (5)$$

$$\text{где } \bar{\mathbf{z}}_1^T = (z \quad \mathbf{z}_1^T), z = \int_0^t h(\tau) d\tau, \bar{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 & -\tau^{-1} \end{pmatrix}, \bar{\mathbf{b}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau^{-1} \end{pmatrix}.$$

В соответствие с ЦУ для подсистемы  $\bar{S}_1$  введем целевое неравенство вида

$$Q(\bar{\mathbf{e}}) \leq \Delta_{\bar{\mathbf{e}}}, \text{ при } t \geq t_* \quad (6)$$

где  $\Delta_{\bar{\mathbf{e}}} \geq 0, t_* \geq 0, Q(\bar{\mathbf{e}}) = 0,5 \bar{\mathbf{e}}^T \bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{e}}$  – целевой функционал,  $\bar{\mathbf{e}} = \bar{\mathbf{z}}_1 - \bar{\mathbf{z}}_1^*$  – ошибка слежения расширенной модели,  $\Delta_{\bar{\mathbf{e}}} > 0$  – точность слежения  $t_* > t, \bar{\mathbf{z}}_1^* \in R^4$  – вектор состояния желаемой динамики,  $\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{H}}^T > 0$ .

**Этап 2.** Синтезируем виртуальное управление  $y_u^{virt}$  расширенным конечным каскадом  $\bar{S}_1$  методом модального управления.

Приведем  $\bar{S}_1(5)$  к управляемой форме Фробениуса

$$\hat{S}_1: \quad \dot{\tilde{\mathbf{z}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{b}}y_u^{virt} \quad (7)$$

где  $\tilde{\mathbf{z}} = \left( \int_0^t h(\tau)d\tau \quad h(t) \quad \dot{h}(t) \quad \ddot{h}(t) \right)^T$ ,  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ -\alpha_0 & \dots & -\alpha_3 \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{b}} = \begin{pmatrix} 0 \\ a_{23}\mathbf{b}_z \end{pmatrix}$ , и удовлетворяется условию  $\alpha_i: s^4 + \alpha_3s^3 + \alpha_2s^2 + \alpha_1s + \alpha_0 = \det(sI - \bar{\mathbf{A}})$ ,  $i = \overline{0,3}$ . Используем не особое преобразование координат  $\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{z}}$ ,  $\det \mathbf{T} \neq 0$ ,  $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{A}}\mathbf{T}^{-1}$ ,  $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{b}}$ ,  $\mathbf{T} = \tilde{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{G}}^{-1}$ ,  $\tilde{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^2\tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^3\tilde{\mathbf{b}} \end{pmatrix}$ ,  $\bar{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{b}} & \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{b}} & \bar{\mathbf{A}}^2\bar{\mathbf{b}} & \bar{\mathbf{A}}^3\bar{\mathbf{b}} \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{G}}, \bar{\mathbf{G}}$  – матрицы управляемости системы (7) и системы в форме Фробениуса.

Зададим эталонную модель вида

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}_*} = \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{z}}_* + \tilde{\mathbf{b}}_*r, \quad (8)$$

где  $\tilde{\mathbf{z}}_* \in R^4$ ,  $r \in R^1$  – задающее воздействие, выбираемое из условия

$$\tilde{\mathbf{z}}_{*\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{z}}_*(t) \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \int_0^t h^*(\tau)d\tau \quad h^*(t) \quad \dot{h}^*(t) \quad \ddot{h}^*(t) \right)^T. \text{ Заметим, что в силу ра-}$$

венства (1)  $\int_0^\infty h^*(\tau)d\tau < \infty$ ,  $h^*(t)$  – линейная функция, переходящая в по-

стоянную так, что  $\ddot{h}^*(t) \equiv 0$ , а  $\dot{h}^*(t)$  – константа, переходящая в нуль. По-

этому выберем задающее воздействие в виде  $r = \beta_0 \cdot \int_0^t h^*(\tau)d\tau + \beta_1 \cdot h^*(t)$ ,

$$\tilde{\mathbf{A}}_* = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \\ -\alpha_0^* & \dots & -\alpha_3^* \end{pmatrix} \quad \text{– гурвицевая матрица} \quad \alpha_i^* > 0, i = \overline{0,3},$$

$\tilde{\mathbf{b}}_* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \tilde{b}_* \end{pmatrix}^T$ ,  $\tilde{b}_* = \alpha_0^*$ ,  $\alpha_i^*, \beta_j, \tilde{b}_*$  – параметры эталонной модели и матричной задающей желаемой динамики

$$\alpha_i^*: s^4 + \alpha_3^*s^3 + \alpha_2^*s^2 + \alpha_1^*s + \alpha_0^* = \prod_{i=1}^4 (s - \lambda_i^*), \quad (9)$$

где  $\lambda_i^* < 0$  – вещественные числа и выбраны исходя из требования по быстродействию.

Приведем функционал (6) к виду

$$Q(\tilde{\mathbf{e}}) = 0,5\tilde{\mathbf{e}}^T \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{e}}, \quad (10)$$

где  $\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}^T = \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{H}} \mathbf{T} > 0$ .

Определим линейную обратную связь (ОС) по координатам  $\tilde{\mathbf{z}}$ : пусть  $y_u = y_u^{virt}$ ,  $\tilde{\mathbf{e}} = \tilde{\mathbf{z}} - \tilde{\mathbf{z}}_*$ . Модель ошибки в соответствии с (7), (8) имеет вид

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{b}}y_u^{virt} - \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{z}}_* - \tilde{\mathbf{b}}_*r \pm \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{z}} = \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{e}} + (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{A}}_*)\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{b}}y_u^{virt} - \tilde{\mathbf{b}}_*r. \quad (12)$$

Выберем управление из условия

$$\tilde{\mathbf{b}}y_u^{virt} = (\tilde{\mathbf{A}}_* - \tilde{\mathbf{A}})\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{b}}_*r.$$

Виртуальное управление имеет вид

$$y_u^{virt} = \tilde{\mathbf{k}}_z\tilde{\mathbf{z}} + \mathbf{k}_hr,$$

где матрицы и коэффициент алгоритма управления выбираются из условий  $\tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}_z = \tilde{\mathbf{A}}_* - \tilde{\mathbf{A}}$ ,  $\tilde{\mathbf{b}}\mathbf{k}_h = \tilde{\mathbf{b}}_*$ , где  $\tilde{\mathbf{k}}_z = (\tilde{k}_z^0 \quad \tilde{k}_z^1 \quad \tilde{k}_z^2 \quad \tilde{k}_z^3)$ ,  $\mathbf{k}_h = (\tilde{k}_h^0 \quad \tilde{k}_h^1)$ .

Реализуемое виртуальное управление в исходном базисе имеет вид

$$y_u^{virt} = \mathbf{k}_z\bar{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{k}_hr, \quad \tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{z}}_1, \quad (12)$$

где  $\mathbf{k}_z = \tilde{\mathbf{k}}_z\mathbf{T} = (k_z^0 \quad k_z^1 \quad k_z^2 \quad k_z^3)$ .

Вычислим производную по времени от целевой функции (10) в силу уравнений системы (6) с учетом (12) при  $y_u = y_u^{virt}$

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\tilde{\mathbf{e}}) &= \tilde{\mathbf{e}}^T \tilde{\mathbf{H}} (\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{b}}y_u^{virt} - \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{z}}_* - \tilde{\mathbf{b}}_*r \pm \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{z}}) = \\ &= \tilde{\mathbf{e}}^T \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{A}}_*\tilde{\mathbf{e}} + \tilde{\mathbf{e}}^T \tilde{\mathbf{H}} ((\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{A}}_*)\tilde{\mathbf{z}} + (\tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}_z)\mathbf{T}\bar{\mathbf{z}}_1 + (\tilde{\mathbf{b}}\mathbf{k}_h)r - \tilde{\mathbf{b}}_*r) \\ &= \tilde{\mathbf{e}}^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{H}} \mathbf{T} \tilde{\mathbf{A}}_* \tilde{\mathbf{e}} + \tilde{\mathbf{e}}^T \mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{H}} (\mathbf{T}(\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{A}}_*)\mathbf{T}^{-1}\mathbf{T}\bar{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{T}(\tilde{\mathbf{A}}_* - \tilde{\mathbf{A}})\mathbf{T}^{-1}\mathbf{T}\bar{\mathbf{z}}_1) = \\ &= \tilde{\mathbf{e}}^T \bar{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{A}}_* \tilde{\mathbf{e}} = \tilde{\mathbf{e}}^T \bar{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{A}}_* \tilde{\mathbf{e}}. \end{aligned}$$

**Теорема 1.** С учетом существования матрицы  $\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}^T > 0$ , удовлетворяющей уравнению Ляпунова  $\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{A}}_* + \tilde{\mathbf{A}}_*^T\tilde{\mathbf{H}} = -\tilde{\mathbf{G}}$ ,  $\tilde{\mathbf{G}} = \tilde{\mathbf{G}}^T > 0$ , получаем

$$\dot{Q}(\tilde{\mathbf{e}}) \leq -\frac{1}{2}\rho\tilde{\mathbf{e}}^T\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{e}}, \quad \text{где } \rho = \frac{\lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{G}})}{\lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{H}})} > 0, \quad \lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{G}}), \lambda_{\min}(\tilde{\mathbf{H}}) - \text{соответственно}$$

минимальное и максимальное собственные числа матриц  $\tilde{\mathbf{G}}$  и  $\tilde{\mathbf{H}}$ .

Следовательно, система (11) устойчива и в силу (13) ЦУ  $\tilde{\mathbf{e}}(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$  достигается. С учетом гурвицевости матрицы  $\tilde{\mathbf{A}}_*$  при ограниченности задающего воздействия  $r(t)$  вектор  $\tilde{\mathbf{z}}_*$  ограничен и, следовательно, ограничен вектор фазовых координат  $\tilde{\mathbf{z}}$  замкнутой системы.

### Заключение

В работе представлена методика синтеза алгоритмов модального управления беспилотным летательным аппаратом. Результаты исследования представлены для достаточно общей формы двухкаскадных линейных моделей в пространстве состояний. Поэтому приведены методика синтеза и структура алгоритма управления, которую можно эффективно распространить и объекты иной физической природы.

### Список литературы

[1] *Мышляев Ю.И.* Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе настраиваемого скользящего режима. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №2. – С. 111-116.

[2] *Пупков Л.А., Егунов Н.Д., Мышляев Ю.И.* и др. Методы современной теории автоматического управления. Т.5 – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С.379 –464.

**Пью Чжо Кхаунг** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: blueheavenn1985@gmail.com

**Мышляев Юрий Игоревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru

М.О. Корлякова, Н.В. Лохмачев, Д.С. Трушков, Е.Ю. Корлякова

## **ВИРТУАЛЬНАЯ СРЕДА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАНОВКИ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Задачи обнаружения неисправностей систем автомобиля важны, прежде всего, для безопасности на дороге. Определение положения колес относительно осей – одна из таких задач. Современная схема определения положения колес автомобиля подразумевает использование методов бесконтактного определения их ориентации с использованием комплексов на основе технического зрения. Такие системы работают с парой (или большим количеством) закрепленных камер, каждая из которых видит часть сцены, а вся система вместе связана на этапе калибровки. Для определенности будем рассматривать двухкамерные модели, где стенд видит по два колеса (переднее и заднее) с размещенными на них шаблонами. Смещение шаблонов при известных параметрах автомобиля позволяет определить положение колес относительно оси [1]. При этом перед алгоритмом стоит задача верного определения шаблонов и расположения их в пространстве. Системы такого типа позволяют сделать процесс определения параметров схода-развала колес максимально удобным, быстрым и наименее сложным для пользователя. Однако их стоимость очень высока в первую очередь за счет дорогого программного обеспечения. При этом следует понимать, что процесс разработки такого ПО ограничен с точки зрения возможности использования современных интеллектуальных методов обработки информации в силу дефицита примеров с точными характеристиками целевых параметров схода-развала. Таким образом, необходимо обеспечить большие выборки примеров за наиболее короткое время с наименьшими затратами. Предлагается провести формирование виртуальной модели стенда [2,3,4] схода-развала, где можно гораздо практичнее и выгоднее для обучения проводить моделирование ситуаций с однозначно известными положениями и траекториями движения шаблонов.

Для этого в среде программирования MatLab была создана виртуальная сцена – модель движения шаблона, позволяющая с помощью виртуальной камеры воспроизводить по заданным сценариям сцены, содержащие движущийся шаблон заданного вида. Он представляет собой прямоугольник с нанесенной шахматной разметкой «клетки» [4] заданного размера и количества (для переднего и заднего колеса шаблоны отличны по их размеру и количеству), расположенный в мировой системе координат на условной оси движения колеса. Такие шаблоны распознаются большинством программных пакетов, ориентированных на задачу технического зрения. Например, OpenCV [5]. Данный шаблон представлен на рисунке 1.

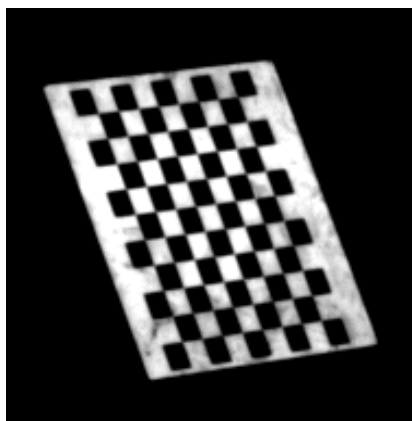


Рис. 1. Реальный шаблон

Колесо движется по заданному закону, т.е. смещается центр колеса и происходит поворот шаблона. При этом углы схода и развала постоянны и такие, что колесо вращается вокруг оси, наклоненной к плоскости горизонта, и не направлено вдоль вектора движения центра колеса, рисунок 2.



Рис. 2. Расположение реального колеса

В системе координат, связанной с камерой, получается плоское изображение шаблона с определенными характеристиками камеры, такими как размер матрицы и качество изображения.

Траекторию колеса задает движение вектора его оси, а положение шаблона – углы схода и развала (в упрощенной модели их считаем постоянными) [6], положение и характеристики камеры заданы в соответствие с реальным опытным образцом. Несколько последовательных кадров дают представление о движении шаблона и однозначно определяют траекторию оси и характеристики колеса, рисунок 3.

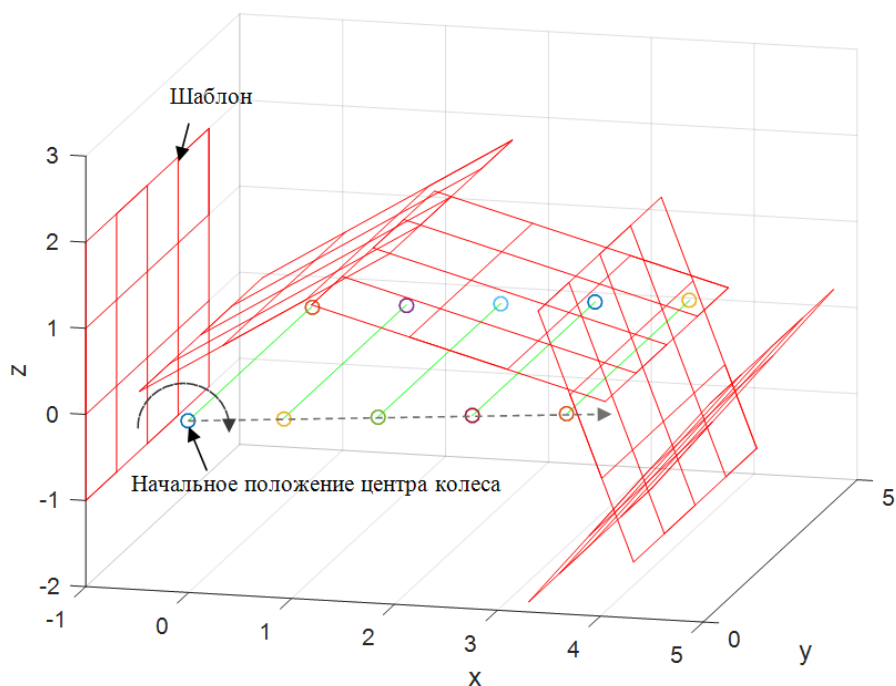


Рис. 3. Модель шаблона в нескольких положениях при движении относительно движущегося центра

Результаты работы каждой серии отображений шаблона формируются в виде растровых файлов, где пиксельному изображению шаблона сопоставляются характеристики движения в виртуальной сцене. Можем формировать изображение всех четырех колес через дублирование данной процедуры необходимое число раз.

Таким образом, была сформирована виртуальная сцена, параметры которой позволяют изменять характеристики виртуальной модели подвески и колеса в широком диапазоне. Работа виртуальной модели позволяет построить выборки любого заданного объема для обучения интеллектуальных моделей.

### Список литературы

[1] Двухкамерный 3D стенд TRIMAX для регулировки углов установки колес легковых автомобилей [электронный ресурс]: URL <http://www.amd-company.ru/products/TRIMAX/> (дата обращения: 10.03.18)

[2] Астапкович А.М. Эффект асимметрии обучения для нейронных систем управления [электронный ресурс]: URL <http://moglobi.ru/stati/effekt-asimmetrii-obucheniya-dlya-nejronnih-sistem-upravleniya/main.html> (дата обращения: 10.03.18)

[3] Стариков А. Применение нейронных сетей для задач классификации [электронный ресурс]: URL <https://basegroup.ru/community/articles/classification> (дата обращения: 12.03.18)



[4] *Babiy M. S.* The Algorithm for Determining the TOE and Camber Parameters in the 3D Vision System [электронный ресурс]: URL <http://aist.sumdu.edu.ua/main/images/stories/zbirnuk/AIST-2016.pdf> (дата обращения: 12.03.18)

[5] OpenCV Reference Manual [электронный ресурс]: URL <http://www.comp.nus.edu.sg/~CS4243/doc/opencv.pdf> (дата обращения: 12.03.18)

[6] *Балабина Т.А., Мамаев А.Н., Чепурной С.И.* Определение соотношения углов развала и схождения эластичных колес, обеспечивающего наименьшее сопротивление качению [электронный ресурс]: URL <https://cyberleninka.ru/article/v/opredelenie-sootnosheniya-uglov-razvala-i-shozhdeniya-elastichnyh-koles-obespechivayuschego-naimenshee-soprotivlenie-kacheniyu> (дата обращения: 11.03.18)

**Корлякова Мария Олеговна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

**Лохмачев Никита Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lokhmachevnikita@gmail.com

**Трушков Дмитрий Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dim.alex@mail.ru

**Корлякова Екатерина Юльевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: korliakova.ekaterina@yandex.ru

Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков

## КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СЛУЧАЙНОГО ПАРАМЕТРА НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) широко применяется в современных системах управления, включая системы управления в авиации, робототехнике и других областях. Для данного типа привода характерна заметная чувствительность к различным внешним и внутренним факторам, носящим, в основном, случайный характер и приводящим к соответствующим изменениям параметров привода в процессе эксплуатации. Рост требований к современным системам автоматического управления делает актуальной задачу повышения точности ЭГСП как их важного элемента. В данной работе предлагается методика компенсации влияния случайности физического параметра коэффициента передачи цепи обратной связи ЭГСП. Компенсация достигается путем дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства (КУ), найденных без учета влияния фактора случайности параметра  $k_{oc}(t)$ . При этом используется усредненная проекционная модель стохастической системы.

Использование проекционных моделей и методов теории матричных операторов при решении задач теории управления наиболее эффективно для линейных систем, поэтому в настоящей работе в качестве исходной модели рассматривается линеаризованная математическая модель ЭГСП с ПИД-регулятором и КУ, которая после приведения к стандартной форме вход-выход имеет вид:

$$\sum_{i=0}^n a_i(t) \frac{d^i}{dt^i} x_{uu}(t) = \sum_{j=0}^m b_j(t) \frac{d^j}{dt^j} y(t) \quad (1)$$

где некоторые переменные коэффициенты  $a_i(t)$ ,  $b_j(t)$  являются случайными процессами, определяемыми как

$$a_i(t) = m_{a_i}(t) + \tilde{a}_i(t), \quad i = \overline{0, n-1}, \quad b_j(t) = m_{b_j}(t) + \tilde{b}_j(t), \quad j = \overline{0, m} \quad (2)$$

где  $m_{a_i}$ ,  $m_{b_j}$  – математические ожидания,  $\tilde{a}_i, \tilde{b}_j$  – центрированные случайные составляющие.

В модели (1) приняты следующие обозначения:  $y(t)$  – напряжение на суммирующем входе электронного усилителя сигнала ошибки (входной сигнал ЭГСП);  $x_{uu}(t)$  – перемещение штока поршня гидроцилиндра (выходной сигнал ЭГСП). Условие физической реализуемости системы (1)

формулируется как  $n \geq m$ . При принятых упрощающих допущениях порядок левой и правой части  $n = 7$  и  $m = 3$  соответственно.

Требуемые динамические характеристики ЭГСП задаются функцией эталонного (желаемого) переходного процесса  $x_3(t) = 1 \cdot 10^{-1} (1 - e^{-20t})$ . Входной сигнал  $y(t)$  в общем случае будем полагать гауссовым случайным процессом, для которого задано математическое ожидание  $m_y(t)$  и корреляционная функция  $R_{yy}(t_1, t_2)$ , поэтому, фактически,  $x_3(t) = m_{x_3}(t)$ .

Задача оптимизации параметров регуляторов формулируется следующим образом. Требуется определить оптимальные параметры ПИД-регулятора и КУ, обеспечивающие заданные динамические характеристики системы управления с учетом случайности параметра  $k_{oc}(t)$  модели ЭГСП. Коэффициенты  $a_0(t)$  и  $a_1(t)$  зависят от указанного случайного параметра  $k_{oc}(t)$ .

Случайный параметр  $k_{oc}(t)$  является гауссовым случайным процессом, для которого заданы математическое ожидание  $m_{k_{oc}}(t) = 0.1(t)$  и автокорреляционная функция  $R_{k_{oc}k_{oc}}(t_1, t_2) = 0.0003e^{-|t_1 - t_2|}$ , имеющие размерности  $\left[ \frac{B}{M} \right]$  и  $\left[ \frac{B^2}{M^2} \right]$  соответственно. Характеристики входного сигнала:  $m_y(t) = 0,01 \cdot 1(t)$ ,  $[B], R_{yy}(t_1, t_2) = 4,5 \cdot 10^{-5} e^{-10|t_1 - t_2|}$ ,  $[B^2]$ . Интервал исследования  $t = 0..0,5$ с.

Алгоритм оптимизации включает два этапа. На первом этапе ищутся значения параметров ПИД-регулятора:  $K_P, K_I, K_D$  и КУ:  $K_F, T_F$ , обеспечивающие наилучшее приближение выходного сигнала системы к эталонному переходному процессу  $x_3(t)$  при условии, что параметры ЭГСП являются детерминированными. Минимизируется следующий функционал:

$$J_1(\mathbf{p}) = \left[ \mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right]^T \left[ \mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right] \quad (3)$$

где  $\mathbf{C}^{x_3}$  – проекционная характеристика эталонного переходного процесса  $x_3(t)$ ;  $\mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p})$  – расчетная проекционная характеристика переходного процесса  $x_p(t, \mathbf{p}) = \bar{x}(t)$ , вычисленная по проекционной модели [1] эквивалентной детерминированной системы для некоторых значений параметров регулятора (элементов вектора  $\mathbf{p}$ );  $\tau$  – знак транспонирования.

В рассматриваемом примере вектор  $\mathbf{p}$  состоит из пяти элементов:  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ , где  $p_1 = K_P, p_2 = K_I, p_3 = K_D, p_4 = K_F, p_5 = T_F$ .

Минимизация функционала (3) выполнялась методом Нелдера-Мида при начальных значениях  $K_P = 1, K_I = 0, K_D = 0, K_F = 0, T_F = 0$ . Переходный процесс до выполнения первого этапа оптимизации представлен на

рис. 1(а), где кривая 1 – желаемый сигнал  $x_3(t)$ , кривая 2 – расчетный сигнал  $x_p(t)$  до минимизации функционала (3). Были найдены следующие значения параметров регулятора и корректирующего устройства:  $K_{II} = 2,7$ ,  $K_{II} = 0,0031$ ,  $K_D = 0,0107$ ,  $K_F = 9 \cdot 10^{-11}$ ,  $T_F = 0,04$ . Переходный процесс после выполнения первого этапа оптимизации представлен на рис. 1(б), где кривая 1 – желаемый сигнал  $x_3(t)$ , кривая 2 – расчетный сигнал  $x_p(t)$  после минимизации функционала (3).

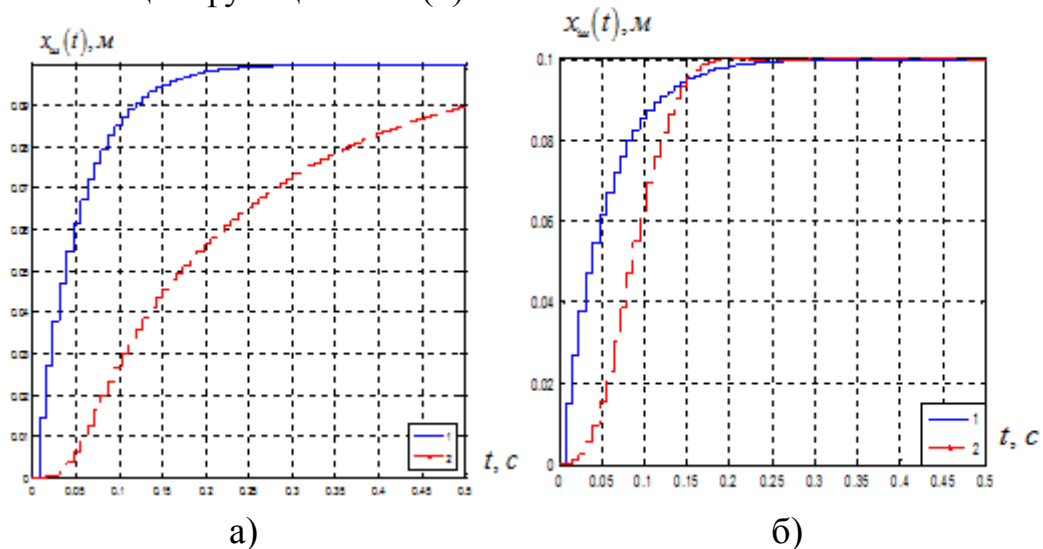


Рис. 1. а) Выходной сигнал ЭГСП до первого этапа  
б) Выходной сигнал ЭГСП после первого этапа

Для проверки устойчивости ЭГСП при выполнении первого этапа оптимизации использовался корневой критерий. На рис. 2 приведена оценка достигнутого качества переходного процесса: перерегулирование – 0, число полных колебаний – 0, время задержки –  $T_3 = 0,12$  сек, время регулирования –  $T_p = 0,157$  сек, время нарастания –  $T_H = 0,036$  сек и статическая ошибка –  $\Delta = |m_X(t) - y_{cm}(t)| = 0$ .

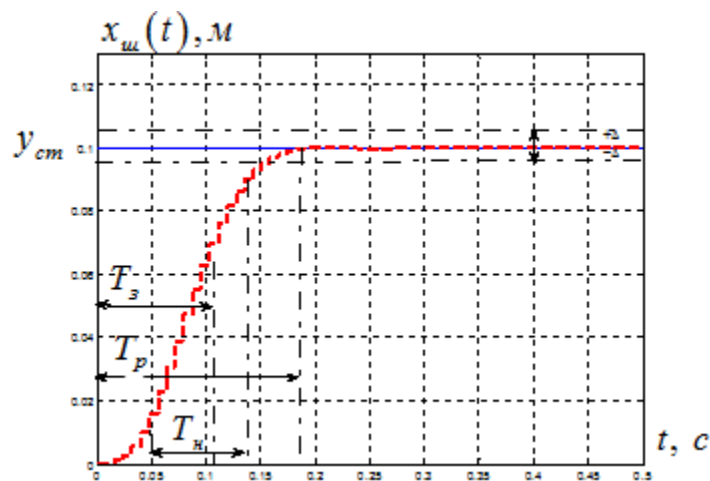


Рис. 2. Оценка качества переходного процесса ЭГСП

На втором этапе выполнялась повторная оптимизация параметров ПИД-регулятора и КУ с учетом влияния случайности параметра  $k_{oc}(t)$  путем минимизации функционала:

$$J_2(\mathbf{p}) = \left[ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l [c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})]^2 \right]^{1/2} + \left[ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l [c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где  $c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$  и  $c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$  – элементы квадратных матриц  $\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$  и  $\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ , определяемых, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) [\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})]^T - \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{C}^{m_x})^T, \quad \mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где  $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$  – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической системы;  $\mathbf{C}^{m_x}$  – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора  $\bar{\mathbf{p}}$ ;  $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$  – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы;  $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$  – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора  $\bar{\mathbf{p}}$ . Путем минимизации функционала (4) тем же методом при начальных значениях  $K_{II} = 2,7$ ,  $K_{II} = 0,0031$ ,  $K_D = 0,0107$ ,  $K_F = 9 \cdot 10^{-11}$ ,  $T_F = 0,04$ , найденных на первом этапе, были найдены следующие значения оптимальных параметров ПИД-регулятора и КУ:  $K_{II} = 2,58$ ,  $K_{II} = 1,3 \cdot 10^{-08}$ ,  $K_D = 0,0122$ ,  $K_F = 7,8 \cdot 10^{-11}$ ,  $T_F = 0,025$ .

Результаты второго этапа оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства представлены на рис. 3(а) и рис. 4(а) (1 – детерминированная модель ЭГСП после первого этапа оптимизации; 2 – стохастическая модель ЭГСП с параметрами, найденными на первом этапе оптимизации; 3 – стохастическая модель ЭГСП после второго этапа оптимизации).

Из графиков рис. 3(а) видно, что на втором этапе оптимизации удалось улучшить качество переходного процесса по математическому ожиданию (кривая 3 по сравнению с кривой 2), приблизив его к переходному процессу эквивалентной детерминированной системы (кривая 1). График рис. 4(а) демонстрирует эффект уменьшения максимума дисперсии выходного сигнала (кривая 3 по сравнению с кривой 2). Видно, что дисперсия выходного сигнала приближаются к дисперсии выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы (кривая 1).

Для большей наглядности на рис. 3(б) показаны разности математического ожидания выходного сигнала стохастической системы  $m_{x_{uu}}^s(t)$  и математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы  $m_{x_{uu}}^d(t)$  до (кривая 1) и после (кривая 2) второго этапа оптимизации. Аналогичные разности для дисперсии выходного сигнала стохастической и детерминированной системы ( $D_{x_{uu}}^s(t)$  и  $D_{x_{uu}}^d(t)$ ) показаны на графиках рис. 4(б).

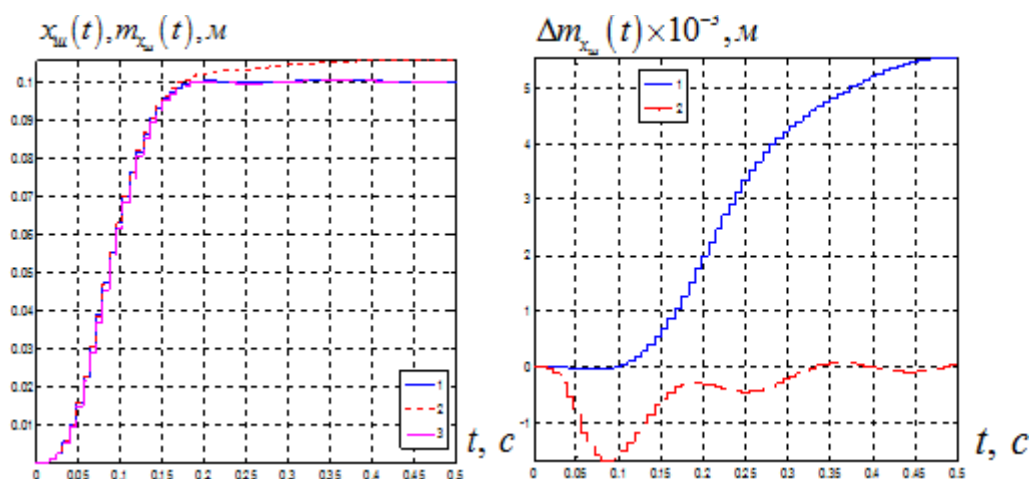


Рис. 3. а) Математическое ожидание выходного сигнала  
 б) Разность  $\Delta m_{x_u}(t) = m_{x_u}^s(t) - m_{x_u}^d(t)$

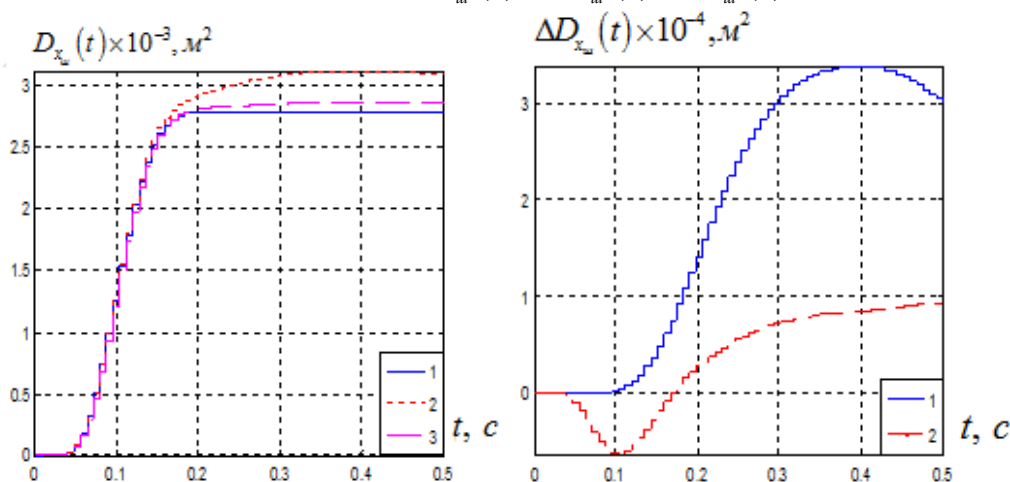


Рис. 4. а) Дисперсия выходного сигнала  
 б) Разность  $\Delta D_{x_u}(t) = D_{x_u}^s(t) - D_{x_u}^d(t)$

Таким образом, рассмотрен пример совместной оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства ЭГСП с учетом случайности коэффициента цепи электрической обратной связи. По сравнению с традиционным подходом, предлагаемый метод обеспечивает лучшее качество регулирования и, как следствие, более высокую точность работы системы управления в целом.

### Список литературы

[1] Тин Эй Чжо, Макаренко А.М., Тун Тун Чжо, Широкова З.Г. Оптимизация параметров регуляторов стохастических систем // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 4-1. – С. 70-76.

**Тин Эй Чжо** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekuaw87@gmail.com

**Тун Тун Чжо** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminnyaw@gmail.com

**Макаренко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

А.М. Ливашов, В.И. Краснощеченко

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТА «ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЬ»

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для стабилизации выходного напряжения генератора постоянного тока может использоваться система «генератор-двигатель». Вид системы и ее основные элементы представлены на рисунке 1.

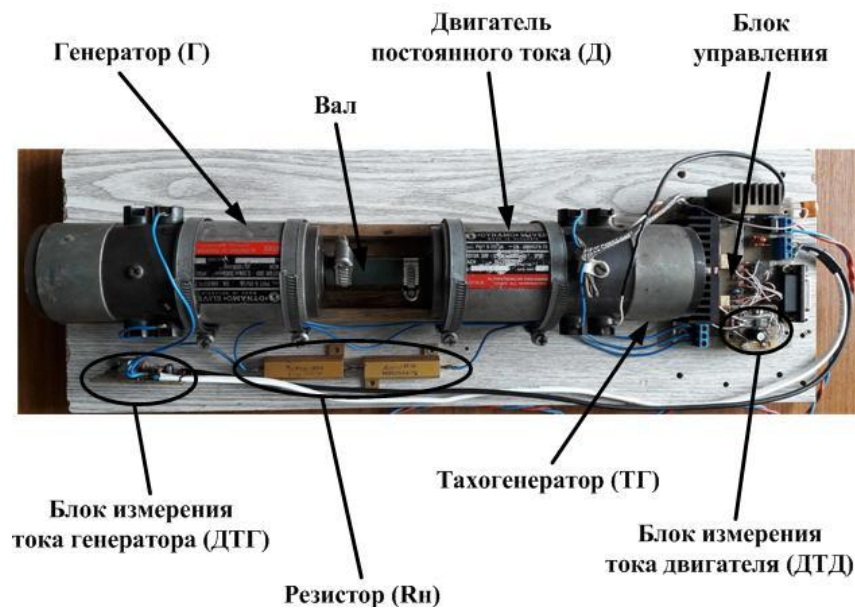


Рис. 1. Система «генератор-двигателя»

Система представляет собой два двигателя постоянного тока, соединенных общим валом. Поскольку двигатель постоянного тока является обратимой машиной, один из двигателей используется в качестве генератора. Второй двигатель является приводом, вращающим якорь. Вращающийся якорь создает вращающееся магнитное поле в генераторе. В результате генератор вырабатывает напряжение. Чем быстрее вращается якорь, тем большее напряжение вырабатывает генератор.

Стабилизация напряжения генератора осуществляется на основе поддержания скорости вращения якоря. При включении нагрузки генератора скорость вращения якоря падает, следовательно, напряжение генератора падает.

Алгоритм поддержания скорости вращения генератора реализуется микроконтроллером ATmega128, который подключается к блоку управления системы «генератор-двигатель». Поддержание скорости осуществляется по ошибке между скоростью вращения якоря и требуемой скоростью вращения.

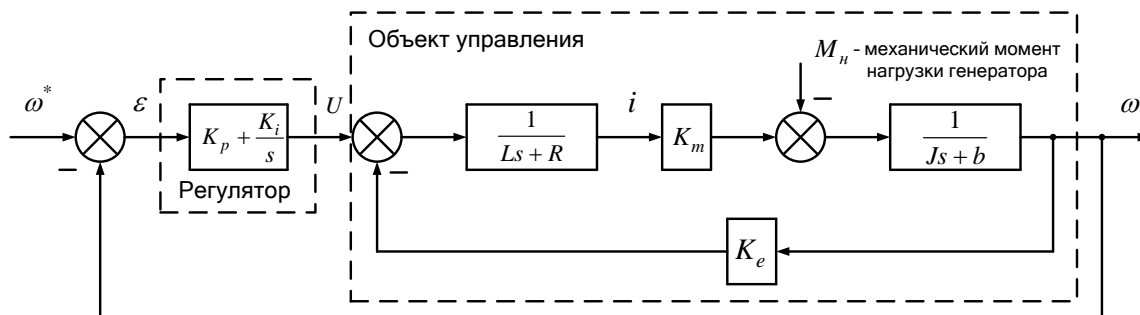


Рис. 2. Структурная схема объекта «генератор-двигатель» с введенным регулятором скорости вращения приводного двигателя

Используемая модель двигателя постоянного тока имеет в своей конструкции датчик измерения скорости вращения якоря – тахогенератор. Сигналы тахогенератора поступают по обратной связи. Сигналы ошибки между заданной скоростью и измеряемой поступают на ПИ-регулятор. ПИ-регулятор вырабатывает управляющее воздействие, корректирующее скорость вращения якоря.

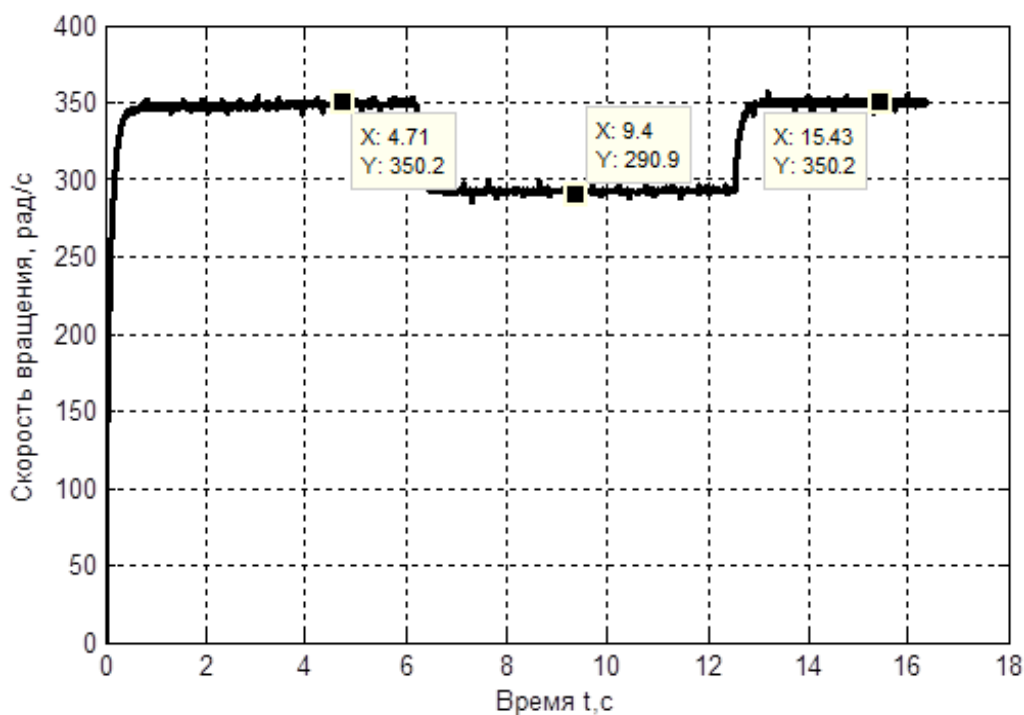


Рис. 3. Изменение скорости вращения якоря двигателя при включении генератора

Использование средств микроконтроллера позволило реализовать алгоритм поддержания задаваемой скорости вращения приводного двигателя при включении нагрузки генератора.



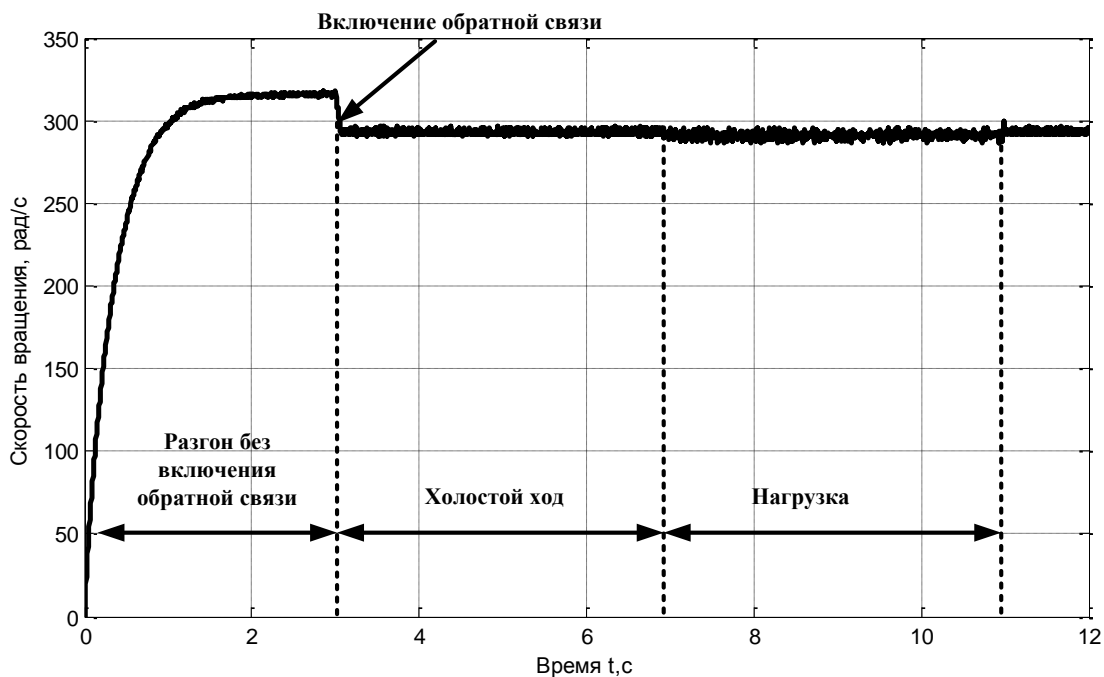


Рис. 4. Результат поддержания заданной скорости вращения якоря двигателя постоянного тока при включении нагрузки генератора

Для реализации алгоритма управления скоростью вращения якоря двигателя была проведена идентификация параметров системы «генератор-двигатель». Идентификация осуществлялась на основе динамических характеристиках двигателя: изменение скорости вращения и тока двигателя при разгоне. Измерение тока двигателя осуществляется датчиком тока на основе эффекта Холла. В ходе измерения тока генератора наблюдался эффект поглощения частот, который представлен на рисунке 5.

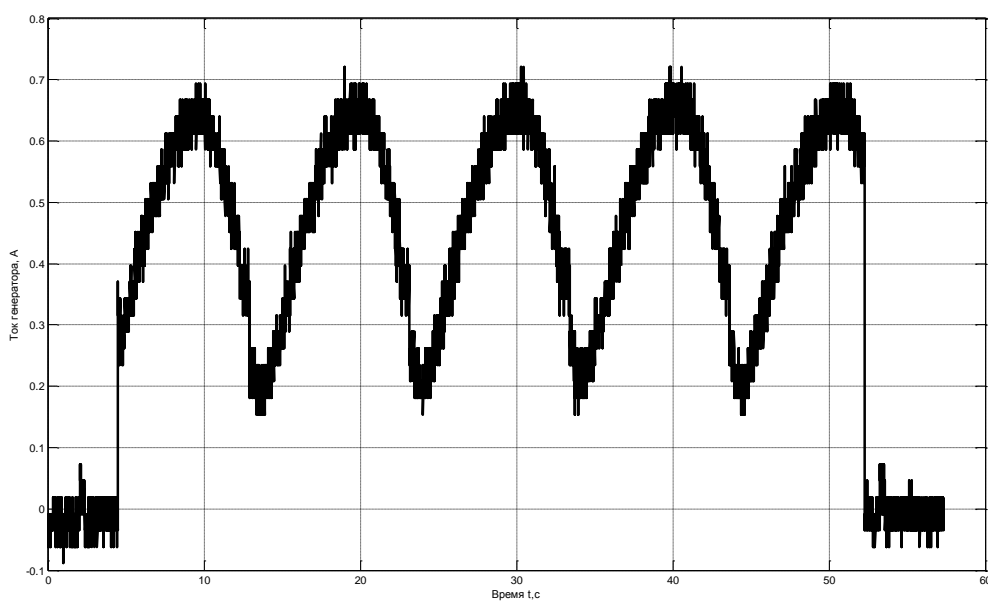


Рис. 5. Эффект поглощения частот при измерении тока генератора

Для исключения влияния эффекта поглощения частот на выходе датчика тока генератора был поставлен фильтр, представляющий RC-цепочку.

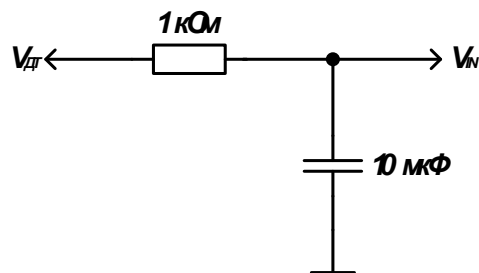


Рис. 6. Схема фильтра

Введение фильтра в цепь генератора позволило значительно улучшить результаты измерений тока генератора, как показано на рисунке 7.

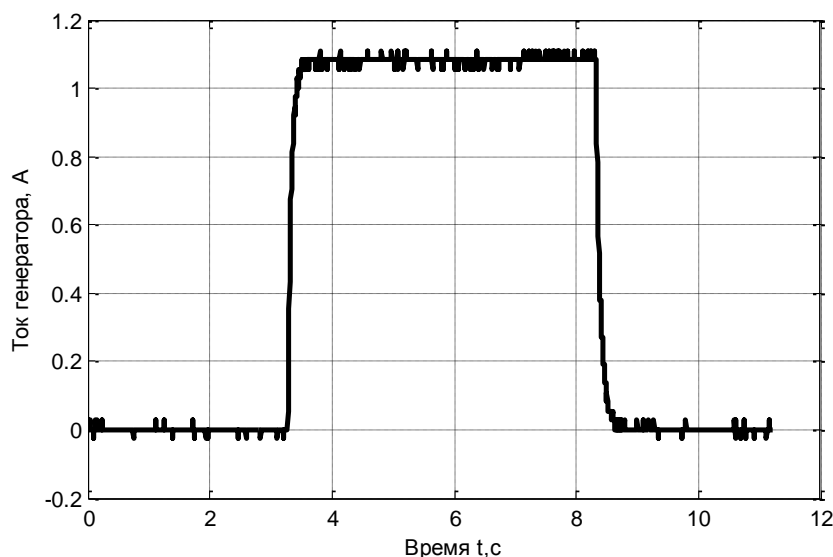


Рис. 7. Результат измерения отфильтрованного сигнала тока генератора

Таким образом, имея датчики для измерения параметров двигателя постоянного тока и микроконтроллер в контуре управления, можно реализовать алгоритм поддержания скорости вращения привода в системе «генератор-двигатель» для стабилизации напряжения генератора.

### Список литературы

- [1] *Алексеев К.Б., Палагута К.А.* Микроконтроллерное управление электроприводом: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008. – 298 с.
- [2] *Евстифеев А.В.* Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Додэка-XXI, 2007. – 592 с.

**Ливашов Артем Михайлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Email: livashov.a@yandex.ru

**Краснощеченко Владимир Иванович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Email: kvip@yandex.ru

Д.Д. Величко, А.Д. Ливинская, А.И. Волков

## **ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕПЦИИ «БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА» В РАМКАХ РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Бережливое производство как механизм разработки и реализации проектов появился в связи с необходимостью предприятий гарантировать большую конкурентоспособность своей продукции, усиление традиционных рынков сбыта, а также глобальную конкуренцию. Одной из первых стран использующих эту технологию в рамках очень ограниченных природных ресурсов и разоренная после войны, Япония стала развитой и одной из богатейших стран в мире.

Эта концепция зародилась в середине 50-х годов 20 века. Использование новейших идей управления позволило повышать качество при одновременном снижении издержек и затрат на производство. В данном случае качество осмысливается не как отдельная система, а как составная часть целостной производственной системы предприятия. В России эта система появилась не так давно и требует разработки принципов и выявления особенностей внедрения, что и рассматривается в данной статье.

В Российской практике применяется система «Lean», ее и начали называть «Бережливым производством». Она же является приспособленной версией японской TSP (Toyota Production System) с несколько видоизмененными инструментами и методами этой концепции [1].

Базисом «Бережливого производства» считаются следующие подсистемы [2]:

1) «Персонал». Основывается эта подсистема на удобных коммуникациях, командной работе, открытом обмене информацией и рационализаторстве.

2) Подсистема «Стратегическое управление» подразумевает концентрацию на нуждах и требованиях заказчика, развертывание стратегических целей, реализацию проектов и управление по ключевым показателям эффективности.

3) Подсистема «Процессы» осуществляет функции выявления и снижения потерь, организации непрерывного потока изделий, структурированного решения проблем.

Наглядное представление такой концепции можно выразить в виде рисунка 1:

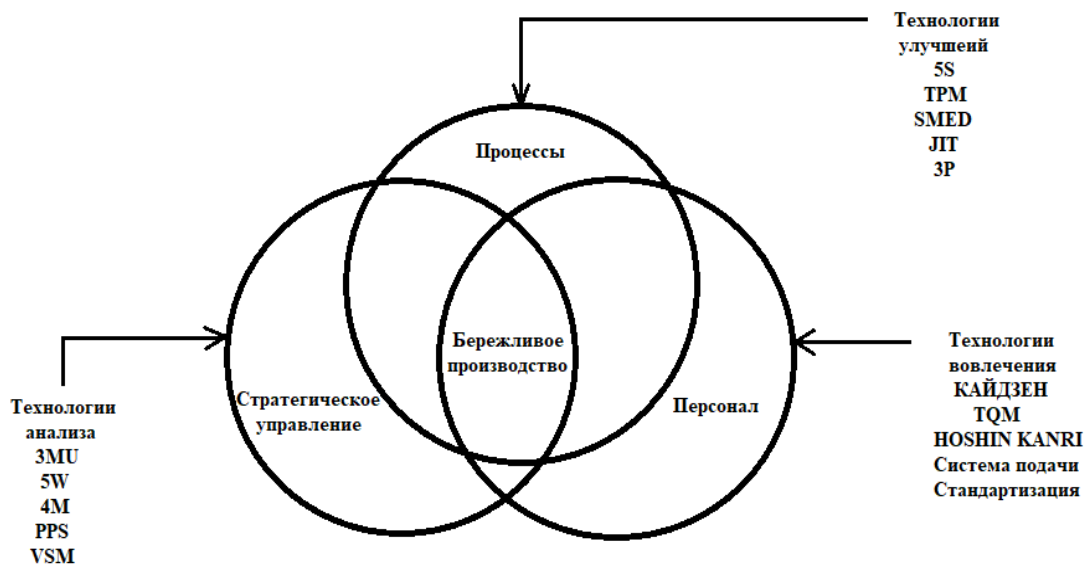


Рис. 1. Базис бережливого производства

**Российские предприятия имеют ряд особенностей:**

- 1) Совершенствование производства является очень длительным процессом, а предприятия заинтересованы в финансировании инновационных проектов, способных сделать значительный рывок за короткий период времени.
- 2) Быстрый результат становится приоритетным направлением для инвесторов, которые не меняли бы кардинально ситуацию на предприятии и не оказывали бы существенного влияния на руководство.
- 3) При внедрении «бережливого производства» компании недооценивают важность философии этой концепции, которая базируется на всеобъемлющей трансформации предприятия.

**Применение следующих принципов** на российских производствах, позволит оценить степень внедрения «бережливого производства»:

Во-первых, результаты появятся только тогда, когда изменится структура предприятия и вести работу будут высококвалифицированные специалисты, топ-менеджеры.

Во-вторых, для успешной реализации бережливого производства в рамках предприятия необходимо, чтобы все сотрудники организации были вовлечены в этот процесс.

В-третьих, необходима среда для взращивания будущих специалистов и лидеров, которые будут продолжать деятельность по внедрению бережливого производства.

В-четвертых, пилотные проекты помогут оценить степень рисков и показать сотрудникам наглядно результативность работы системы.

В-пятых, необходим такой важный элемент как стандартизация и закрепление полученных результатов, без которого предприятие будет возвращаться в исходную позицию.

Использование данных принципов позволяет упростить управление процессом внедрения бережливого производства, обеспечить более эффективное распределение ресурсов, направить персонал в нужном направлении развития и повысить конкурентоспособность продукции.

На рисунке 1 были представлены технологии анализа и контроля проводимых мероприятий, которые помогают отследить более точно уровень внедрения концепции и произвести корректировки в случае необходимости [3].

Таким образом, бережливое производство помогает оптимизировать и улучшить отдельные сферы функционирования компании, что дает синергетический эффект и возможность предприятия разрабатывать новые стратегические планы, пересматривать и менять свои текущие цели.

### Список литературы

[1] Савенков Д.Л., *Практика внедрения "бережливого производства" на промышленных предприятиях машиностроительного комплекса России*. Москва: Финансы и статистика, 2006, 224 с.

[2] Ключев А.В., *Концепция бережливого производства: учеб. пособие*. Екатеринбург: УрФУ, 2013, 88 с.

[3] Вэйдер М., *Инструменты бережливого производства: Минируководство по внедрению методик бережливого производства*. Москва: Альпина Паблицер, 2016, 125 с.

**Величко Денис Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: denys97.velichko@mail.ru

**Ливинская Алина Дмитриевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: livinskaya.lina@yandex.ru

**Волков Андрей Иванович** – канд. экон. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vai@bmstu-kaluga.ru

Хейн Хтет Аунг, А.М. Макаренков

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ КОМПЕНСАЦИИ СЛУЧАЙНОСТИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из резервов повышения точности систем автоматического управления является компенсация случайности физических параметров их элементов, причиной которой является воздействие разного рода факторов, имеющих место в реальных условиях эксплуатации. Задача компенсации влияния случайности параметров системы на точность и качество ее работы может рассматриваться в двух аспектах. Если речь идет о пассивной компенсации [1], то данная задача понимается в смысле определения оптимальных значений контролируемых параметров системы управления, например, параметров регулятора, обеспечивающих минимизацию влияния случайности других параметров, например, параметров объекта управления, которые часто являются неконтролируемыми и изменяющимися под действием разного рода внешних и внутренних случайных факторов. Активная компенсация [2] понимается в смысле формирования такого входного сигнала, который минимизирует влияние случайности параметров системы управления на ее выходной сигнал.

Алгоритм пассивной компенсации основан на оптимизационной процедуре, которая минимизирует критерий, зависящий от параметров регулятора и определяющий отличие поведения системы со случайными параметрами от поведения эквивалентной детерминированной системы, случайные параметры которой заменены их средними (номинальными) значениями. При этом минимизируется следующий функционал, вычисляемый с использованием усредненной проекционной модели стохастической системы, построенной с применением методов теории матричных операторов:

$$J(\mathbf{p}) = \left[ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[ c_{ij}^{e_{m_x}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[ c_{ij}^{e_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

где  $c_{ij}^{e_{m_x}}(\mathbf{p})$  и  $c_{ij}^{e_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$  – элементы квадратных матриц  $\mathbf{C}^{e_{m_x}}(\mathbf{p})$  и  $\mathbf{C}^{e_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ , определяемых, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{e_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \left[ \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \right]^T - \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \left( \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \right)^T, \quad \mathbf{C}^{e_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где  $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$  – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала системы со случайными параметрами;  $\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}$  – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы;  $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$  – проекционная характеристика автокорреляционной функции выходного сигнала системы со случайными параметрами;  $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$  – проекционная характеристика автокор-

реляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы;  $\mathbf{p}$  – вектор параметров регулятора.

В результате минимизации функционала (1) находятся значения элементов вектора параметров регулятора  $\mathbf{p}$ , обеспечивающие наибольший эффект компенсации случайности параметров системы управления, достижимый при таком подходе.

Другой подход к активной компенсации случайности параметров систем автоматического управления состоит в управлении статистическими характеристиками выходного сигнала стохастической системы с целью приближения этих характеристик к статистическим характеристикам выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы. Управление осуществляется подачей на вход стохастической системы скорректированного управляющего воздействия в виде специально сформированного случайного процесса, обеспечивающего получение таких статистических характеристик выходного сигнала, которые имел бы выходной сигнал этой же системы при отсутствии случайных вариаций ее параметров (эквивалентной детерминированной системы) и подаче на ее вход некоторого нескорректированного управляющего воздействия. Иными словами, активная компенсация может при определенных условиях заставить стохастическую систему вести себя подобно детерминированной при обработке особым образом сформированного случайного управляющего воздействия, нивелирующего влияние фактора случайности ее параметров.

Алгоритм определения математического ожидания и автокорреляционной функции скорректированного управляющего воздействия также основан на использовании усредненной проекционной модели стохастической системы. Операторная форма этой модели позволяет сделать качественный вывод об аддитивном характере влияния случайности параметров системы на математическое ожидание и автокорреляционную функцию ее выходного сигнала и предложить соответствующие подходы к компенсации этого влияния. Данная модель позволяет решить обратную задачу для стохастической системы, определяя скорректированное математическое ожидание управляющего воздействия как

$$cor.m_y^l(t) = \Phi^T(t)(\mathbf{m}_A)^{-1} \mathbf{C}^{m_x} \quad (2)$$

где  $\mathbf{m}_A$  – усредненный матричный оператор стохастической системы, представляющий собой матрицу математического ожидания ее стохастического оператора  $\mathbf{A}$ , вычисляемого с использованием “реального” оператора интегрирования  $\mathbf{P}^* = T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}$ , где  $T_D$  – некоторая малая постоянная времени,  $\mathbf{P}$  – матричный оператор интегрирования;  $\Phi(t) = [\varphi_1(t), \dots, \varphi_l(t)]^T$ , где  $\varphi_i(t), i = \overline{1, l}$  – элементы системы ортонормированных функций, в качестве которой используется система функций Уолша.

Скорректированная автокорреляционная функция управляющего воздействия определяется путем решения обратной задачи для эквивалентной

детерминированной системы, на выходе которой формируется случайный процесс, автокорреляционная функция которого компенсирует разность между автокорреляционной функцией выхода стохастической и детерминированной системы. Формально данная автокорреляционная функция определяется как

$${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2) = \Phi^T(t_1)(\bar{A})^{-1} C^{R\Delta} \left( (\bar{A})^T \right)^{-1} \Phi(t_2) \quad (3)$$

где  $\bar{A}$  – матричный оператор эквивалентной детерминированной системы, также вычисляемый с использованием оператора интегрирования  $P^*$ ;  $C^{R\Delta}$  – проекционная характеристика функции  $\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2)$ , определяемой соотношением

$$\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = 2\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - R_{xx}^l(t_1, t_2),$$

где  $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$  – автокорреляционная функция выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы;  $R_{xx}^l(t_1, t_2)$  – автокорреляционная функция выходного сигнала стохастической системы. При этом  $\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2)$  вычисляются для  ${}_{cor}m_y^l(t)$ , то есть предполагается, что компенсация по математическому ожиданию уже выполнена.

Статистические характеристики скорректированного управляющего воздействия, определяемые соотношениями (2) и (3), используются для формирования множества реализаций нестационарного процесса на основе его представления в виде канонического разложения. Существует алгоритм нахождения неслучайных координатных функций такого разложения, который основан на проекционной аппроксимации автокорреляционной функции формируемого случайного процесса и использовании разложения Холецкого.

### Список литературы

[1] Тун Эй Чжо, Макаренков А.М., Тун Тун Чжо, Широкова З.Г. Оптимизация параметров регуляторов стохастических систем // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 4-1. – С. 70-76.

[2] Тун Тун Чжо, Тун Эй Чжо, Мьо Паинг Сат, Макаренков А.М. Принцип активной компенсации влияния случайности параметров систем управления // *Матер. Всерос. НТК "Научно-технологические инновации в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе"*, 14 – 16 ноября 2017 г. Т. 1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – С.221-226.

**Хейн Хтет Аунг** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: heinhhtet28758@gmail.com

**Макаренков Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru



Д.К. Кузнецов

## ПОСТРОЕНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

**Введение.** Подвеска – это совокупность устройств, обеспечивающих упругую связь между кузовом автомобиля и дорогой. Она одновременно выполняет ряд важных функций, от ее конструкции и характеристик зависят управляемость, устойчивость, а также другие свойства автомобиля, которые определяют его безопасность, комфортность и надежность. От ее свойств зависит физиологическое и эмоциональное состояние водителя и пассажиров, поскольку вибрации, быстрые и резкие изменения положения тела сильно утомляют человека. [1] Поэтому одним из основных современных направлений развития является конструирование активной подвески. Под термином «активная» понимается подвеска, в которой характеристика упругого и/или демпфируемого элемента может изменяться в зависимости от дорожного профиля. [2] В данной статье построена математическая модель подвески одного колеса автомобиля, а так же построена система управления активной подвеской, позволяющая колебания кузова автомобиля свести к минимуму.

**Математической модель подвески автомобиля.** В качестве объекта управления (ОУ) для моделирования была разработана модель подвески одного колеса автомобиля. Построение модели автомобиля с 4-мя колесами является нецелесообразным, поскольку при предполагаемых параметрах управления (сравнительно слабые воздействия на подвеску, высокое быстродействие  $\sim 0.01$  с) управление по каждому из колес можно полагать независимым [1]. На Рис. 1 изображена схема движения подвески одного колеса.

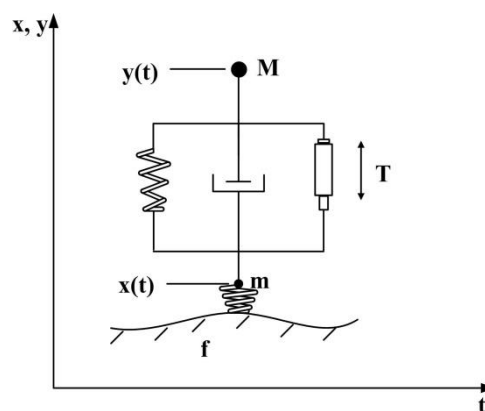


Рис. 1. Движение подвески одного колеса

Движение поддресорной и неподдресорной массы относительно положения равновесия в соответствии со 2-м законом Ньютона можно описать с помощью следующей системы:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + m\ddot{x} = c_i(t)(f(t) - x) \\ M\ddot{y} + c_1(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) = T(t) \end{cases} \quad (1)$$

где:  $f(t)$  – профиль дороги;  $T(t)$  – управляющее воздействие со стороны актуатора;  $c_i(t)$  – упругость шины;  $c_1(t)$  – упругость пружины;  $\alpha(t)$  – коэффициент поглощения амортизатора;  $x(t)$  – координата подвески;  $y(t)$  – координата поддресорной массы (кузов автомобиля);  $M$  – поддресорная масса;  $m$  – неподдресорная масса.

На Рис. 2 представлена модель объекта управления в Simulink. Коэффициенты, используемые в модели соответственно означают:  $f(t)$  – профиль дороги;  $F$  – управляющее воздействие со стороны актуатора;  $C_k$  – упругость шины;  $C_p$  – упругость пружины;  $h$  – коэффициент поглощения амортизатора;  $y(t)$  – координата поддресорной массы (корпус автомобиля);  $M$  – поддресорная масса;  $m$  – неподдресорная масса.

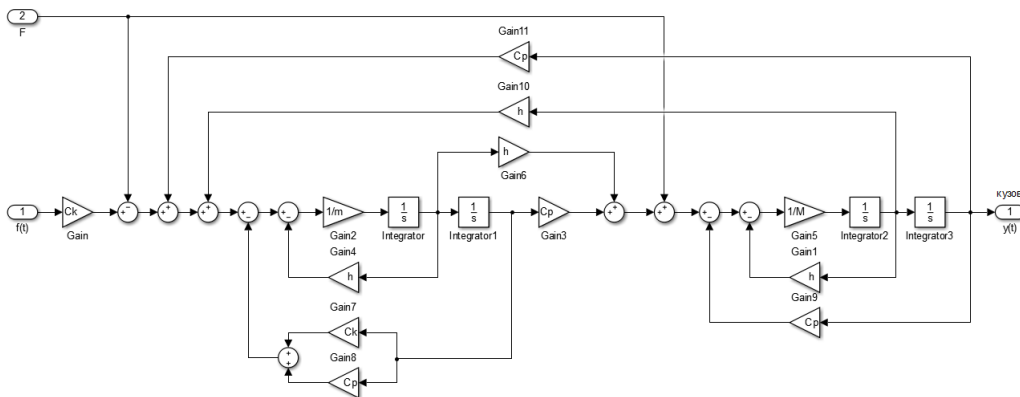


Рис. 2. Модель объекта управления в Simulink

**Построение замкнутой системы управления.** Структурная схема замкнутой системы управления подвеской автомобиля приведена на Рис. 3, где:  $T$  – желаемая (эталонная) координата кузова;  $W_{ку}(s)$  – передаточная функция корректирующего устройства;  $W_{исп}(s)$  – передаточная функция исполнительного устройства;  $W_{об}(s)$  – передаточная функция объекта управления – подвески автомобиля;  $W_{дат}(s)$  – передаточная функция – датчика;  $f(t)$  – профиль дороги;  $y$  – реальная координата кузова.

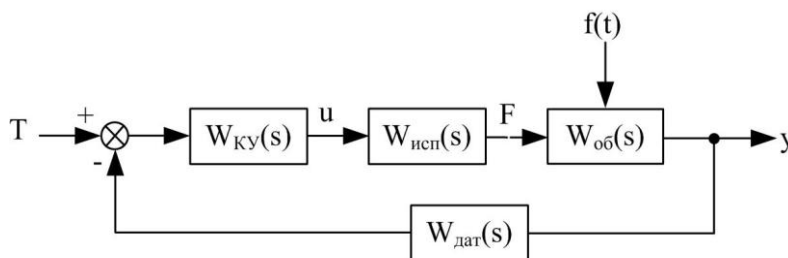


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы управления подвеской автомобиля

Истинное положение кузова измеряется датчиком с передаточной функцией  $W_{дат}(s)$ . Для компенсации измеренной ошибки, регулятор  $W_{КУ}(s)$  выдает на исполнительное устройство с передаточной функцией  $W_{исп}(s)$  управляющий сигнал  $u$ , который преобразуется в силу  $F$ , гасящую колебания подвески от неровностей дороги.

**Моделирование нескорректированной системы.** Выполним моделирование движения автомобиля по неровностям, при условии, что передаточные функции исполнительного устройства  $W_{исп}(s)$ , датчика  $W_{дат}(s)$ , регулятора  $W_{КУ}(s)$  равны единице. Генерацию неровностей произведем по синусоидальному закону:

$$f(t) = A_{max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

Параметры подвески:  $m = 59$  кг;  $M = 500$  кг;  $C_k = 8406$  Н/м;  $C_p = 2375$  Н/м;  $h = 1000$  Н\*с/м.

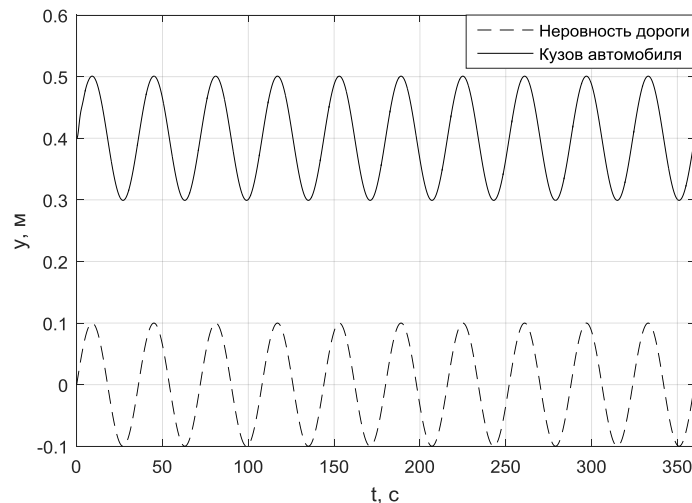


Рис. 4. Моделирование нескорректированной системы

Из Рис. 4, видно, что колебания кузова полностью повторяют неровности дороги, следовательно, конструкция такой подвески не гасит колебания со стороны дорожного профиля, а полностью передает их на кузов автомобиля, что является неприемлемым

**Синтез регулятора.** Для данной системы управления эталоном является постоянное положение кузова, т.е. координата кузова не должна меняться при движении по неровностям дорожного полотна. В качестве эталона было выбрано нулевое положение пружинной массы ( $T = 0$ ).

В качестве корректирующего устройства был выбран ПИД – регулятор с передаточной функцией:

$$W_{КУ}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (3)$$

Поиск минимального значения параметров регулятора  $K_P$ ,  $K_D$ ,  $K_I$  определяется по следующему критерию оптимальности:

$$I(K_P, K_I, K_D) = \int_0^T [x(t, K_P, K_I, K_D) - x_s(t)]^2 dt \rightarrow \min_{K_P, K_I, K_D} \quad (4)$$

где  $x(t, K_{II}, K_D, K_I)$  – реальная выходная координата,  $x(t, K_{II}, K_D, K_I)$  – эталон.

Для поиска оптимальных значений параметров регулятора воспользуемся математическим пакетом Matlab. В качестве ограничений был задан интервал значений параметров, который соответствовал от 0 до 100000 для каждого параметра. В результате оптимизации были получены следующие значения параметров регулятора:  $K_{II} = 2000$ ;  $K_D = 20000$ ;  $K_I = 20000$ .

**Моделирование скорректированной системы.** Выполним моделирование скорректированной системы при тех же условиях, которые применялись для нескорректированной системы.

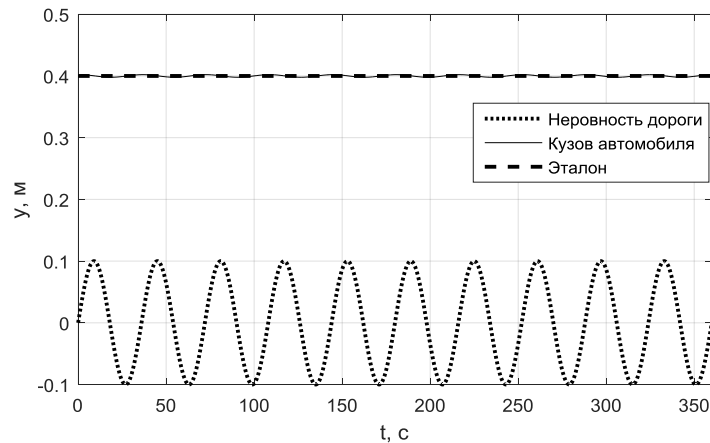


Рис. 5. Моделирование скорректированной системы

Из Рис. 5 видно, что график скорректированной системы практически совпадает с эталоном, следовательно, можно сделать вывод, что достигнуто необходимое качество работы системы. Замокнутая система управления подвеской автомобиля гасит колебания со стороны дорожного профиля и практически не передает их на кузов автомобиля.

**Заключение.** В данной работе была создана математическая модель подвески одного колеса автомобиля, построена замкнутая система управления подвеской автомобиля, выполнен синтез регулятора. В результате синтеза регулятора было достигнуто необходимое качество работы системы управления подвеской автомобиля. В дальнейшем необходимо подобрать исполнительное устройство и датчик для создания реальной замкнутой системы управления подвеской автомобиля, а также произвести ее корректировку.

### Список литературы

[1] Жданов А.А., Липкевич Д.Б. AdCAS - система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля. *Труды Института Системного Программирования РАН*, 2004, № 7, с. 119–159.

[2] Активная подвеска. URL: [http://systemsauto.ru/pendant/active\\_suspension.html](http://systemsauto.ru/pendant/active_suspension.html) (дата обращения 25.02.2018).

**Кузнецов Дмитрий Константинович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [rulff@yandex.ru](mailto:rulff@yandex.ru)

Хейн Кхант Аунг, М.О. Корлякова

## **РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА И МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные системы управления все чаще содержат обучаемые модели класса нейронные сети, которые решают задачи классификации и аппроксимации информации на разных уровнях работы сложных технических систем. Однако следует отметить, что:

- типов нейросетей много,
- вариантов построение нейронной сети для каждого типа задач очень много,
- решать вопрос генерации нейронной сети путем перебора очень долго.

Будем формировать нейронные сети с использованием генетического алгоритма, а для удобства использования этих моделей вместе разработаем интерфейсное приложение в Matlab[1].

Рассмотрим основные трудности построения моделей для выбора структуры и настройки нейронной сети в генетических алгоритмах. Во-первых, необходимо определить инварианты организации сети и ограничить их число на основании предположений о характере задачи. В случае построения нейросетевых классификаторов для небольшого объема выборки и числа входных признаков менее 200 такой моделью может быть многослойный перцептрон с одним скрытым слоем. Таким образом изменчивость сети ограничена размерами скрытого слоя, алгоритмом обучения и типом нейронов.

Во-вторых, необходимо определить инварианты описания данных поступающих на входы сети. Будем считать, что данные имеют вид таблиц признаков и объектов, где как признаки, так и объекты могут быть строками или столбцами. Передаваемое множество признаков и объектов образует массив без разрывов с точки зрения его чтения в среду программы

В-третьих, необходимо унифицировать процедуру постройки Генетического алгоритма с учетом одновременной генерации списка входных признаков и структуры сети.

Таким образом интерфейс модели настройки нейронной сети в генетическом алгоритме должен содержать следующие разделы:

- Блок чтения признаков объектов моделируемой задачи,
- Блок чтения целевых свойств моделируемой задачи,
- Блок определения ограничений формируемой нейронной сети,
- Блок определения параметров ГА
- Блок сохранения и отображения результатов.

Поскольку модель адаптации нейронной сети к поставленной задаче классификации разрабатывалась в среде MatLab, то и интерфейс будем строить с использованием средств этого пакета. Хотя используемая среда не позволяет строить сложные варианты интерфейсов с пользователем, она обеспечивает визуальные средства конструирования стандартных интерфейсных приложений, что полностью удовлетворяет требованиям к скорости и качеству формируемого средства взаимодействия с основной частью программы[2].

На рис.1 представлена схема интерфейса, где выделены соответствующие области главного окна

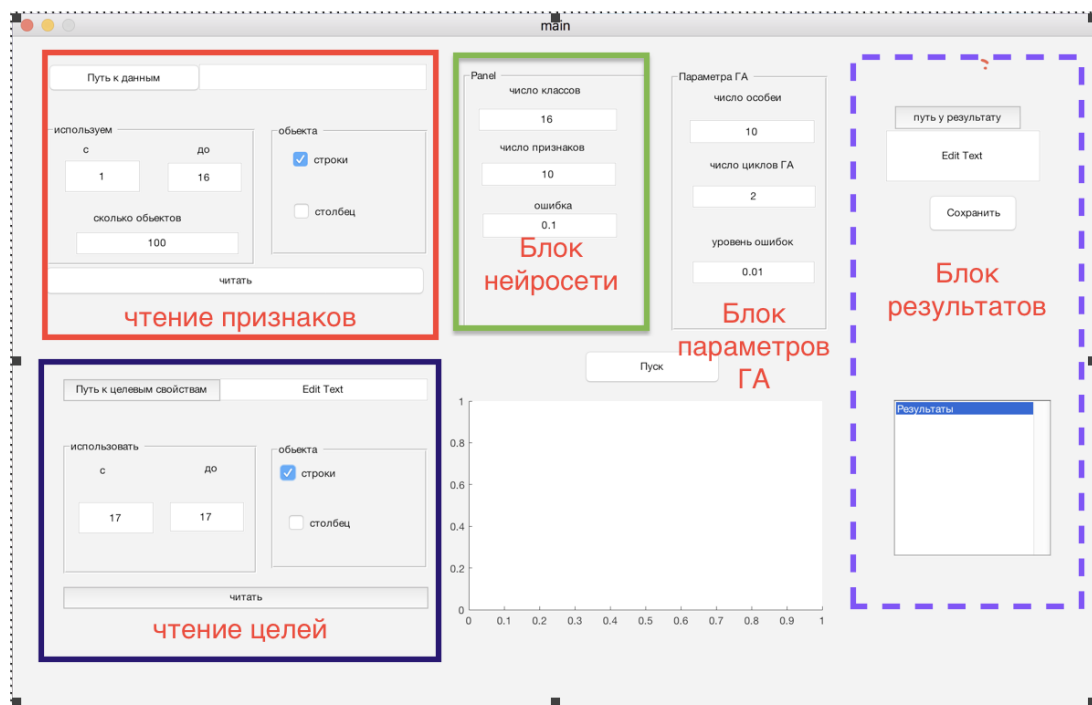


Рис. 1. Схема приложения интерфейса

У нас есть схематический интерфейс. На примере обработки данных Grng.dat [3] рассмотрим процесс обработки информации для запуска и документирования результатов в интерфейсном приложении модели настройки нейронной сети в ГА. Первый шаг состоит в вводе пути к данным в области чтения признаков. Предполагается, что данные должны быть подготовлены для чтения в MatLab. Это подразумевает их представление в виде переменной, хранимой в файле \*.mat (рис.2). Следующий шаг состоит в указании порядка чтения объектов и границ списка признаков (заполняем в поля области «используем» от 1 до 16, и определяем число примеров (100 объектов). Наконец переходим к чтению объектов из файлов. По аналогичной схеме обрабатываем и чтение целей. При этом формируется два массива: массив входных признаков по всем объектам и сопоставленный ему массив целевых свойств. Оба массива имеют статус глобальных и будут доступны из функции фитнеса.

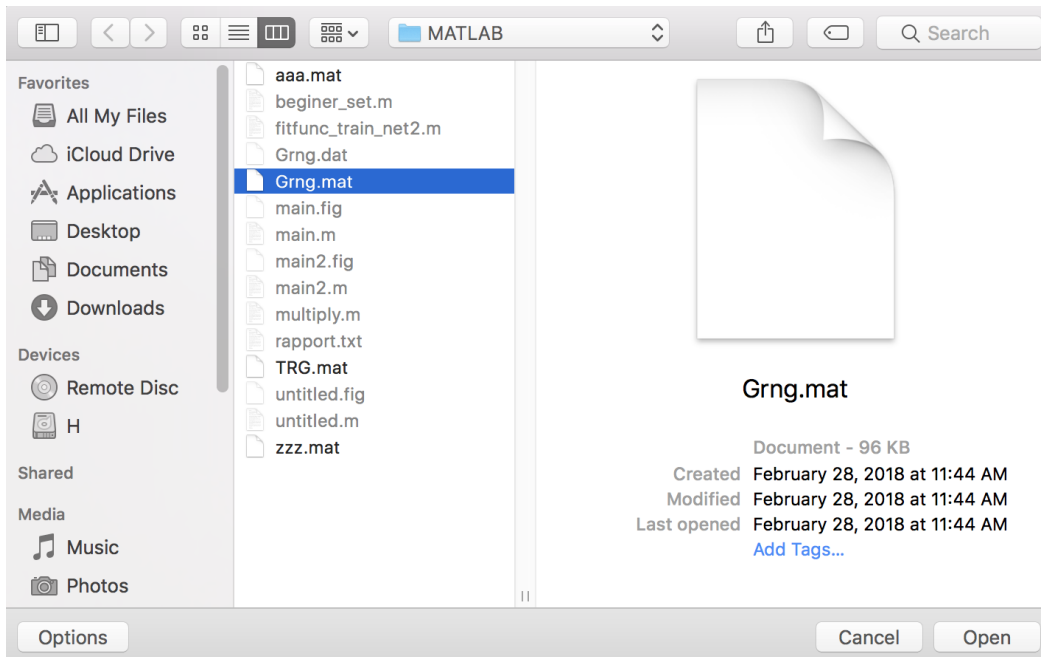


Рис. 2. Выбор файла признаков и целей

В следующей панели настройте три блока. Блок параметров сети – служит для определения числа классов, число признаков и целевой ошибки моделирования нейронной сети. Следующая панель устанавливает параметры генетического алгоритма. Установим число особей (для нашего примера оно установлено как 10), число циклов ГА (в примере 2) и уровень ошибок целевой особи (0.01). «Пуск» запускает процесс формирования параметров ГА и инициирует его работу (функции пакета MatLab: `ga`, `gaoptimset`). Функция фитнеса содержит процедуру обучения нейронной сети, а мерой качества сети считаем ошибку тестирования. При этом появляется окно процедуры обучения нейронной сети (рис.3). Генетический алгоритм в среде MatLab позволяет отобразить результаты в форме изменения фитнеса от эпох работы алгоритма (рис.4).

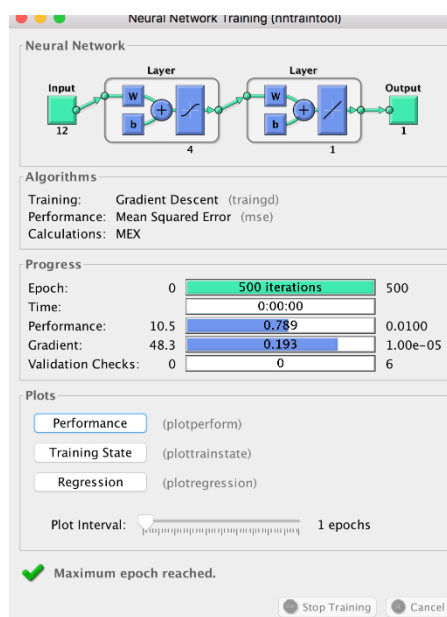


Рис. 3 Процедуры обучения нейронной сети

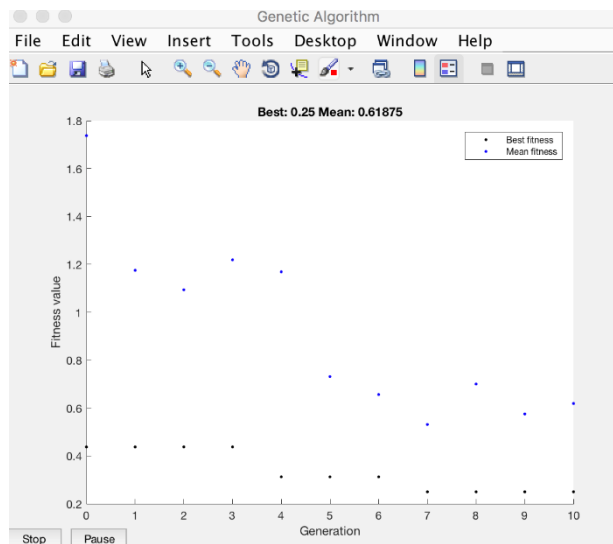


Рис. 4. Фитнес от эпох работы алгоритма

Для удобства пользователя все результаты отображаются на экране и сохраняются в файл отчета и файл для хранения обученной нейронной сети с параметрами, которые сформировал генетический алгоритм. Содержание текстового отчета приведено ниже и отображает тип алгоритма обучения, тип нейронов скрытого слоя и их число, а также список входных признаков, оставшихся при отборе в ГА.

as = 'traingd' тип обучения  
 ts = 'purelin' тип нейрона  
 Nt = 100 число примеров для обучения  
 n = 4 число нейронов скрытого слоя  
 s = 1 2 4 5 6 8 10 12 13 14 15 16 список входных признаков

Таким образом, сформирован простой и удобный интерфейс для работы с настройкой нейронной сети в ГА. Он позволяет пользователю быстро и просто настроить свое приложение на конкретные данные.

### Список литературы

- [1] Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с
- [2] Борисов А.В., Воронцов А.А. Введение в Matlab и его применение для конструирования физических моделей//Томский государственный университет, 2012 [Электронный ресурс]:URL: <https://docviewer.yandex.ru/?lang=ru&name=test.pdf&tm=1522437838&tld=ru&text=борисов%20а.в.%20воронцов%20а.а.%20интерфейс> (дата обращения 26.3.2018)
- [3] Image Processing and Neural Network Lab, Training Data Files for Classification 2009 [Электронный ресурс]: URL: [https://www.uta.edu/faculty/manry/new\\_classification.html](https://www.uta.edu/faculty/manry/new_classification.html) (дата обращения 2.04.2018)

**Хейн Кхант Аунг** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uuheinkhant@gmail.com

**Корлякова Мария Олеговна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru



В.С. Родин, Ю.П. Корнюшин

## СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

**Введение.** Любая современная лабораторная аппаратура и технологическое оборудование нуждается в защите от вибраций, поскольку колебания, вызванные вибрацией, вносят искажения в показания датчиков, работу исполнительных устройств и прочее, что в конечном итоге сказывается на качестве выполняемых операций. Производством активных виброзащитных столов занимаются многие зарубежные фирмы, такие как HERZAN (США), HERZ (Япония), HALZYONICS (Германия, Швеция, США) [1]. Совершенствование виброзащитного оборудования является важной задачей особенно она актуальна, для авиакосмических и транспортных систем.

Методы виброзащиты, основанные на использовании пассивных элементов (инерционных, упругих и диссипативных) в большом числе случаев оказываются неэффективными. Они не могут в полной мере обеспечить выполнение сложных и, как правило, противоречивых требований, предъявляемых к виброзащитным устройствам. В связи с этим чаще применяются активные системы, являющиеся системами управления движением амортизируемых тел и обладающими обычно независимыми источниками энергии. При проектировании активных виброзащитных систем обычно используют частотные методы синтеза различного рода корректоров в цепях обратных связей от датчиков до виброзащитного стола, поскольку основная задача таких систем состоит в снижении уровня вибраций в основном в низкочастотном диапазоне. Однако возможно использование и других алгоритмов синтеза корректирующих устройств таких систем. В данной работе для решения задачи синтеза предлагается использовать метод минимизации квадратичного целевой функции в частотной области.

**Математическая модель системы и критерий оптимальности.** Упрощенная структурная схема активной виброзащитной установки (АВЗУ) представлена на рисунке 1 [1].

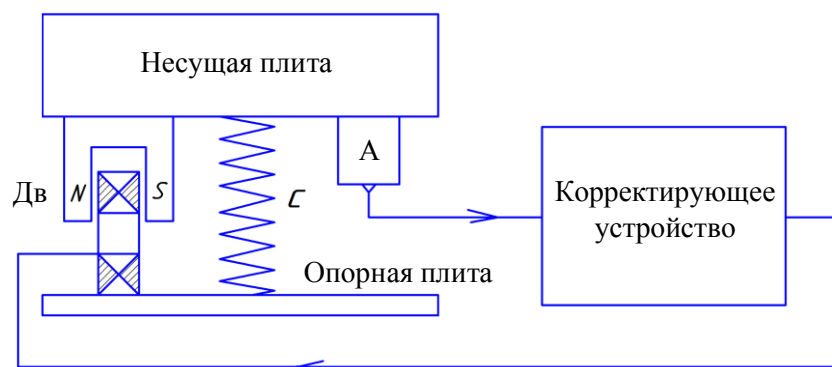


Рис. 1. Схема одномодовой активной виброзащитной установки

Несущая плита с помощью упругих элементов устанавливается на опорную. На несущую плиту устанавливаются акселерометры и движители. Электрические цепи управляют процессом подавления колебаний несущей плиты с установленным на ней защищаемым оборудованием.

Основываясь на математической модели упругого подвеса [2] предлагается следующая структурная схема одномодовой АВЗУ (рис. 2).

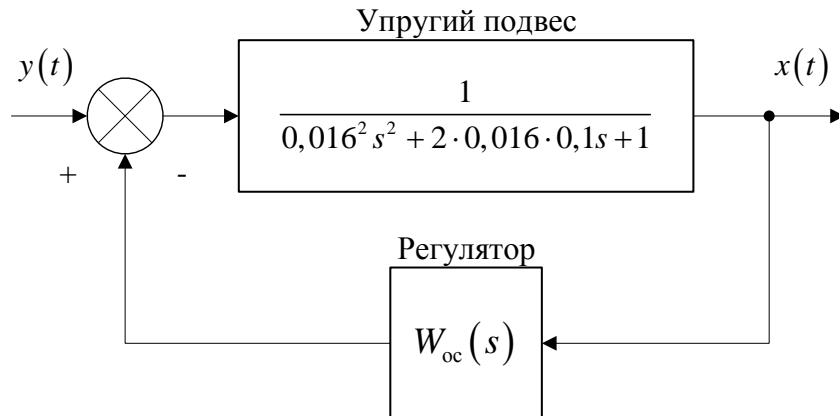


Рис. 2. Структурная схема АВЗУ

В качестве целевой функции, используемой при синтезе регулятора (корректирующего устройства) выберем функцию вида

$$J(P) = \sum_{i=1}^N (L_3(\omega_i) - L(\omega_i, P))^2$$

где  $P$  – вектор параметров регулятора,  $L_3(\omega)$  и  $L(\omega, P)$  – логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) желаемой (эталонной) и реальной системы, соответственно.

Минимизируя данный критерий оптимальности можно найти такие значения параметров корректирующего устройства, которые обеспечат близость амплитудно-частотной характеристики АВЗУ к желаемой характеристике.

**Выбор эталона.** В процессе синтеза регулятора АВЗУ будем рассматривать в качестве эталона коммерческий виброзащитный стол AVI-150 фирмы HERZAN [3]. Нижняя граничная частота его активного диапазона составляет 2 Гц, а максимальный коэффициент подавления колебаний достигается вблизи значения 10 Гц. Соответствующая амплитудно-частотная характеристика приведена на рисунке 3.

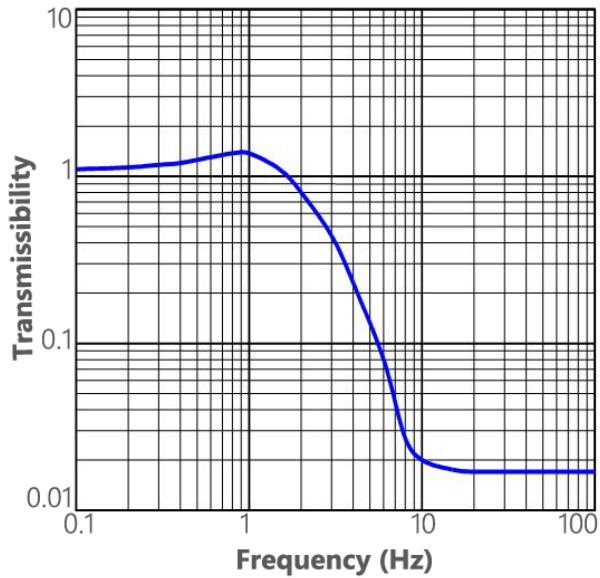


Рис. 3. Зависимость коэффициента подавления колебаний виброзащитного стола AVI-150 от частоты [3]

**Синтез регулятора.** Структурная схема корректирующего устройства представлена на рисунке 4. При поиске оптимальных параметров будем учитывать и ограничения, накладываемые на них. Так коэффициенты  $T_1, \tau_1, T_2, \tau_2, T_3, \tau_3, T_4, K_4, K_5$  могут принимать значения в диапазоне от 0,001 до 100.

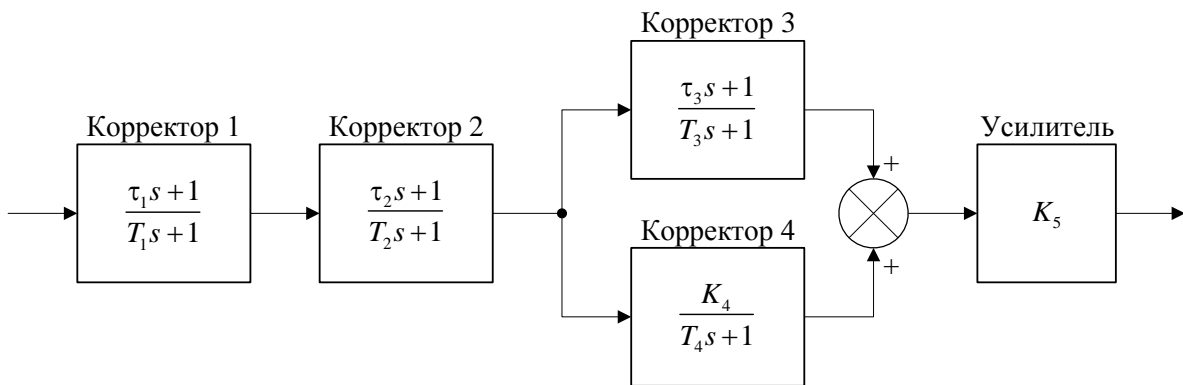


Рис. 4. Структурная схема корректирующего устройства

**Результат.** В ходе процедуры синтеза корректирующего устройства были получены следующие значения параметров:  $T_1 = T_2 = T_3 = 0,03$ ;  $\tau_1 = 0,086$ ;  $\tau_2 = 68,5$ ;  $\tau_3 = 0,086$ ;  $T_4 = 76,1$ ;  $K_4 = K_5 = 0,001$ . Рис. 5 является иллюстрацией процесса минимизации функционала  $J(P)$ .

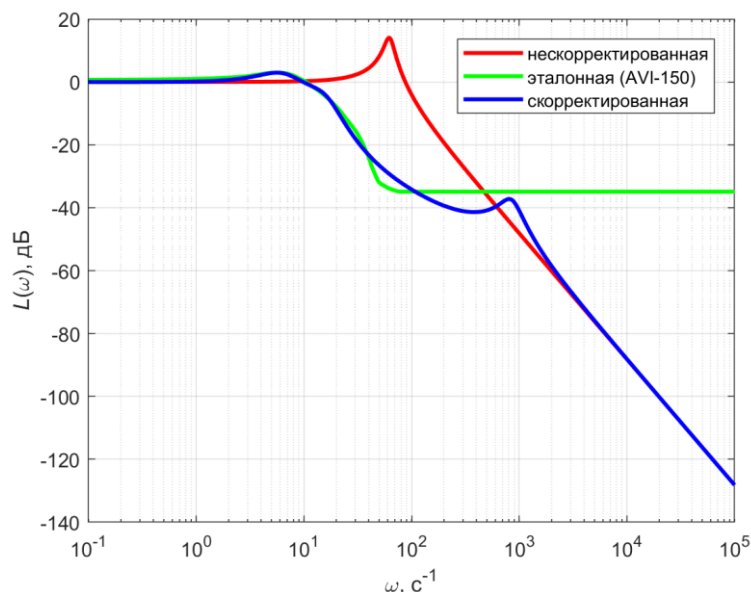


Рис. 5. Графики ЛАЧХ нескорректированной, скорректированной и эталонной системы

Таким образом, при заданной структуре регулятора, возможно, выбрать такие значения коэффициентов регулятора, которые обеспечивают близость характеристик рассматриваемой АВЗУ и эталонной модели.

### Список литературы

[1] Безбах И.Ж., Мелик-Шахназаров В.А., Софьянчук Д.В., Стрелов В.И. Новая конструкция активных виброзащитных устройств. *Наука и образование: научное издание*, 2012, № 9, с. 22

[2] Упырь Р.Ю., Логунов А.С., Московских А.О., Насников Д.Н. Математические модели механических колебательных систем на основе использования теории четырехполосников. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2007, № 3, с. 11-19.

[3] HERZAN AVI Series. URL: <http://www.herzan.com/products/active-vibration-control/avi-series.html> (дата обращения: 20.02.2018)

**Родин Владислав Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tularodin@gmail.com

**Корнюшин Юрий Петрович** – д-р техн. наук, зав. каф. "Системы автоматического управления" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru

Аунг Хейн Тху, Д.А. Акименко

## СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлические приводы нашли широкое применение в различных отраслях техники в силу ряда их достоинств, к которым можно отнести значительную удельную мощность (отношение мощности, развиваемая приводом, к его массе), высокое быстродействие и возможность позиционировать выходное звено с достаточной степенью точности. Однако гидравлические приводы относятся к нелинейным объектам, что затрудняет синтез управления приводом, обеспечивающего требуемые динамические характеристики. Ниже рассматривается подход к решению задачи построения алгоритма управления на основе концепции обратных задач динамики электрогидравлическим приводом, состоящего конструктивно из электрогидравлического усилителя и исполнительного гидроцилиндра.

Математическая модель привода с учетом упрощений представлена системой уравнений

$$\begin{cases} x(t) = K_{эу}u(t); \\ \dot{p}(t) = \frac{2E}{V} \left[ K_3 x(t) \sqrt{\frac{1}{2} (p_H - p_{сн} - p(t) \cdot \text{sign}(x(t)))} - A_{2ц} \dot{y}(t) \right]; \\ \ddot{y}(t) = \frac{1}{m_{2ц}} \left[ A_{2ц} p(t) - C_{2ц} y(t) - K_{см}^{2ц} \text{sign}(\dot{y}(t)) \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Задача ставится следующая: необходимо синтезировать управление, которое переводит рассматриваемый объект из некоторого начального состояния  $y(0)$  в заданное конечное  $y(\infty) = y^0 = \text{const}$ , при этом управляемый процесс с требуемой точностью должен следовать за эталонным процессом, которые определяется в соответствии с техническим заданием на проектируемую систему [1]. Эталонная модель определяется уравнением

$$\ddot{y}^*(t) + a_3 \dot{y}^*(t) + a_2 \ddot{y}^*(t) + a_1 \dot{y}^*(t) + a_0 y^*(t) = a_0 y^0, \quad (2)$$

где коэффициенты  $a_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$ , определяются исходя из требований технического задания к динамике проектируемого объекта.

Исключив в системе (1) переменную  $p(t)$  модель рассматриваемого привода можно представить уравнением

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{Vm_{zu}} \left[ 2A_{zu}EK_3K_{эzy}u \sqrt{\frac{1}{2} \left( p_n - p_{cl} - \frac{1}{A_{zu}} [m_{zu}\ddot{y} + K_{zu}^{em}\dot{y} + C_{zu}y] \text{sign}(u) \right)} - \right. \\ \left. - (2A_{zu}^2E + C_{zu}V)\dot{y} - K_{zu}^{em}V\ddot{y} \right] \quad (3)$$

Степень близости процессов ЭГП и эталонной модели определим функционалом

$$J(t, u) = \frac{1}{2} [\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t, u)]^2.$$

Управляющую функцию определим дифференциальным соотношением:

$$\frac{d}{dt}u(t) = \lambda \frac{d}{du}J(t, u) = -\lambda (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t, u)) \frac{\partial}{\partial u}f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}), \quad (4)$$

где  $\lambda = \text{const}$ , а  $f(u, y, \dot{y}, \ddot{y})$  - правая часть уравнения (3).

Обозначим  $K_u = -\lambda \left( \frac{\partial}{\partial u}f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}) \right)_0$ , где

$$\left( \frac{\partial}{\partial u}f(u, y, \dot{y}, \ddot{y}) \right)_0 = \\ = \left( \frac{2A_{zu}EK_3K_{эzy}}{Vm_{zu}} \sqrt{\frac{1}{2} \left( p_n - p_{cl} - \frac{1}{A_{zu}} [m_{zu}\ddot{y} + K_{zu}^{em}\dot{y} + C_{zu}y] \right)} \right)_0 \quad (5)$$

соответствует точке состояния  $y^0$ .

В результате получим закон управления в дифференциальной форме

$$\frac{d}{dt}u(t) = K_u (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t)). \quad (6)$$

Значение  $\ddot{y}_s(t)$  находим из дифференциального уравнения эталонной модели, соответствующего передаточной функции, после однократного интегрирования при нулевых начальных условиях:

$$\ddot{y}_s(t) = a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - a_3 \ddot{y}(t).$$

Проинтегрировав последнее выражение, получим в окончательном виде уравнение алгоритма управления:

$$u(t) = K_u (\ddot{y}_s(t) - \ddot{y}(t)), \\ \ddot{y}_s(t) = \int_0^t \left[ a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) \right] dt - a_2 y(t) - a_3 \dot{y}(t). \quad (7)$$

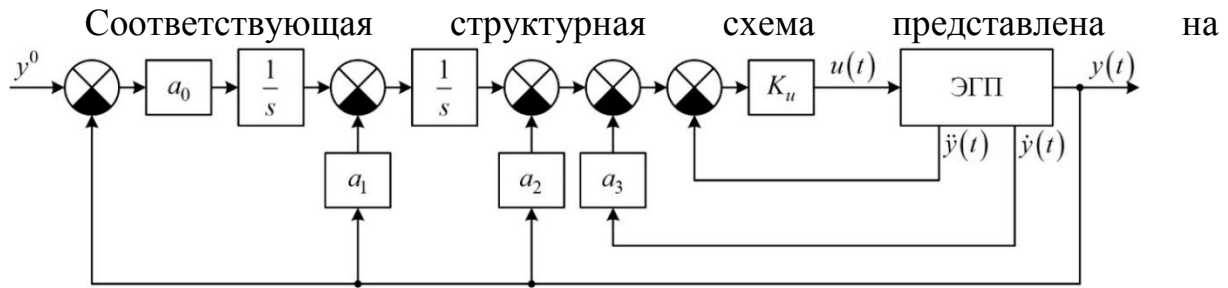


Рис. 1.

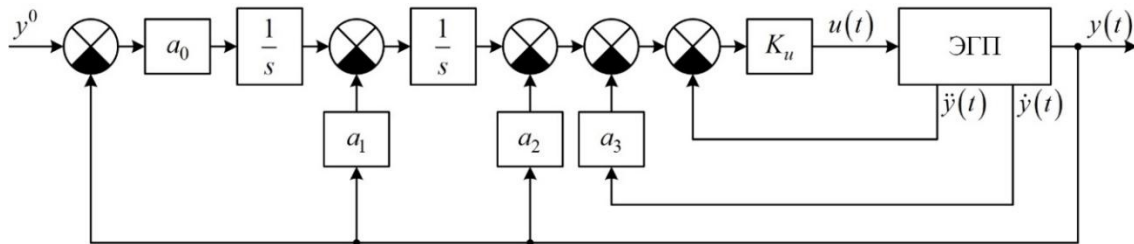


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы

Недостатком построенного алгоритма является необходимость измерения выходной координаты и двух ее производных. Поэтому рассмотрим второй вариант построения управления, основанный на градиентной схеме второго порядка:

$$\frac{d^2}{dt^2}u(t) + h \frac{d}{dt}u(t) = \lambda \frac{dG(u)}{du} \quad (8)$$

где  $h$ , и  $\lambda$  - константы.

С учетом выражения для градиента получим:

$$\ddot{u}(t) + h\dot{u}(t) = K_u (\ddot{y}^*(t) - \ddot{y}(t)) \quad \text{где}$$

$$\ddot{y}^*(t) = a_0 \int_0^t (y^0 - y) dt - a_1 y - a_2 \dot{y} - a_3 \ddot{y} \quad (9)$$

или, с учетом последнего выражения получим:

$$\ddot{u}(t) + h\dot{u}(t) = K_u \left[ a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - a_3 \ddot{y}(t) - \ddot{y}(t) \right] \quad \text{или}$$

$$\ddot{u}(t) = K_u \left[ a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - \frac{h}{K_u} \dot{u}(t) - a_3 \ddot{y}(t) - \ddot{y}(t) \right] \quad (10)$$

трижды интегрируя последнее выражение при нулевых начальных условиях получим алгоритм управления:

$$u(t) = K_u \left( \int_0^t \left[ \int_0^t \left[ a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) \right] dt - a_2 y(t) - \frac{h}{K_u} u(t) \right] dt - a_3 y(t) - \dot{y}(t) \right)$$

Также рассмотрен третий вариант построения управления. Управляющую функцию определим дифференциальным соотношением:

$$\frac{d^3}{dt^3}u(t) + K_2 \frac{d^2}{dt^2}u(t) + K_1 \frac{d}{dt}u(t) = \lambda \frac{dG(u)}{du} \quad (11)$$

где  $K_2, K_1$  и  $\lambda$  - константы.

С учетом выражения для градиента получим:

$$\ddot{u}(t) + K_2 \dot{u}(t) + K_1 u(t) = K_u (\ddot{y}^*(t) - \ddot{y}(t)) \quad \text{где}$$

$$\ddot{y}^*(t) = a_0 \int_0^t (y^0 - y) dt - a_1 y - a_2 \dot{y} - a_3 \ddot{y} \quad (12)$$

или, с учетом последнего выражения:

$$\ddot{u}(t) + K_1 \dot{u}(t) + K_2 u(t) = K_u \left( a_0 \int_0^t (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) - a_2 \dot{y}(t) - a_3 \ddot{y}(t) - \ddot{y}(t) \right)$$

трижды интегрируя последнее выражение при нулевых начальных условиях получим:

$$u(t) = K_u \left( \int_0^t \left\langle \int_0^t \left[ \int_0^t a_0 (y^0 - y(t)) dt - a_1 y(t) \right] dt - a_2 y(t) - \frac{K_2}{K_u} u(t) \right\rangle dt - a_3 y(t) - \frac{K_1}{K_u} u(t) \right) dt - y(t) \quad (13)$$

На основе полученных непрерывных алгоритмов управления построены дискретные алгоритмы, результаты моделирования которых представлены на рисунке 2.

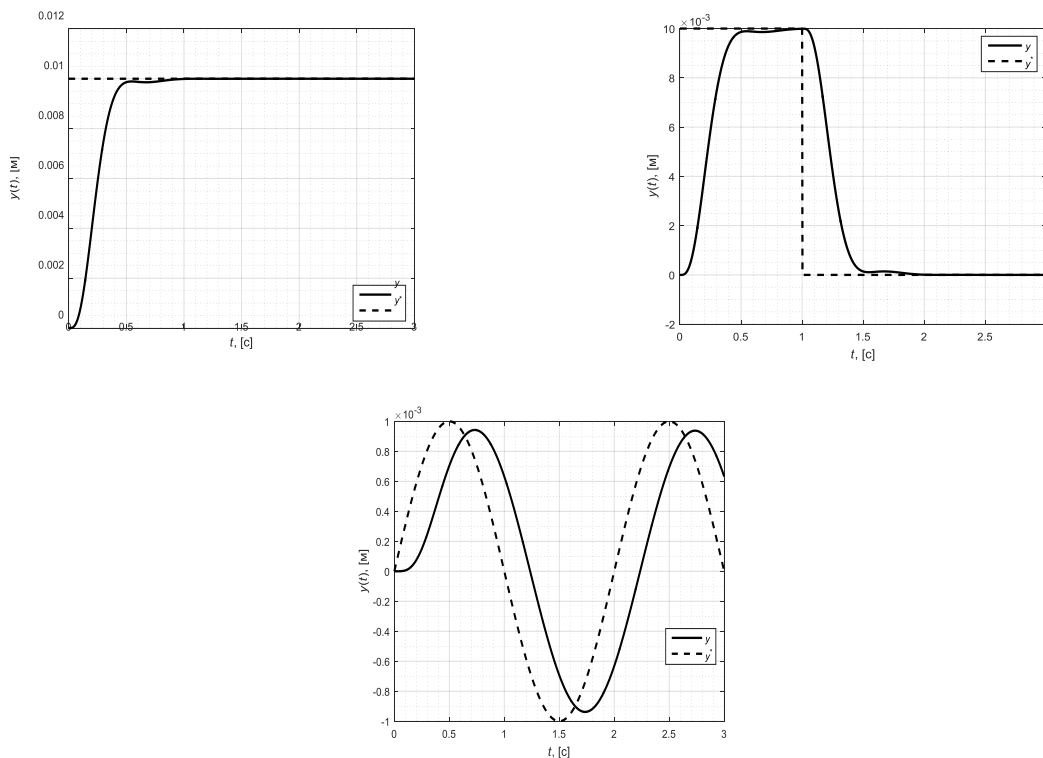


Рис. 2. Графики выходного сигнала приводе с построенным управлением этолонной модели



## **Заключение**

Таким образом, рассмотренный выше подход построения управления электрогидравлическим приводом, основанный на концепции обратных задач динамики, позволяет построить замкнутую систему управления приводом, обеспечивающую динамические характеристики привода, близкие к заданным эталонным. При построении управления рассмотрены три подхода. Первый основан на минимизации функционала, определяющего ошибку между реальным перемещением штока и заданным эталонным, по градиентной схеме первого порядка. В результате построено управление, для формирования которого необходима информация о текущем положении штока, его скорости и ускорении, что вызывает некоторые сложности при реализации полученного алгоритма. Для решения данной проблемы рассмотрены подходы синтеза управления, основанные на градиентных схемах второго и третьего порядков. Последний подход позволил получить управление, для формирования которого необходимы значения текущего положения штока гидроцилиндра. На основе полученных непрерывных алгоритмах управления построены соответствующие дискретные алгоритмы.

## **Список литературы**

[1] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

[2] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988 г. – 328 с.

**Аунг Хейн Тху** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungheinthu992@gmail.com

**Акименко Дмитрий Андреевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru

## СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Системы автоматического управления нашли широкое применение в различных отраслях техники и в управлении технологическими процессами. Повышение требований к точности и качеству управления является основанием для разработки новых подходов к решению задач синтеза систем управления. Одним из таких подходов является применение концепции обратных задач динамики к синтезу управления. Динамика как раздел науки о движении рассматривает следующие задачи:

- по заданным силам, действующим на систему, определить закон движения (траекторию) этой системы;
- по заданному закону движения системы определить силы, под действием которых это движение происходит.

Ниже рассматривается решение синтеза управления электромеханическим объектом, конструктивно который представляет собой электродвигатель, соединенный через упругую муфту с нагрузкой (например, привод звена промышленного робота), функциональная схема которого представлена на рис. 1.

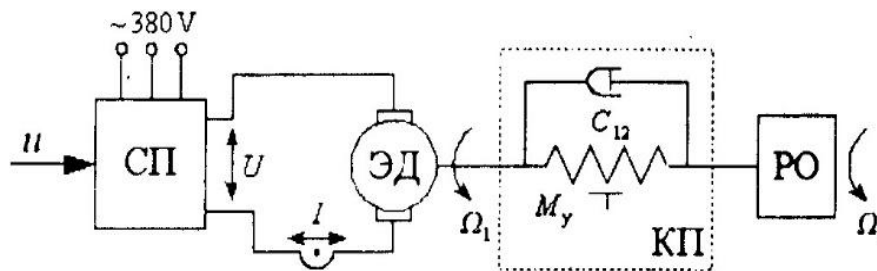


Рис. 1. Функциональная схема объекта:

СП – безынерционный силовой преобразователь; ЭД – электродвигатель;  
РО – рабочий орган; КП – кинематическая передача

Идея заключается в формировании управления на основе измерения фазовых координат с оптимизацией по выходу, а также рассмотрен вариант решения поставленной задачи с оптимизацией по состоянию. Представим модель объекта в виде

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{b}u(t), x(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t), \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{X}(t)$  – 4-мерный вектор координат состояния;  $u(t)$  – управление;  $x(t)$  – скалярная выходная переменная. Параметры математической модели

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_m}{J_2} & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ \frac{K_m K_d}{J_2} - C_{12} & -K_d \frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}} & C_{12} & \frac{K_d C}{J_1} \\ 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & \frac{C}{J_1} \\ 0 & 0 & -\frac{C}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{cn}}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Здесь  $u$ ,  $U$  – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя;  $I$  – ток якорной цепи электродвигателя;  $M$ ,  $M_y$  – электромагнитный момент и момент упругости;  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  – угловые скорости первой и второй масс;  $C$  – конструктивный параметр двигателя;  $T_a$ ,  $R_a$  – постоянная времени и сопротивление якорной цепи;  $J_1$ ,  $J_2$  – моменты инерции первой и второй масс;  $C_{12}$  – коэффициент жесткости;  $K_d$ ,  $K_r$  – коэффициенты трения;  $K_{cn}$  – коэффициент передачи силового преобразователя.

Вычислив матрицу управляемости  $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{b} & \mathbf{A}^2 \mathbf{b} & \mathbf{A}^3 \mathbf{b} \end{bmatrix}$  и найдя ее ранг, получим, что рассматриваемый объект вполне управляем.

Пусть при движении системы (1) имеется возможность измерять компоненты  $z_1, \dots, z_r$  ( $r \leq 4$ ) некоторого функционально связанного с  $\mathbf{X}(t)$  вектора  $\mathbf{Z}(t)$ . Считая измерения идеальными (без ошибок), уравнение измерителя запишем в виде

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t), \quad (2)$$

где матрица  $\mathbf{H}$  имеет размерность  $r \times 4$  и задана. В частном случае измерению могут быть доступны непосредственно некоторые координаты  $x_i(t)$  вектора  $\mathbf{X}(t)$ . Тогда структура матрицы  $\mathbf{H}$  такова, что она выделяет их  $\mathbf{X}(t)$  измеряемые переменные.

Закон управления примем в виде

$$u(\mathbf{X}, t) = \mathbf{C}_p^T \mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}_p^T \mathbf{H}\mathbf{X}(t). \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{C}_p$  –  $r$ -мерный вектор неизвестных параметров  $c_1, c_2, \dots, c_r$ , которые подлежат определению.

Замкнем рассматриваемую систему, т.е.

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{b}(u_{зад}(t) - u(t)),$$

где  $u_{зад}(t)$  – входной сигнал.

С учетом (3) можно записать

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{b}(u_{зад}(t) - \mathbf{C}_p^T \mathbf{H}\mathbf{X}(t))$$

или

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{C}_p^T \mathbf{H})\mathbf{X}(t) + \mathbf{b}u_{зад}(t). \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена структурная схема построенной системы

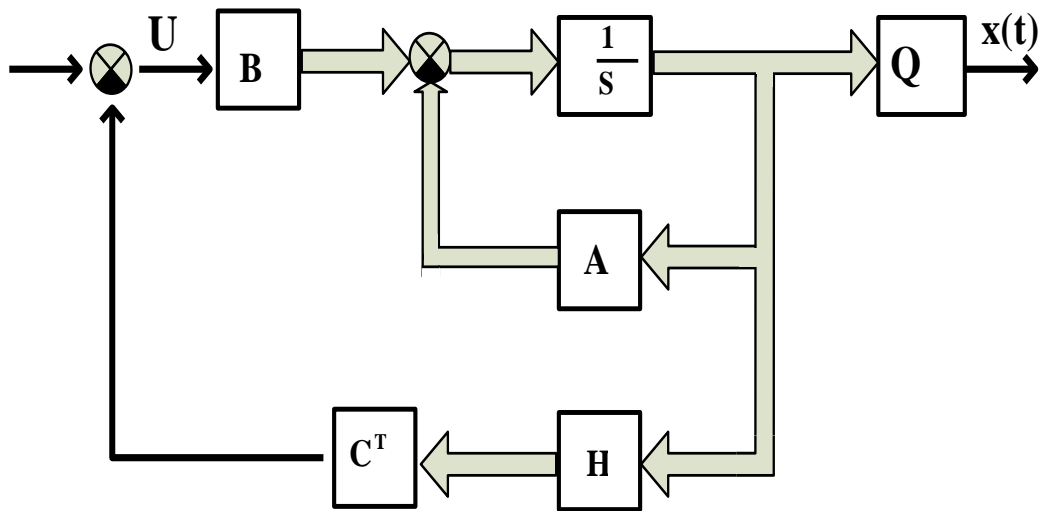


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы

Неизвестные параметры  $c_1, c_2, \dots, c_r$  будем искать из условия минимизации функционала

$$J(\mathbf{C}_p) = \int_0^T \left( \dot{\mathbf{x}}(t, \mathbf{C}_p) - \dot{\mathbf{x}}_y(t) \right)^2 dt$$

на множестве допустимых значений искомых параметров. Здесь  $x_y(t)$  – эталонный выходной сигнал, который может быть задан или аналитически или в виде выхода некоторой эталонной модели.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования для случая измерения всех фазовых координат и для следующих найденных оптимальных значений искомых параметров  $C1=4.839657e-01; C2=-2.734568e-01; C3=-5.962064e-01; C4=5.651303e-01$

## Результаты

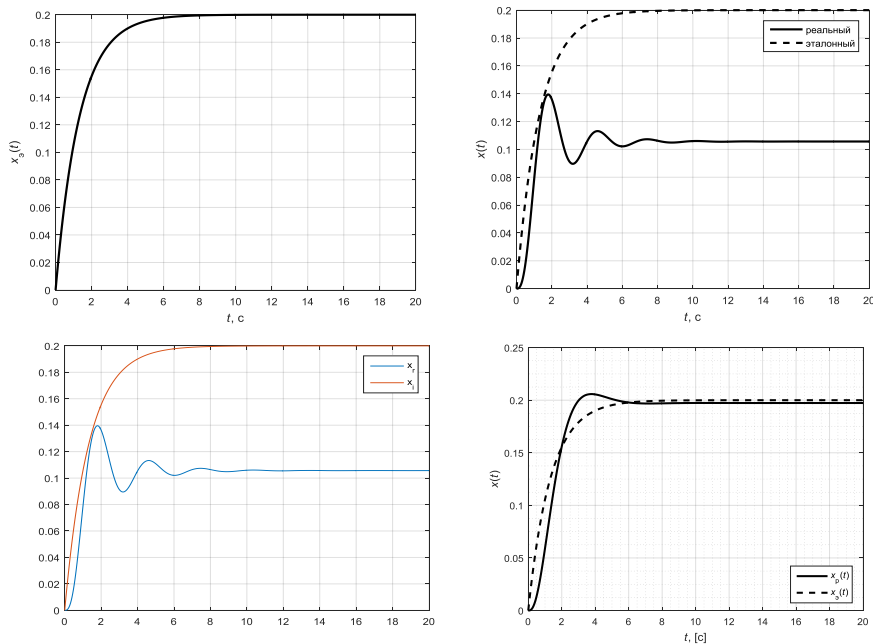


Рис. 3. измерения всех фазовых координат

Также рассмотрен случай определения оптимальных значений искомым параметров из условия максимального совпадения фазовых координат синтезируемой системы управления с фазовыми координатами некоторой эталонной модели.

### Заключение

Таким образом, на основе концепции обратных задач динамики построено управление электромеханическим объектом, представляющего собой электродвигатель и рабочий орган, связанных жесткой передачей. Управление формируется на основе измерения фазовых координат объекта. Проведенное решение поставленной задачи для случаев измерения не всех координат. Результаты моделирования показали, что построенное управление обеспечивает требуемые динамические характеристики, заданные эталонной переходной функцией.

### Список литературы

- [1] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
- [2] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987 г. – 304 с.
- [3] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988 г. – 328 с.

**Кхант Аунг** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sitth-mooaung94@gmail.com

**Акименко Дмитрий Андреевич** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru

М.О. Корлякова, Р.И. Гришин, Е.С. Нестеренко

## **СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время компьютерное зрение является одним из наиболее перспективных направлений развития интеллектуальных цифровых компьютерных технологий. Существует масса прикладных задач, решение которых становится возможным с применением системы технического зрения (СТЗ). Отличительной особенностью СТЗ является извлечение необходимой информации из изображения или последовательности изображений (видеопотока). Системы технического зрения применяют в частности для отслеживания мобильных роботов.

Рассмотрим задачу навигации мобильной платформы, движущейся по траектории (рис. 1), на основе использования видеопотока от монокамерной СТЗ. Требуется определить направление движения платформы на перекрестках, а в случае съезда с траектории – кратчайший путь для возврата на нее.

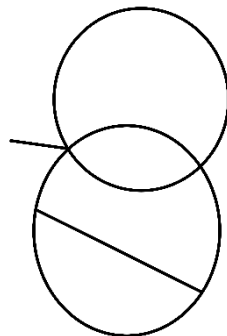


Рис. 1. Пример формы траектории

Задача движения по линии решается без коллизий типа «перекресток» и «тупик» использованием инфракрасных датчиков. Однако, при прохождении «перекрестка» невозможно решить задачу навигации без использования дополнительных средств.

В состав системы входят:

- Объект
- Поле с траекторией
- Камера
- Аппаратно-вычислительная платформа



Рис. 2. Состав системы

Разделим решение задачи на этапы:

- 1) предварительная калибровка камеры;
- 2) определение мобильной платформы и траектории на изображении, выделение перекрестков;
- 3) гомографическое преобразование изображения [1] для получения вида сверху;
- 4) определение направления движения.

Предварительная калибровка камеры и обработка информации о положении объекта должны проходить в автоматическом режиме. Пользователь задает желаемое направление движения на перекрестке.

#### **Предварительная калибровка камеры**

Задача калибровки заключается в определении внутренних и внешних параметров камеры. Иначе говоря, отвечает на вопрос: как соотносятся пиксели данной камеры с точками трехмерного пространства.

Для калибровки камеры используем «Классический» метод калибровки, предложенный Р. Цаем [2]. Достоинствами данного метода являются высокая точность получаемого результата, а также наличие программной реализации в библиотеке с открытым кодом OpenCV [3] в пакете MATLAB, которую мы и будем использовать.

Для применения алгоритма калибровки, необходимо изготовить калибровочный шаблон (рис. 2). От точности построения и измерения калибровочного шаблона будет во многом зависеть ошибка результата калибровки. Этот факт является недостатком используемого метода.

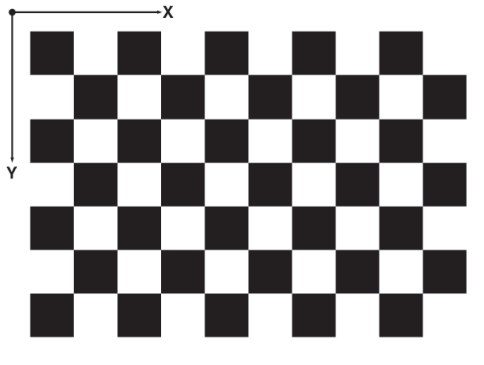


Рис. 3. Калибровочный шаблон

### Распознавание объектов на изображении

Для поиска мобильной платформы, перекрестка и самой траектории на изображении используем корреляционный поиск. Из массива примеров объекта, перекрестков, линии траектории поочередно выбираются примеры и происходит поиск соответствий примеров объектов и самих объектов на изображении.

Так как поиск мобильной платформы по примеру объекта является достаточно сложной задачей (изменение освещения, смена устройства захвата кадра сильно влияют на точность распознавания) для упрощения поиска мобильной платформы и улучшения быстродействия системы используется система маркеров. Система маркировки позволяет загружать в массив примеров не изображения мобильного объекта, а маркеры, которые на нем расположены, кроме того, систему маркировки можно использовать для определения стороны, которой к нам повернута мобильная платформа.

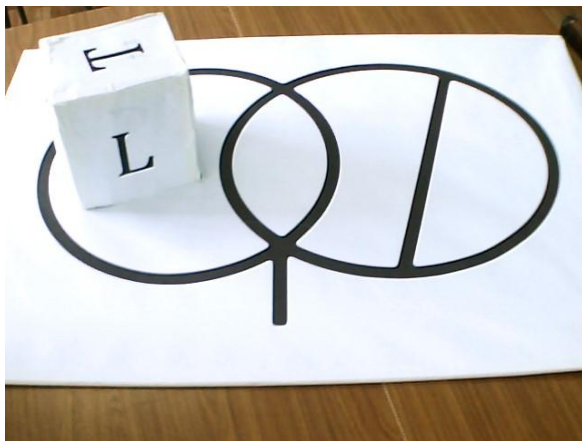


Рис. 4. Объект с маркерами

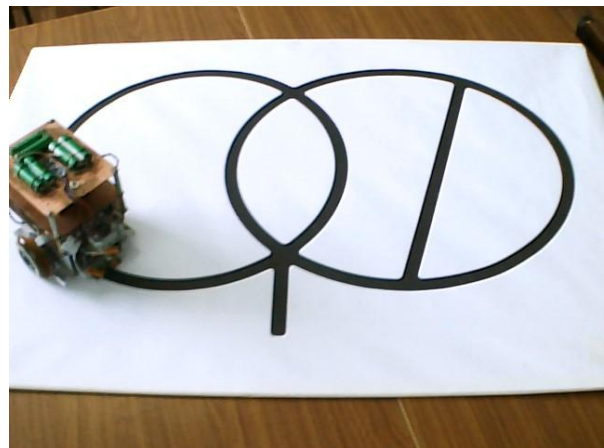


Рис. 5. Объект без маркеров

### Гомографическое преобразование

Согласно постановке задачи, камера наблюдает сцену не с фронтальных позиций. Однако, получить вид сверху возможно, применив к изображению гомографическое преобразование (синтетический поворот камеры).



В пакете MATLAB имеется необходимый набор инструментов для проведения этой операции.

Чтобы осуществить синтетический поворот, необходимо задать структуру преобразования, которая основывается минимум на 4 точках.

Зададим матрицу гомографии как

$$H_{\alpha} = m^T (M^T)^{-1}$$

где  $H_{\alpha}$  – матрица гомографии,  $m$  – координаты точки в системе координат изображения,  $M$  – координаты точки в мировой системе координат.

Результат преобразования представлен на рис. 4.

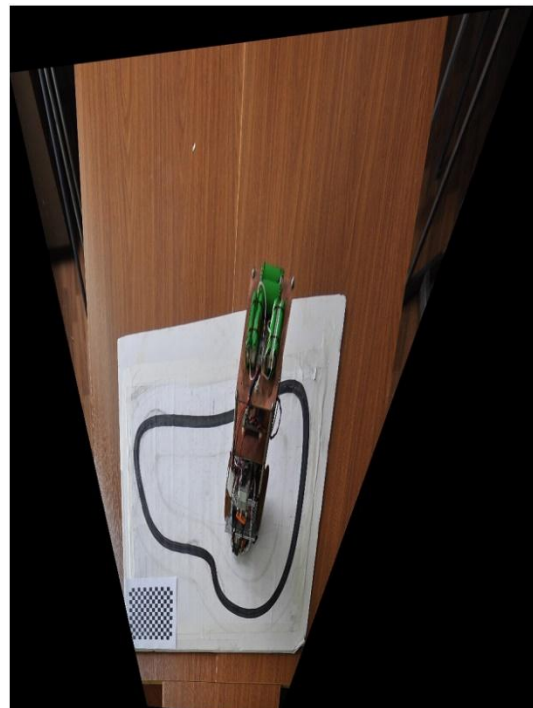
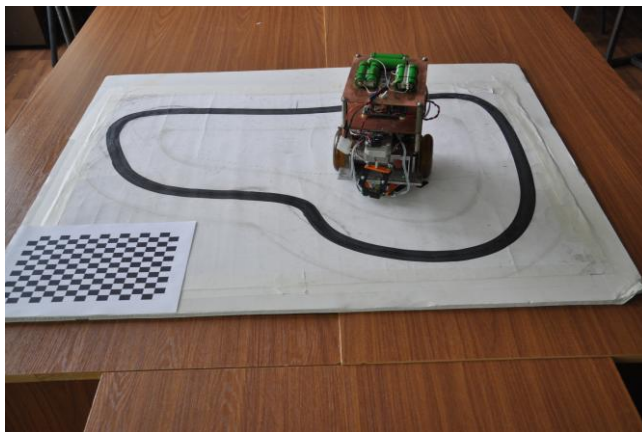


Рис. 6. Исходное и преобразованное изображение

Осуществление гомографического преобразования позволяет упростить задачу определения расстояния до объектов и направления движения платформы. Недостатком использования такого подхода является увеличение времени работы приложения.

#### **Определение направления движения мобильной платформы**

Так как для распознавания объекта была выбрана система маркировки, задача определения направления движения мобильной платформы сильно упрощается.

Для начала необходимо сделать замечание о том, что передвижение платформы кормой вперед система не предусматривает. Следовательно, задача определения направления движения превращается в задачу распознавания маркера передней части платформы на изображении, либо, если это не представляется возможным (маркер передней части не виден каме-

ре), в задачу логического определения движения. Например: распознали маркер задней части - робот движется в направлении «от камеры». Распознали несколько маркеров: правый и задний – робот движется «от камеры» налево. Когда распознал маркер только правой, либо только левой стороны появляется необходимость в распознавании маркера верхней части, по положению которого с легкостью можно определить направление движения робота.

#### **Выводы:**

Предложен метод разрешения коллизий типа «перекресток» и «тупик». Использование маркеров позволяет сократить время работы программы и достигнуть необходимой точности корреляционного поиска. Перспективное преобразование позволяет решить задачу определения расстояний. Корреляционный поиск «перекрестка» занимает 0.323 сек., а с выводом результата на экран занял 0.591 сек.

Формат выходных данных вектор-строка: <тип линии, направление, расстояние >, где

«тип линии» – 1 линия, 2 «перекресток», 3 «тупик»;

«направление» – 8 возможных направлений движения (вперед, назад, влево, вправо, вперед-вправо, вперед-влево, назад-вправо, назад-влево)

«расстояние» – длина прямой от центра платформы до линии в см.

#### **Список литературы**

[1] Конушин А. Геометрические свойства нескольких изображений //Компьютерная графика и мультимедиа. Вып. – 2006. – №. 4. – С. 3.

[2] Tsai R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // IEEE Int. Journal on Robotics and Automation. – 1987 – Vol. 3 – P. 323–344.

[3] Библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом. <https://opencv.org/> (дата обращения 01.03.2018)

[4] Журавель И.М. "Краткий курс теории обработки изображений" \ Image Processing Toolbox. <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/34.php> (дата обращения: 01.03.2018)

**Корлякова Мария Олеговна** – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

**Гришин Роман Игоревич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mr.grischinroman@yandex.ru

**Нестеренко Евгений Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: comecloseandlisten@gmail.com

Нгуен Ти Тхань, Ю.И. Мышляев, Д.С. Афанаскин

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С ИНТЕГРАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе рассматривается методика интегрального управления, предлагается подход, позволяющий повысить качество управления путем увеличения астатизма системы.

В Халил [1], интегральное управление позволяет достичь цель в условиях параметрической неопределенности, что объясняет популярность в промышленном применении ПИ- и ПИД-регуляторов. Методика адаптивного управления с неявной эталонной моделью (НЭМ) [2] А.Л. Фрадкова включает формирование информационного выхода в виде линейной комбинации выхода и его производных, обеспечивающего выполнение условия пассивируемости. Управление формируется в обратной связи по информационному выходу.

В работе приводится один из подходов к синтезу на основе интегрального управления. Представлен пример применения методики для синтеза алгоритма стабилизации для линейного объекта и результаты компьютерного моделирования.

### Постановка задачи

Рассматривается линейная модель объекта управления (ОУ) в регулярной форме.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T \in R^n$  – вектор состояния ОУ,  $u \in R^1$  – управление,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad b_n \neq 0.$$

**Целью управления (ЦУ)** является стабилизация траекторий системы (1)

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0} \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (2)$$

### Методика синтеза

**Этап 1.** Добавление интегратора к системе

С целью увеличения точности повысим астатизм системы и обеспечим гладкость релейного управления за счет добавления интегратора к системе. Тогда расширенная система (1) примет вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \sum_{i=1}^n a_{ni} x_i + b_n u, \\ \dot{u} = v, \end{cases} \quad (3)$$

где  $v$  – новый вход. Таким образом, управление определяется как интеграл от  $v$ . Относительная степень подсистемы (3) от нового входа  $v$  к  $x_1$   $\rho = n + 1$ . Рассмотрим задачу синтеза нового входа  $v$  на основе теории пассивификации.

### Этап 2. Введение информационного выхода

Введем новый информационный выход  $y_{\text{inf}}$  в виде комбинации от выхода  $x_1$  и его производных

$$y_{\text{inf}} = g(p)x_1, \quad (4)$$

где  $g(p) = p^{\rho-1} + g_{\rho-2}p^{\rho-2} + \dots + g_0$ ,  $\deg g(p) = \rho - 1$ ,  $g_i > 0$ ,  $i = \overline{1, \rho - 1}$ ,  $g(s)$

– гурвицевый многочлен,  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования.

$$y_{\text{inf}} = x_1^n + g_{(n-1)}x_1^{(n-1)} + \dots + g_0x_1 = \mu(\cdot) + b_n u, \text{ где } \mu(\cdot) = \sum_{j=1}^n (g_{j-1} + a_{nj})x_{1j}. \quad (5)$$

Очевидно, что из  $y_{\text{inf}} \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$  и гурвицевости многочлена  $g(s)$ , следует достижение ЦУ (2).

### Этап 3. Синтез управления

Выберем  $v$  в виде релейной функции от информационного выхода

$$v = -\gamma \text{sign } y_{\text{inf}}, \quad \gamma_v > 0. \quad (6)$$

Рассмотрим систему (3), (5), (6). Докажем, что  $y_{\text{inf}} \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , методом функций Ляпунова. Выберем кандидатуру на роль функции Ляпунова

$$Q_y(y_{\text{inf}}) = 0.5y_{\text{inf}}^2. \quad (7)$$

Производная по времени функции (7) в силу системы (3) с учетом (16)

$$\dot{Q}_y(y_{\text{inf}}) = y_{\text{inf}}(\dot{\mu}(\cdot) + \dot{x}_{22\text{virt}}) = y_{\text{inf}}(\dot{\mu}(\cdot) - \gamma_v \text{sign } y_{\text{inf}}) = y_{\text{inf}}\dot{\mu}(\cdot) - \gamma|y_{\text{inf}}|. \quad (8)$$

Выберем коэффициент  $\gamma$ , удовлетворяющий неравенству

$$\gamma \geq \|\dot{\mu}(\cdot)\| + \gamma_0, \text{ где } \gamma_0 > 0. \quad (9)$$

Получаем 
$$\dot{Q}_y(y_{\text{inf}}) \leq -\gamma_{v0}\sqrt{Q_y(y_{\text{inf}})}. \quad (10)$$

Интегрируя (10), получаем 
$$\sqrt{Q_y(y_{\text{inf}}(t))} \leq \sqrt{Q_y(y_{\text{inf}}(0))} - \frac{\gamma_0}{2}t.$$

Так как  $Q_y \geq 0$ , то существует момент времени  $t_*$ , такой, что  $Q_y = 0$  при  $t \geq t_*$ . Следовательно,  $y_{\text{inf}}(t) \equiv 0$  при  $t \geq t_*$ ,  $t_* \leq \frac{2}{\gamma_0}\sqrt{Q_y(0)}$ , и ЦУ (2)

достигается.

### Пример

Покажем применение предложенной методики для задачи стабилизации линейного объекта второго порядка. Система описывается системой линейных уравнений

$$\text{ОУ: } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b}u$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \end{pmatrix}.$$

Цель управления:  $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0}$  при  $t \rightarrow \infty$  и ограниченность  $x_2$ .

Информационный в форме (5)  $y_{\text{inf}} = (g_0 + a_{21})x_1 + (g_1 + a_{22})x_2 + b_2u$ , новый вход  $v = -\gamma \text{sign } y_{\text{inf}}$ , управление  $\dot{u} = v$ .

На рис. 1-3 приведены результаты моделирования при параметрах объекта управления  $a_{21} = 5$ ,  $a_{22} = -2$ ,  $b_2 = 2$ , начальных условиях  $x_{11}(0) = 2$ ,  $x_{12}(0) = 2$ , параметрах регулятора  $g_1 = 4$ ,  $g_0 = 6$ ,  $\gamma_v = 30$ .

Результаты моделирования системы представлены на рис. 1-3.

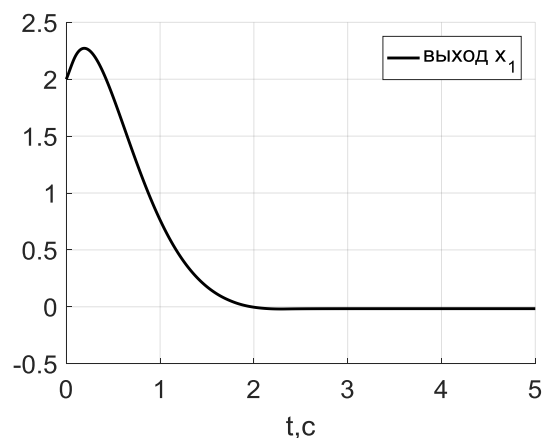


Рис. 1. Выход  $x_{11}$

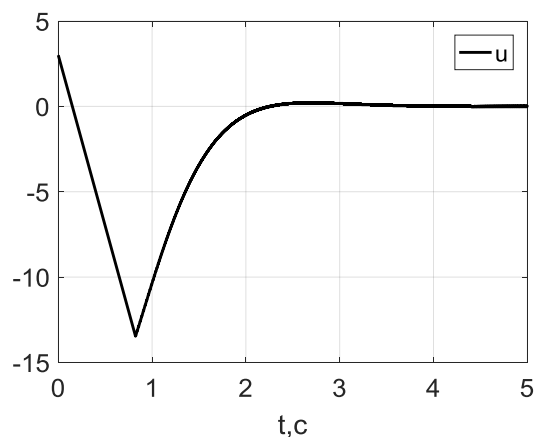


Рис. 2. Управление

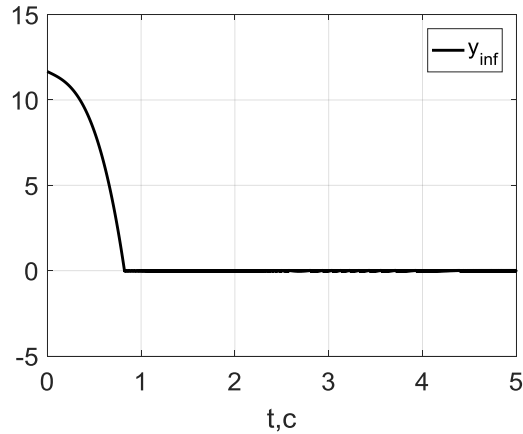


Рис. 3. Информационный выход

Из графиков 1 видно, что ЦУ (2) достигается. Из рис. 2 видно, что управление – ограничено. Из рис. 3 видно, что  $y_{inf}(t) \equiv 0$  за конечное время.

### Заключение

В работе представлена методика управления линейными объектами. Подробно описаны три этапа. Подтверждение достигается цели управления системой. Предложенная методика применена для решения задачи стабилизация. Представлено компьютерное моделирование системы управления, подтверждающее достижение заданной цели управления.

### Список литературы

- [1] Халил Х.К. Нелинейные системы. – М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2009.
- [2] Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков, Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации, Автомат. и телемех., 2006, выпуск 11, 3–37.
- [3] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2010.

**Нгуен Ти Тхань** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nct1101@gmail.com

**Мышляев Юрий Игоревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru

**Афанаскин Денис Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ad94@bk.ru

Д.Д. Величко, А.Д. Ливинская, А.И. Волков

## **ЭКСПЛИЦИТНАЯ ЦЕННОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ПРЕДПРИЯТИИ**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Традиционный подход предприятий к производству продукции в XXI веке становится неактуальным. Прогрессивные технологии затрагивают все сферы жизнедеятельности человека, не обходя стороной предприятия. Автоматизация и роботизация процессов производства дает как положительный эффект для компании, так и вызывает ряд негативных социальных проблем. Внедряя передовые разработки в процесс производства предприятие снижает себестоимость изготавливаемой продукции, улучшает ее качество, снижает процент брака, в том числе и неисправимого. Существующий тренд исследований искусственного интеллекта (ИИ) направлен по большей части на решение технологических задач. И для дальнейшего развития необходимо выделение определенных признаков ИИ и также проблем с которыми он может столкнуться.

Робототехника, которая сейчас используется на производствах существенно отличается от искусственного интеллекта. Их можно определить следующим образом: робототехника – это отрасль технологии, которая занимается роботами; роботы – это программируемые машины, которые обычно могут выполнять серию действий автономно или полуавтономно; ИИ – это алгоритмы, которые могут решать вопросы обучения, восприятия, решения проблем, понимания языка и / или логических рассуждений. Для более глубокого разграничения можно представить это в виде диаграммы Венна (рисунок 1) [1].

Роботы, запрограммированные на выполнение определенных функций, хоть и позволяют выполнять действия за более короткое время и с более высоким качеством, чем человек, но требуют высококвалифицированных специалистов и не застрахованы от ошибок. Чтобы робот выполнял новую операции, например, при запуске нового продукта, зачастую уходит много времени для написания кода, тестирования и отладки. Что неприемлемо, так как ведет к значительным издержкам на производстве.

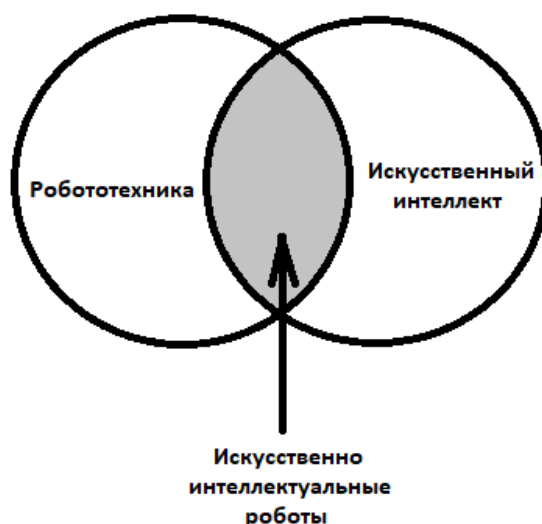


Рис. 1. Диаграмма Венна

Искусственно интеллектуальные роботы – это мост между робототехникой и искусственным интеллектом [2]. Это роботы, которые контролируются программами ИИ. Многие роботы не используют ИИ. До недавнего времени все промышленные роботы были запрограммированы только для проведения повторяющихся серий движений.

Развитие компьютерной техники, в частности программного обеспечения для нее, претерпевает большие изменения с приходом искусственного интеллекта (ИИ). Теперь компьютерная программа не просто выполняет последовательность действий, заложенных в памяти программистом, не смея отклоняться от нее, а запоминает все свои действия и на этой основе учится и самоорганизуется [3].

Можно выделить **основные трудности**, с которыми сталкивается ИИ на уровне теоретических знаний, базиса:

- Нет точного и конкретного определения искусственному интеллекту.
- Нет понимания, что же такое сам интеллект в любой его форме.
- И нет главного – фундаментальной теории ИИ.

Одним из первопроходцев внедрения такой технологии стал японец Макото Коике. Он создал систему, которая с помощью технологии машинного обучения TensorFlow от Google, сортирует огурцы на ферме. Нейросеть стала выполнять функции, которые раньше выполняли люди. Она использует BigData, делая фото с помощью камеры и отсылая их на многослойную сенсорную сеть на Linux сервере. Там эти данные анализируются и огурцы классифицируются по цвету, размеру и форме. Затем команда с результатом отсылается обратно системе. Она в свою очередь либо отбраковывает, либо сортирует огурцы, согласно поступившей программе. Такой подход позволил добиться точности в более чем 95%. Основную роль здесь играет количество исходных данных для обучения робота. Японец использовал всего 7000 фото для обучения машины, будь исходных данных в разы больше это бы позволило добиться почти безошибочной работы. Но в этом и вся суть искусственного интеллекта, он без какой-либо помощи человека за несколько дней работы повышает свой уровень точности практически до 100% [4].



Плюсы такой технологии в том, что чем больше данных поступает, тем точнее работает программа – она учится. Но также это сопряжено с риском неправильного развития ИИ, вследствие чего он может принимать качественную продукцию за брак. Такое развитие событий скажется убытками на предприятии, как финансовыми, так и ресурсными.

Компании в развитых странах активно начали использовать эту технологию. Но они сталкиваются с проблемой нехватки компетентных специалистов в этой области.

Для реализации такой технологии в производстве можно выделить **ряд правил:**

Во-первых, уровень компьютеризации, роботизации и коммуникаций на предприятии должен быть высоким, для принятия аналитических решений ИИ.

Во-вторых, доля сложных операционных процессов должна составлять большую часть технологического цикла производства продукции, иначе его внедрение нецелесообразно и затратно для предприятия.

В-третьих, штат должен включать профессиональных и компетентных специалистов, для обслуживания, программирования и отладки системы.

В рамках машиностроительных заводов технология может применяется для выявления различного рода дефектов, проверки качества, сортировки на конвейерных лентах и множестве других операций.

В российской практике данная технология еще не получила большого распространения. Это связано в первую очередь с немалой стоимостью внедрения и обслуживания такой системы, а также отсутствием профессиональных разработчиков нейросетей в России.

Таким образом, ИИ может стать новым вектором развития массового и серийного производства. Ставя перед руководителями, менеджерами и управленцами новые задачи по освоению технологии машинного обучения с перспективой повышения эффективности производства продукции и выводя их на инновационный путь развития.

### **Список литературы**

[1] Матвеев М.Г., *Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике*. Москва: Финансы и статистика, 2008, 448 с.

[2] Смолин Д.В., *Введение в искусственный интеллект: конспект лекций*. Москва: Физматлит, 2007, 264 с.

[3] Мастаченко В.Н., *Применение методов искусственного интеллекта в решении строительных задач*. Москва: УМЦ ЖДТ, 2007, 308 с.

[4] Адилов Р.М., *Системы искусственного интеллекта. Модуль 3. Системы машинного зрения: учебное пособие*. Пенза: ПГТА, 2008, 32 с.

**Величко Денис Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: denys97.velichko@mail.ru

**Ливинская Алина Дмитриевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: livinskaya.lina@yandex.ru

**Волков Андрей Иванович** – канд. экон. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vai@bmstu-kaluga.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1.

#### **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 3**

*Атрощенко В.Н., Короходкина К.Г.*

Анализ качества поверхностей перед нанесением  
износостойких покрытий..... 4

*Степанов Е.Д., Атрощенко В.Н.*

Анализ конструкции плунжерного насоса-регулятора ..... 6

*Лепченков А.В., Калмыков В.В.*

Анализ корреляционной связи между продольной  
и поперечной шероховатостями ..... 9

*Кузнецов И.В., Баринова Д.А.*

Влияние типа применяемого для осадки прессы  
на точность диаметральных размеров осаживаемых поковок ..... 11

*Ермачков Р.О., Антонюк Ф.И.*

Выбор оптимального способа наладки технологической системы  
для повышения точности осадки на гидравлическом прессе ..... 13

*Атрощенко В.Н., Короходкина К.Г., Степанов Е.Д.*

Загрузка оборудования в бережливом производстве ..... 16

*Яшкин К.В.*

Задача Коммивояжера в технологических операциях..... 19

*Карпов М.П.*

Исследование технологии изготовления деталей  
из паронита методом вырубки ..... 21

*Васильев Д.В.*

Кинематика резания металлов режущим инструментом ..... 24

*Журавлева Т.А., Крылов А.Ю., Ковалева Н.Л.*

Математические методы в управлении рисками деятельности  
производственного предприятия ..... 27

*Барков А.В., Зенкин Н.В.*

Моделирование упругих деформаций режущего инструмента ..... 30

*Смирнов О.О.*

Оценка точности измерения контактной разности потенциалов..... 33

*Мельников Я.С., Атрощенко В.Н.*

Перспективы технологического формирования местного  
угла профиля поверхности ..... 36

<i>Бурмистров А.А.</i> Планирование многофакторного эксперимента с целью исследования точности холодной осадки на гидравлическом прессе .....	39
<i>Барина Д.А., Кузнецов И.В.</i> Резервы повышения производительности фрезерных станков с ЧПУ .....	42
<i>Крюков М.В., Попков В.М.</i> Способы гибки проволоки.....	45
<i>Зудин С.В.</i> Сравнительная оценка усталостной прочности соединений с право-левой резьбой.....	47
<i>Кривов Р.Ю.</i> Факторы, влияющие на производительность электроэрозионной обработки .....	50
<i>Левин А.Д.</i> Факторы, оказывающие значительное влияние на выполнение разделительных операций методом лазерной резки и координатной штамповки .....	53
<i>Логутенкова Е.В.</i> Энергетическое состояние металлов.....	56
<b>СЕКЦИЯ 2.</b> <b>ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>58</b>
<i>Харченкова Е.А., Максимов Н.Н.</i> Анализ методов повышения эксплуатационных характеристик сварных точечных соединений жаропрочных сплавов .....	59
<i>Грибовский Е.И., Максимов Н.Н.</i> Анализ методов снижения эффекта шунтирования сварочного тока при контактной сварке.....	64
<i>Дымов А.В., Орлик Г.В., Орлик А.Г.</i> Выбор способа износостойкой наплавки реборды шнека .....	69
<i>Коростелкин А.С., Орлик Г.В., Орлик А.Г.</i> Исследование особенностей формирования структуры при сварке и ее влияние на межкристаллитную коррозию .....	74
<i>Чернова Т.Г., Кухто А.В.</i> Особенности изготовления тонкостенных изделий сложной геометрии из среднелегированных сталей .....	77
<i>Меньшиков В.С., Дубровский В.А., Амеличева А.Ю.</i> Применение электроконтактной наварки проволокой Св-08Г2С для восстановления цилиндрических поверхностей деталей.....	81

<i>Мельников Д.А., Булычев В.В., Ткачев Д.А.</i>	
Ремонтная сварка поверхностных дефектов чугунного литья .....	86
<i>Козлова М.С.</i>	
Современный подход к изготовлению сосудов высокого давления.....	89
<i>Денисов А.Е., Чернова Т.Г.</i>	
Способы заварки трещин в деталях из аустенитно-мартенситных сталей.....	91
<b>СЕКЦИЯ 3.</b>	
<b>ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....</b>	<b>96</b>
<i>Андреев В.В., Рыжов С.В.</i>	
Двухкаскадный операционный усилитель .....	97
<i>Максимов И.В., Андреев В.В.</i>	
Защита микросхем серии 1564 от воздействия статического электричества .....	101
<i>Жарова Н.С., Размахов И.В., Горбунов А.К.</i>	
Информационная скорость статистики.....	106
<i>Твердова С.М., Йе Еунт Ко Ко</i>	
Исследование теплопроводности спеченных керметных тел на основе порошковой смеси проводящего и диэлектрического материалов .....	109
<i>Шмаков А.Н., Андреев В.В.</i>	
Разработка кристалла полупроводникового фотоэлектрического приемника излучения с четырьмя фоточувствительными площадками.....	112
<i>Мазин А.В., Аунг Пьей Зон</i>	
Разработка физической модели устройства для измерения теплопроводности .....	117
<i>Прасицкий В.В., Чжо Зай</i>	
Способы повышения долговечности электродов для натриевых ламп высокого давления.....	120
<i>Тун Тун Лин</i>	
Тензор магнитной проницаемости ферритовых пленок с кристаллической структурой.....	123
<b>СЕКЦИЯ 4.</b>	
<b>ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ .....</b>	<b>128</b>
<i>Сафронова Я.А.</i>	
Анализ вибрационного состояния пакета рабочих лопаток последней ступени конденсационной турбины .....	129

<i>Шевелев Д.В., Матвеев А.С.</i> Анализ схем парогазовых установок на базе ГТУ и ПТУ отечественного производства с одноконтурным котлом-утилизатором .....	134
<i>Каретин А.А., Гридчин Н.В.</i> Верификация методики расчета ступени нагнетателя природного газа .....	138
<i>Юрик Е.А., Мусин Р.И.</i> Исследование вибрационных характеристик рабочего колеса паровой турбины .....	143
<i>Сидоров П.М., Шевелев Д.В.</i> Исследование работы ступени центробежного компрессора в CFD пакете FlowVision .....	149
<i>Юрик Е.А., Таганов Д.С.</i> Исследование способов борьбы с эрозионным износом рабочих лопаток паровой турбины.....	154
<i>Жинов А.А., Сидоров П.М.</i> Компоновка трубного пучка рекуператора ГТУ .....	157
<i>Киселев С.В., Сидоров А.А.</i> Модель экспериментальной решетки охлаждаемых профилей .....	160
<i>Ибрагимов С.В., Ильичев В.Ю.</i> Определение величины усилия, действующего на гребни лабиринтного уплотнения .....	169
<i>Завальный Ф.Г., Гридчин Н.В., Птахин А.В.</i> Оценка эффективности системы газоудаления.....	173
<i>Жинов А.А., Железнов А.П.</i> Применение нетрадиционного рабочего тела в геотермальных энергоустановках.....	179
<i>Хахалев И.С., Ильичев В.Ю.</i> Причины возникновения вибраций в турбогенераторах .....	183
<i>Карышев А.К., Малинкина М.А.</i> Расчетно -теоретический анализ эффективности контактной газопаровой турбины.....	187
<i>Голиков А.С.</i> Система упругой подвески экспериментальной лопатки в экспериментальной установке .....	192
<i>Жинов А.А., Иванов С.А.</i> Способы защиты последних ступеней паровых турбин от крупнодисперсной влаги.....	194

## **СЕКЦИЯ 5.**

### **КЛАСИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ .....**

198

*Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, Макаренков А.М.*

Активная компенсация случайности параметров  
систем автоматического управления.....

199

*Нгуен Ти Тхань, Афанаскин Д.С., Финошин А.В.*

Алгоритм интегрального управления в задаче слежения .....

203

*Мин Чжо Ту*

Алгоритм синтеза системы регулирования частоты вращения  
ротора энергетической турбины при случайных возмущениях .....

207

*Пью Чжо Кхаунг, Мышляев Ю.И.*

Алгоритм управления посадкой беспилотного летательного аппарата ....

212

*Корлякова М.О., Лохмачев Н.В., Трушков Д.С., Корлякова Е.Ю.*

Виртуальная среда для обучения алгоритма определения  
установки колес автомобиля .....

218

*Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, Макаренков А.М.*

Компенсация влияния переменного случайного параметра  
на точность работы электрогидравлического следящего привода .....

222

*Ливашов А.М, Краснощеченко В.И.*

Микропроцессорная система стабилизации выходного напряжения  
для объекта "генератор-двигатель" .....

227

*Величко Д.Д., Ливинская А.Д., Волков А.И.*

Особенности концепции «Бережливого производства»  
в рамках российских предприятий .....

231

*Хейн Хтет Аунг, Макаренков А.М.*

Повышение точности систем управления

за счет компенсации случайности их параметров .....

234

*Кузнецов Д.К.*

Построение замкнутой системы управления подвеской автомобиля.....

237

*Хейн Кхант Аунг, Корлякова М.О.*

Разработка интерфейса и методики формирования  
нейросетевых классификаторов.....

241

*Родин В.С., Корнюшин Ю.П.*

Синтез регулятора активной виброзащитной установки

методом минимизации функционала в частотной области .....

245

<i>Аунг Хейн Тху, Акименко Д.А.</i> Синтез управления на основе концепции обратных задач динамики электрогидравлическим приводом .....	249
<i>Кхант Аунг, Акименко Д.А.</i> Синтез управления электромеханическим объектом на основе концепции обратных задач динамики .....	254
<i>Корлякова М.О., Гришин Р.И., Нестеренко Е.С.</i> Система технического зрения для определения положения мобильного робота .....	258
<i>Нгуен Ти Тхань, Мышляев Ю.И., Афанаскин Д.С.</i> Стабилизация линейного объекта с интегральным управлением.....	263
<i>Величко Д.Д., Ливинская А.Д., Волков А.И.</i> Эксплицитная ценность искусственного интеллекта на предприятии.....	267
<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	270

**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 17.04.2018.  
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печ. л. 17,25. Усл. п. л. 16,04. Тираж 50 экз. Заказ № 29

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в Редакционно-издательском отделе  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87