

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Сборник научных трудов  
XI Международной научно-технической конференции  
«Современные проблемы машиностроения»

СПМ - 2017

**04–06 декабря 2017 г.**

Томск 2017

**УДК 621.002(063)**  
**ББК 34.4л0**  
**С568**

**Современные проблемы машиностроения:** сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» / под ред. А.К. Томилина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 103 с.

Сборник трудов конференции «Современные проблемы машиностроения» охватывает широкий спектр научных проблем. Объединяющим звеном представленных материалов является направленность докладов участников на обсуждение современных достижений науки в области высоких технологий и их практической реализации. В текстах обсуждаются проблемы обработки металлов и механики, особенностей создания и использования наноматериалов и материалов нового поколения, рассматриваются достижения машиностроения и особенности моделирование физических явлений.

Значительная часть представленных в сборнике материалов соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и направлена на решение научных и производственных задач, связанных с физикой и химией обработки материалов, оптическими и плазменными технологиями, а также необходимостью развития машиностроения и создания новых материалов.

**УДК 621.002(063)**  
**ББК 34.4л0**

*Редакционная коллегия*

А.К. Томили, доктор технических наук, профессор ТПУ.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2017  
© Обложка. Томский политехнический университет, 2017  
**С568**

# Оглавление

<b>ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА РЕМОНТА КОРПУСОВ МАШИН ИЗ СТАЛИ 20ХГСФЛ.....</b>	<b>5</b>
М.Р. Фаткуллин, А.М. Файрушин.....	5
<b>МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ.....</b>	<b>9</b>
С.И. Курнашов.....	9
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПОСОБ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ ДВУХОПОРНОГО СТЕРЖНЯ.....</b>	<b>12</b>
Ф.Ю. Кузнецов.....	12
<b>ЕМКОСТНОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>14</b>
<b>НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА.....</b>	<b>14</b>
А.И. Горшенина, А.И. Поморцев.....	14
<b>АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА.....</b>	<b>16</b>
С. А. Орлова.....	16
<b>ВОЛЬТОДОБАВОЧНОЕ УСТРОЙСТВО.....</b>	<b>19</b>
<b>ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА.....</b>	<b>19</b>
А.О. Копнов, И.В.Никитин.....	19
<b>ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ.....</b>	<b>25</b>
<b>СЕТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....</b>	<b>25</b>
П.В. Ворончихина, К.Д. Зюков.....	25
<b>ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО ШВА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СКЛОННОСТЬЮ К ОБРАЗОВАНИЮ СТРЕСС –</b>	
<b>КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН.....</b>	<b>29</b>
М. Н. Назарова, В. В. Понкратова.....	29
<b>РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОЗВЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>32</b>
П.Г. Михайлов, М. Златогорский, Ю. Клейменов, А. Веревка, А. Усачев.....	32
<b>ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ. ИНЖЕНЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....</b>	<b>36</b>
П.Г. Михайлов, М. Златогорский, Ю. Клейменов, А. Веревка, А. Усачев.....	36
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....</b>	<b>40</b>
В.Г.Коротков, Р.Ф.Сагитов, В.П.Попов, Е.У. Арыстаналиев, Л.Х. Галиева, З.Р. Ахмадиева, Е.А.Цыркаева.....	40
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 09Г2С В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ НА МЕТАЛЛ СВАРНОГО ШВА.....</b>	<b>50</b>
А. М. Файрушин, Д. В. Каретников, А. С. Романчук.....	50
<b>ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ.....</b>	<b>58</b>
Котыхова О. А., Трутнев Н. С., Самойлова А. С. ....	58
<b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	<b>64</b>
<b>ОТ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....</b>	<b>64</b>
А.С. Ложкин.....	64
<b>ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПРИ НЕКОНСЕРВАТИВНОЙ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛАХ.....</b>	<b>68</b>
В.Г. Кульков.....	68
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА КОМПОНЕНТА УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО КАСКАДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА.....</b>	<b>71</b>
Афанасьев В. Л., Карандей В. Ю., Сташ А. Н. ....	71
<b>СРЕДСТВА И УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.....</b>	<b>77</b>

Ткачев А.К., Майков Р.А. ....	77
<b>АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ ИНДУСТРИИ 4.0.....</b>	<b>84</b>
А. В. Гурьянов, Д.А. Заколдаев, А.В. Шукалов, И.О.Жаринов.....	84
<b>ВЛИЯНИЕ КОБАЛЬТА НА СМАЧИВАНИЕ ВОЛЬФРАМА И КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ОЛОВЯННО-МЕДНЫМИ ПРИПОЯМИ .....</b>	<b>86</b>
Озолин А. В., Соколов Е.Г.....	86
<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗБОЙКОВОГО СИЛОВОГО МЕХАНИЗМА .....</b>	<b>91</b>
Б.С. Алексеев .....	91
<b>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.....</b>	<b>93</b>
<b>ОБОРУДОВАНИЯ ОЧИСТНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗАБОЯ .....</b>	<b>93</b>
<b>НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОЕЕ .....</b>	<b>93</b>
В. Н. Панчехин.....	93
<b>ОЦЕНКА НДС МОДЕЛИ КАНАТНОГО ДЕМПФЕРА ОТ ДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК .....</b>	<b>96</b>
А.А. Вакуров, К.К. Манабаев .....	96

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА РЕМОНТА КОРПУСОВ МАШИН ИЗ СТАЛИ 20ХГСФЛ

М.Р. Фаткуллин, аспирант гр. А-1554-16-01, А.М. Файрушин, доцент, к.т.н Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
Тел. 89279600015  
E-mail: marat.fatkullin1@gmail.com

В настоящее время одной из наиболее важных проблем в развитии нефтяного машиностроения являются повышение работоспособности машин и аппаратов, а также экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов. При эксплуатации нефтегазопромыслового оборудования с течением времени часто происходит разрушение элементов по сварным соединениям вследствие воздействия температурных и силовых нагрузок, коррозии и других факторов.

Причину разрушений в сварных соединениях базовых деталей можно объяснить наличием в них структурной неоднородности и остаточных напряжений.

Одной из острых задач, касающихся повышения качества машин и агрегатов, является совершенствование технологии ремонта с применением электродуговой сварки. Электродуговая сварка на сегодняшний день является практически единственной применимой при ремонте нефтегазопромыслового оборудования, которые требуют сварочных операций. Высококонцентрированный источник тепловой энергии и различная деформационная способность деталей являются причиной возникновения значительных остаточных напряжений, которые приводят к искажению формы, потере прочности, снижению коррозионной стойкости металла, что негативно сказывается на работоспособности конструкции, что в конечном итоге может привести к появлению холодных трещин (рисунок 1).



Рис.1 Трещина в околошовной зоне сварного соединения корпуса насоса

Также одним из частых дефектов оборудования является выход из строя гидравлической части насосов. Сюда можно отнести трещины, промоины износы посадочных мест под седла клапанов, износ и промоины мест установки уплотнений (рисунок 2), что в свою очередь ведет к потере давления, утечкам.



Рис. 2. Места промоин на корпусе насоса

На текущий момент используется традиционная технология ремонта с помощью ручной дуговой сварки электродами типа УОНИ 13/55 с сопутствующим подогревом дефектного участка. Как показала практика, после ремонта гидрокоробки довольно быстро выходят из строя, трещины по зоне сплавления с основным металлом появлялись в первые месяцы после ремонта. Время работы отремонтированного узла составляет в среднем 300 - 400 часов.

В процессе сварки имеет место непрерывное охлаждение. С увеличением скорости охлаждения получаемая структура в зоне изотермического влияния охрупчивается, твёрдость её повышается. Если скорость охлаждения превышает критическую скорость, образование структур закалки неизбежно.

Закалённые структуры в сварных соединениях корпусов машин и аппаратов являются крайне нежелательными: отличаются высокой твёрдостью, хрупкостью, плохо обрабатываются, склонны к образованию трещин. Если скорость охлаждения ниже критической скорости, образование закалочных структур исключается. В зоне термического влияния наиболее желательными являются пластичные, хорошо обрабатываемые структуры типа перлита или сорбита. Поэтому получение качественных соединений непременно связано с достижением желаемых структур в основном регулированием скорости охлаждения.

Подогрев способствует перлитному превращению и является действенным средством исключения закалочных структур. Поэтому он служит в качестве предварительной термической обработки сварных соединений (нагрев до сварки и в процессе её). Меняя скорость охлаждения, можно получить желаемую твёрдость в зоне термического влияния.

Однако, существующая технология ремонта с подогревом ввиду сложности реализации не приводит к желаемому результату. В настоящее время существует огромное количество технологий сварки различных видов сталей, такие как: сварка без обработки, сварка с предварительным подогревом 250 °С, сварка с ультразвуковой обработкой (УЗО) в процессе и после сварки 25...27кГц, сварка с сопутствующим охлаждением, сварка с вибрационной обработкой 50 Гц, и как следствие, свойства сварного соединения различаются.

Использование вышеназванных технологий принималось исходя из следующих аргументов:

- в результате предварительного подогрева снижается уровень сварочных напряжений, улучшаются структура и свойства металла соединения (на сегодняшний день данная технология является общепринятой) [1];

- используя охлаждение во время сварки, мы имеем возможность измельчить зерно, повысить прочностные свойства и ударную вязкость в зоне термического влияния, уменьшить зону термического влияния;

- сварка с сопутствующей вибрационной обработкой позволяет: снижать уровень остаточных напряжений в металле сварного шва и зоне термического влияния; снижать неоднородность структуры металла шва и околошовной зоны; улучшать механические свойства металла шва; повышать выносливость материала сварного соединения; повышать коррозионную стойкость металла сварного соединения;

- ультразвуковая обработка оказывает комплексное воздействие на сварное соединение, снижая концентрации напряжений нагрузки в сварном соединении, создавая на обрабатываемой поверхности упрочняющий слой с повышенной сопротивляемостью к образованию трещин и т.д. [2].

Для того чтобы определить какая технология является наиболее предпочтительной, мы заваривали образцы по каждой из представленных технологии и провели ряд испытаний.

Испытание на растяжение проводилось на испытательной машине ИР 5113-100. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 6996.

С учетом того, что предел прочности основного металла стали 20ХГСФЛ не превышает 600 МПа, наиболее предпочтительной оказалась ультразвуковая обработка образцов. Ультразвуковая обработка позволяет повысить запас пластичности металла сварного шва в среднем на 12%, по сравнению с существующей технологией с предварительным подогревом. При этом предел прочности сварного шва соответственно снижается, однако при этом прочность сварного шва выше прочности основного металла.

Измерение твердости (по методу Виккерса) проводили с использованием видеомикроскопа «Axiovert - 100 A» с твердомерной приставкой «МНТ – 10» и системой анализа изображения «KS – 300». В процессе охлаждения в околошовной зоне сварного соединения образуется характерная мартенситная структура металла, пластичность стали снижается, образуется сложное напряженное состояние, обусловленное дополнительными сварочными напряжениями. Твердость шва и околошовной зоны увеличивается, что приводит к высокой вероятности образования холодных трещин.

Применение ультразвуковой обработки не позволяет снизить твердость, как в случае использования предварительного подогрева, и на первый взгляд ухудшает технологическую прочность шва. Однако мы видим в этом два положительных момента: чем тверже поверхность металла, тем выше её износостойкость к эрозионному разрушению; исключение операции подогрева позволят снизить объем зоны термического влияния, в том числе и хрупкой прослойки, образовавшейся в результате перегрева металла.

Для определения уровня остаточных сварочных напряжений был проведен рентгеноструктурный анализ образцов, который выполнялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН 4-07 с выводом дифракционных данных на персональный компьютер. Минимальный уровень остаточных напряжений в образце, выполненном с применением предварительного подогрева, составляет 163,2 МПа,

незначительно выше наблюдаются остаточные напряжения в образце с сопутствующей ультразвуковой обработкой – 186 МПа. В образцах, выполненных с применением вибрационной обработки, величина напряжений составляет 199,6 МПа. При остальных способах обработки величина внутренних напряжений превышает 200 МПа, что говорит о значительном уровне внутренних напряжений и высокой вероятности образования холодных трещин.

Опираясь на полученные данные, мы разрабатываем технологию сварки, которая заключается в комбинировании сопутствующего охлаждения и ультразвуковой обработки сварного шва.

Метод сопутствующего охлаждения находит применение с целью путём ускоренного охлаждения измельчить зерно, повысить прочностные свойства и ударную вязкость в зоне термического влияния. Сварное соединение в процессе сварки с обратной стороны дуги охлаждается водой или воздушной смесью, что способствует получению крутой ветви скорости охлаждения.

Ультразвуковая обработка для снятия остаточных механических напряжений относится к методу пластической деформации, но процесс проходит на ультразвуковой частоте. Ультразвуковая обработка проводилась технологическим комплексом «Шмель» (рисунок 3), который предназначен для упрочняющей обработки сварных соединений металлоконструкций методом поверхностного пластического деформирования материала на ультразвуковой частоте.



Рис.3. Технологический комплекс «Шмель»

Сущность данной технологии заключается в том, что происходит чередование ультразвуковой обработки и сопутствующего охлаждения (Рисунок 4). Первый шов (корневой) заваривается при помощи ручной дуговой сварки электродами типа УОНИ 13/55 с применением УЗО. Второй шов также заваривается при помощи РДС электродами типа УОНИ 13/55, но уже с сопутствующим охлаждением. Заварка последующих швов производится аналогично, путем чередования УЗО и охлаждения. Последний (облицовочный) шов заваривается при помощи РДС с применением УЗО.



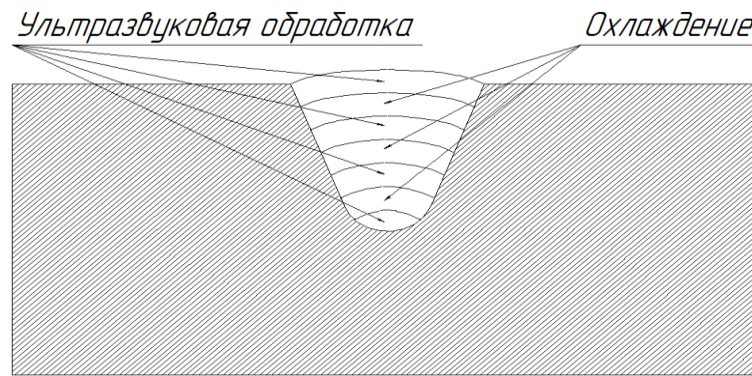


Рис. 4. Технология применения сопутствующего охлаждения и УЗО

Таким образом, разработанная нами технология сварки, которая заключается в комбинировании сопутствующего охлаждения и ультразвуковой обработки сварного шва позволяет значительно повысить производительность ремонтных работ, улучшить механические свойства сварного соединения и повысить коррозионную стойкость за счет снижения размера зоны термического влияния, снижения уровня сварочных напряжений в сварном шве, повышения прочностных свойств и ударной вязкости в зоне термического влияния.

#### Список литературы:

1. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений*: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
2. Эльдарханов А. С. *Процессы кристаллизации в поле упругих волн*. М.: СП Интербук, 1996. 256 с.

### МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

С.И. Курнашов, *студент гр. 2БМ74*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел. 8-999-618-89-89

E-mail: [kurnashov.sergey@gmail.com](mailto:kurnashov.sergey@gmail.com)

*Аннотация.* Рассматриваются методы постпечатной обработки изделий, полученных методом послойного наплавления полимерного материала. Проведено сравнение микрогеометрии образцов, обработанных различными методами.

*Ключевые слова:* 3D-печать, послойное наплавление, постобработка, микрогеометрия.

FDM (Fused deposition modeling) или послойное наплавление — одна из самых популярных технологий 3D-печати. Изготовление изделий основано на последовательном нанесении слоев полимерного материала [1]. Основным фактором ухудшающим внешний вид и снижающим характеристики прочности готового изделия, является ребристость внешних поверхностей из-за достаточно

низкого разрешения принтера, что приводит к возникновению поверхностных и подповерхностных трещин, а также повышенной шероховатости поверхности [2].

Таким образом, для моделей, изготовленным по технологии FDM, требуется постпечатная обработка. Наряду с требованиями к эстетике, немаловажным фактором в разработке методов сглаживания является прочность напечатанного изделия [3]. Монолитная внешняя оболочка делает изделия менее чувствительными к циклическим нагрузкам, предотвращает расслоение, снижает гигроскопичность.

Существующие методы постпечатной обработки изделий, полученных технологией послойного наплавления можно разделить на термические, химические и механические [4]. Для определения наиболее эффективного из них было проведено исследование, в ходе которого напечатанные образцы подвергались химическому травлению парами ацетона, термическому нагреву, шлифованию и заглаживанию «шпателем» в процессе нанесения слоев расплавленного полимерного материала. В качестве шпателя использовалось сопло Боуден-экструдера печатающей головки со специально разработанным конструктивным элементом. Образцы для исследований были получены технологией послойного наплавления из материала ABS [5], диаметр филамента 3 мм, диаметр сопла 0,2 мм, тип заполнения – Rectilinear 70%, принтер – UpBox+. Размеры образцов – 10x50x5 мм. Результаты проведенного опыта показаны на рисунке 1.

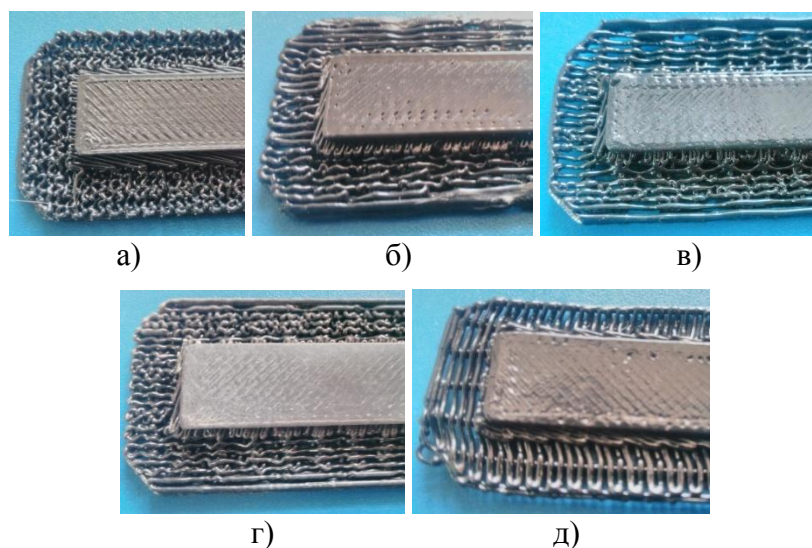


Рисунок 1 – Поверхности опытных образцов, получившиеся в результате постпечатной обработки: а) исходный образец; б) химическое травление; в) термообработка; г) шлифование; в) заглаживание шпателем

Для сравнения микрогеометрии поверхностей образцов, обработанных различными методами, использовался цифровой микроскоп 220xMicroView. Сравнивались снимки поверхностей краевых кромок при увеличении в 40 и 220 крат соответственно (рис. 2 и 3).

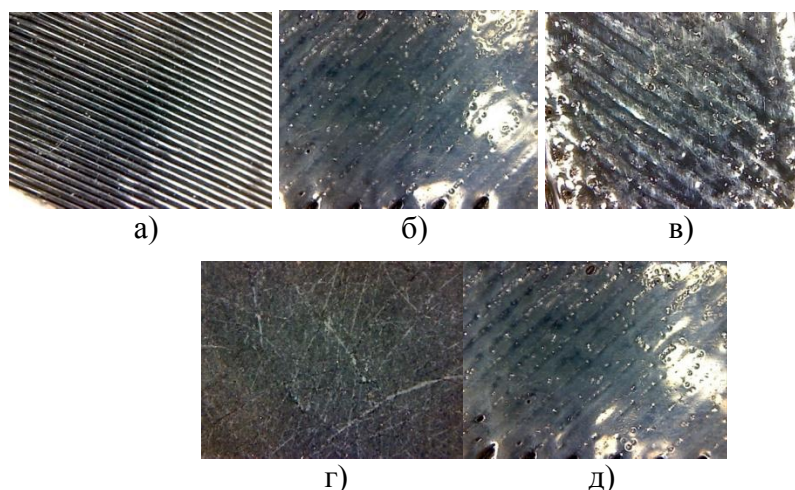


Рисунок 2 – Поверхности опытных образцов при 40-кратном увеличении: а) исходный образец; б) химическое травление; в) термообработка; г) шлифование; в) заглаживание шпателем

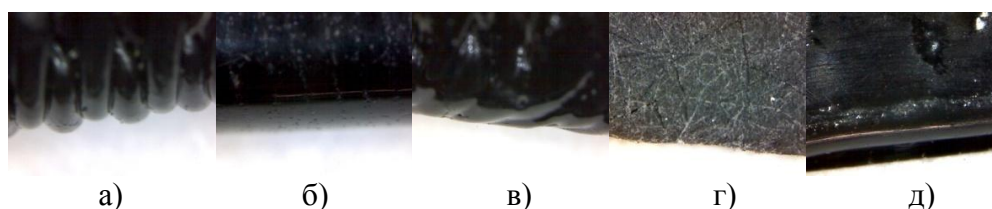


Рисунок 3 – Края поверхностей опытных образцов при 200-кратном увеличении: а) исходный образец; б) химическое травление; в) термообработка; г) шлифование; в) заглаживание шпателем

Анализ качества поверхности образцов, изготовленных из ABS-пластика при помощи технологии 3D-печати методом послойного наплавления, позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным способом постпечатной обработки является шлифование. Несмотря на это, использование данного метода для обработки деталей сложной геометрической формой является не всегда возможным. Термообработка не дает хороших результатов – регулировать нагревание поверхности достаточно сложно, а это приводит в итоге к вскипанию пластика, проседанию и выделению токсичных паров. Химическое воздействие парами ацетона может применяться для обработки изделий, но также имеет определенный недостаток, заключающийся в технологической сложности процесса, связанной с неконтролируемыми деформациями под действием химической агрессивной среды, приводящей к потере формы. В свете этих факторов механическое заглаживание является наиболее перспективным способом постпечатной обработки. Применение шпателя, как конструктивного элемента сопла печатающей головки позволит повысить качество поверхности детали на стадии ее изготовления в результате непосредственного сглаживания только что нанесенных слоев нити расплавленного ABS-пластика.

#### Список литературы:

1. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

2. The Hybrid Effective Modules of Viscoelastic Composites [Electronic resource] / A. A. Svetashkov [et al.] // Key Engineering Materials : Scientific Journal. — 2017. — Vol. 743 : High Technology: Research and Applications (HTRA 2016). — [P. 217-222]. — Title screen. — Доступ по договору с организацией – держателем ресурса. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.743.21>

3. Modification of polymeric materials for 3D printing of external panels of nanosatellites [Electronic resource] / D. Isaeva [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 102 : Space Engineering. — [01022, 5 p.]. — Title screen. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201710201022http://earchive.tpu.ru/handle/11683/37970>

4. Обработка распечатанных 3D-моделей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://3dtoday.ru/wiki/processing\\_models/](http://3dtoday.ru/wiki/processing_models/) (дата обращения 10.04.2017).

5. Материалы для 3D-печати: АБС-пластик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.foroffice.ru/articles/73602/> (дата обращения: 10.04.2017).

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПОСОБ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ ДВУХОПОРНОГО СТЕРЖНЯ

Ф.Ю. Кузнецов, аспирант гр. А7-24

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г.Томск, пр.Ленина,30,  
Тел. 8-961-886-6664  
E-mail: kuznetsov\_f@mail.ru*

Вибрационные процессы в технике играют как позитивную, так и негативную роль. В связи с этим возникает проблема адекватного теоретического и экспериментального исследования вибраций конкретных механизмов [1,2,3].

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование метода электромагнитной вибродиагностики, позволяющего определить набор собственных поперечных колебаний двухопорного стержня (рис. 1).

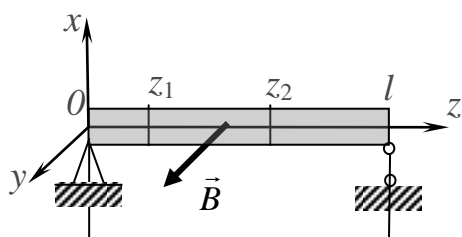


Рис. 1 – Двухопорный стержень в магнитном поле

Такой моделью представляются разнообразные конструкции, применяемые в технике. Для экспериментального определения собственных частот колебаний конструкций обычно

используются пьезоэлектрические вибродатчики. Частоты вибраций измеряются в одной точке. При этом невозможно определить весь спектр частот системы с распределенными парам

В монографии [4] получено дифференциальное уравнение поперечных колебаний электропроводного стержня, находящегося во внешнем магнитном поле:

$$EJ \left( \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \beta^* \frac{\partial^5 u}{\partial z^4 \partial t} \right) + m_0 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \frac{\sigma B^2 A}{l} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial u}{\partial t} dz = 0 \quad (1)$$

Здесь  $u(z, t)$  - динамическая функция смещений, зависящая от продольной координаты и времени;  $EJ$  - изгибная жесткость стержня;  $\beta$  - коэффициент внешнего демпфирования, зависящий от свойств окружающей среды;  $\beta^*$  - демпфирующий коэффициент, зависящий от свойств материала стержня;  $m_0$  - погонная масса стержня;  $\sigma$  - проводимость материала стержня;  $B$  - магнитная индукция внешнего магнитного поля, действующего на участке  $\Delta z = z_2 - z_1$ ;  $l$  - длина стержня;  $A$  - площадь поперечного сечения стержня. Последний член в уравнении (1) соответствует электромагнитной силе.

Дифференциальное уравнение в частных производных (1) с помощью процедуры Фурье сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\ddot{q}_r + (\beta + \beta^* p_r^2) \dot{q}_r + p_r^2 q_r = -\mathbf{St} \frac{\gamma_r}{\alpha_r Y_r^*} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma_n}{\alpha_n} \dot{q}_n, \quad (2)$$

где  $q_r$  - обобщенные координаты системы, и введены обозначения:

$$X_r = \sin \frac{rp}{l} z \text{ - собственные амплитудные функции двухопорного стержня;}$$

$$\gamma_r = \alpha_r \int_{z_1}^{z_2} X_r dz; \gamma_n = \alpha_n \int_{z_1}^{z_2} X_n dz; Y_r^* = \int_0^l X_r^2 dz; \alpha_r^4 = \frac{p_r^2 m_0}{EJ}; \mathbf{St} = \frac{\sigma B^2}{\rho p_1}$$

характеризующее отношение магнитной силы к силе инерции.

В результате анализа системы дифференциальных уравнений (2) определены собственные частоты  $\omega_n$  и собственные амплитудные формы  $X_n(z)$  вибраций стержня с учетом граничных условий. При этом показано, что всегда имеются группы колебаний, не подвергающиеся электромагнитному воздействию – изолированные колебания. Набор изолированных колебаний зависит от ширины и расположения участка, в пределах которого действует магнитное поле (активный участок).

В монографии [4] предложен электромагнитный способ частотного анализа колебаний проводящих механических систем. Его суть состоит в следующем: в электрическую цепь, замыкающую концы стержня, включается анализатор электрических сигналов. При поперечных колебаниях стержня в магнитном поле, в нем индуцируется переменный электрический ток с набором частот, соответствующим неизолированным собственным частотам вибрации стержня.

Ширина и расположение активного участка выбирается в зависимости от набора частот, которые требуется определить. Факторы затухания, с учетом внутреннего демпфирования, являются частотно зависимыми:

$$\tilde{h}_r = \frac{1}{2} \left( \beta + \beta^* r^2 + \mathbf{St} \frac{\gamma_r^2}{\alpha_r^2 Y_r^*} \right), \quad (r = 1, 2, \dots). \quad (3)$$

Частота реальной системы находится по формуле:

$$p_r^* = \sqrt{p_r^2 - \frac{(\beta + \beta^* p_r^2)^2}{4}}, \quad (r = 1, 2, \dots). \quad (4)$$

Предложенный способ позволяет одновременно определять требуемую группу собственных частот. На основе изложенной теории можно сконструировать новый тип вибродатчика, который удобно применять при исследовании вибраций конструкций, находящихся во внешних магнитных полях.

#### **Список литературы:**

1. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. – Москва: Инфра-Инженерия, 2010 – 176с.
2. Томилин А.К., Байзакова Г.А. Управление частотами колебаний упругих электромеханических систем. «Вестник Томского государственного университета. Математика и механика», 2012. – № 3(19).– С. 87-92.
3. Томилин А.К., Байзакова Г.А. Электромагнитный способ подстройки частоты вибрметра. «Изв. вузов. Физика», 2012.– № 6/2.– С. 244-247.
4. Томилин А.К. Колебания электромеханических систем с распределенными параметрами. – Усть-Каменогорск, 2004 – 286сю

### **ЕМКОСТНОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

*А.И. Горшенина, А.И. Поморцев, студенты гр. 5Г4Б ИШЭ  
(НИ ТПУ) г. Томск*

Научные руководители: С.Н. Кладиев – канд. техн. наук, доцент.

В наше время аккумуляторные технологии значительно шагнули вперёд, если сравнивать с прошлым десятилетием. Но все равно аккумуляторные батареи приходится часто менять, так как они имеют небольшой ресурс. Идея использовать конденсатор вместо аккумуляторной батареи пришла давно, проводились эксперименты с электрическими конденсаторами. Электрические конденсаторы обладают значительной ёмкостью, но её не хватает для длительного питания нагрузки, при этом имеет место значительный ток утечки, обусловленный особенностями конструкции, а также наличие эквивалентной последовательной индуктивности (*ESL*), и сопротивления (*ESR*). Технологии развиваются, и, как следствие, был изобретен ионистор – конденсатор, который имеет сверхбольшую ёмкость – от единиц, до десятков тысяч фарад. Ионисторы с ёмкостью единицы фарад используются в портативной электронике, для обеспечения бесперебойного питания слаботочных цепей, например, микроконтроллеров. Ионисторы с большой ёмкостью используются в паре с аккумуляторными батареями для питания электродвигателей. В таком случае ионистор уменьшает нагрузку на аккумуляторные батареи, что значительно повышает срок эксплуатации и одновременно увеличивает пусковой ток, который способна выдать эта установка.

Места, где могут использоваться ионисторы, практически безграничны. В радиотехнике они применяются как кратковременные и комбинированные источники тока: в вычислительной, звуковой и видеотехнике, мобильных телефонах, в аппаратуре проводной связи, в медицинских и бытовых электроприборах, в часах, электронных играх, в ксеноновых вспышках

фотоаппаратов. Широкое распространение они получили в компьютерах, где используются, в качестве источников питания для модулей памяти. Характеристики суперконденсаторов делают их незаменимыми устройствами в качестве накопителей энергии, например, в качестве источников бесперебойного питания, звеньев силовых импульсных устройств и в иных приборах, где возникает потребность быстродействующего источника энергии.

### *Разрядное устройство*

Схема РУ на базе непосредственного преобразователя постоянного напряжения повышающего типа приведена на рис. 1. В рассматриваемой схеме транзистор не может постоянно находиться в любом из двух крайних состояний- все время включен или все время выключен. Длительный режим открытого состояния транзистора соответствует режиму которого замыкания источника питания.

В установившемся режиме работы на интервале открытого состояния транзистора Т, который задается управляющим напряжением  $U_y$ , дроссель L подключен к источнику питания, диод VD закрыт под действием.

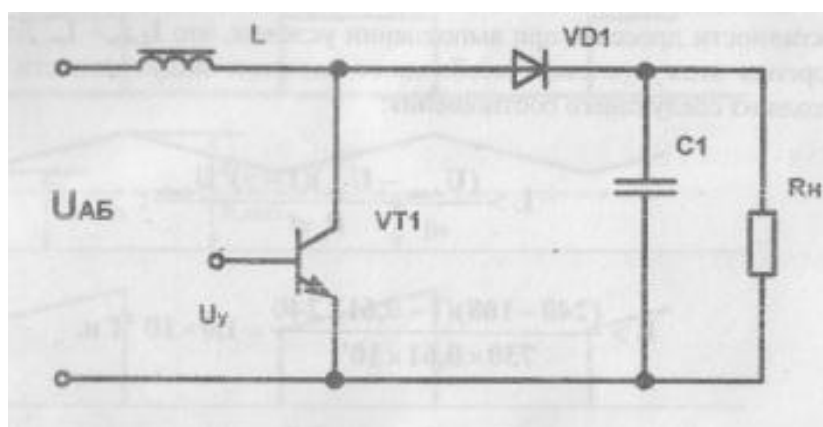


Рис.1. Зарядное устройство

Нужный заряд аккумуляторной батареи есть один из наиболее значимых условий, позволяющих обеспечить длительный срок их службы. Важно верно разработать зарядное устройство, чтобы обеспечить оптимальный режим заряда батареи для восстановления номинальной емкости, определяющей количество электричества, которое может отдать полностью заряженный аккумулятор. Заряд аккумуляторной батареи осуществляется в две ступени. На начальной ступени рекомендуется заряжать аккумулятор неизменным по значению током  $I < 0,25C$ . Цепь этого аккумулятора получает основную часть энергии, в пределах 95 %. Зарядка аккумулятора на конечной ступени происходит при стабильном напряжении. Этот режим обычно называют режимом подзаряда и используют для компенсации уменьшения емкости аккумулятора, вызванной токами саморазряда.



На рис. 2 показана функциональная схема зарядного устройства, силовая цепь которого произведена на базе непосредственного преобразователя постоянного напряжения НПН понижающего типа. Регулирование выходного напряжения в нем осуществляется за счет изменения длительности у открытого состояния силового транзистора при использовании широтно-импульсного регулирования.

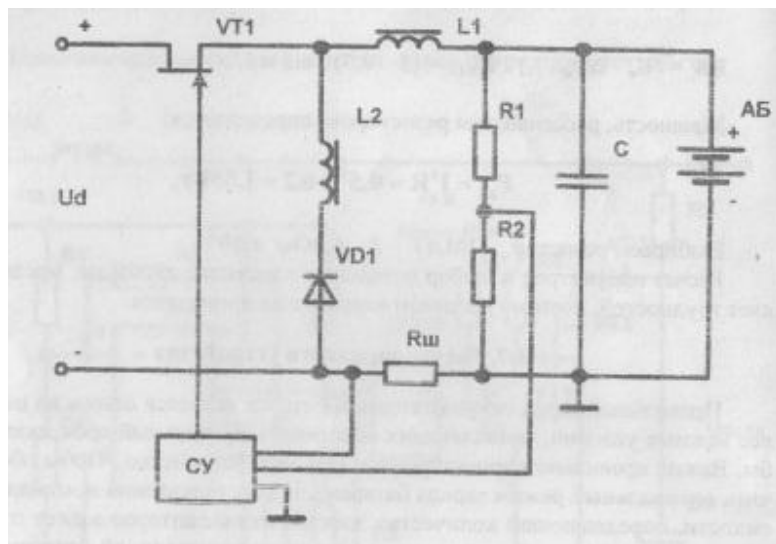


Рис.2. Функциональная схема зарядного устройства.

#### Список литературы:

1. Википедия [Электронный ресурс]: Ионистор  
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Ионистор> – Ионистор (дата обращения: 10.11.2017).  
Режим доступа – свободный.
2. Суперконденсаторы и их применение в блоках рекуперации энергии в производстве современных лифтов // Электронный научно-практический журнал: Современные научные исследования и инновации [Электронный ресурс]:  
<http://web.snauka.ru/issues/2015/06/54602> (дата обращения: 10.11.2017). Режим доступа – свободный.

### АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

*С. А. Орлова, студент гр. 5Г5Б  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г.Томск, пр.Ленина,30,  
Тел. 8-913-880-0403  
E-mail: sveta\_orlova\_1998@mail.ru*



Станки для обработки металла занимают важное место в современном машиностроении, бурно развивающемся в течение всего XX века. Их основным предназначением является размерная обработка заготовок. При этом по характеру обработки станки подразделяются на токарные, фрезерные, шлифовальные, сверлильные и др. В данной работе речь рассматривается электропривод главного движения круглошлифовального станка, предназначенного для обработки деталей типа тел вращения.

Известно, что наиболее оптимальный режим обработки детали возможно получить при плавном и непрерывном (бесступечатом) регулировании скорости главного движения инструмента станка [1]. Подобный режим возможно осуществить путем применения регулируемого электропривода. Одним из наиболее распространенных типов электродвигателей, применяющихся в металлорежущих станках, является асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Регулирование скорости АД производится с помощью преобразователя частоты (ПЧ) – устройства силовой электроники, позволяющего изменять подводимое к статору двигателя напряжение. Применение ПЧ также обеспечивает уменьшение пусковых токов двигателя и плавный разгон и торможение за необходимое время.

При работе станка важно, чтобы при изменении нагрузки скорость приводного двигателя оставалась практически неизменной. Это позволит сохранить скорость шлифования, определяющую стойкость шлифовального круга. Обеспечить подобную «жесткую» механическую характеристику электропривода возможно при организации векторного управления АД [2,3]. Подобный тип управления двигателем переменного тока схож с системой регулирования скорости двигателя постоянного тока, позволяет сохранять постоянство момента на низких скоростях вращения, а применение замкнутого контура регулирования частоты вращения двигателя с ПИ-регулятором обеспечивает нулевую ошибку регулирования при изменении нагрузки.

Структурная схема системы векторного управления асинхронным электродвигателем представлена на рис. 1. Система управления включает в себя входной фильтр (ВХ.Ф.) для уменьшения перерегулирования по скорости двигателя, пропорционально-интегральные регуляторы скорости (ПИ-РС), потокосцепления ротора (ПИ-РП), тока статора (ПИ-РТ), упрощенный до апериодического звена автономный инвертор напряжения (АИН), входящий в состав преобразователя частоты, прямой (ПКП) и обратный (ОКП) координатные преобразователи для согласования системы управления с двигателем, вычислитель потокосцепления (ВП) и асинхронный двигатель (АД).

Регулирование осуществляется по двум главным переменным (внешние контуры скорости и потокосцепления ротора двигателя) и двум внутренним – проекциям вектора тока статора АД на оси вращающейся системы координат.

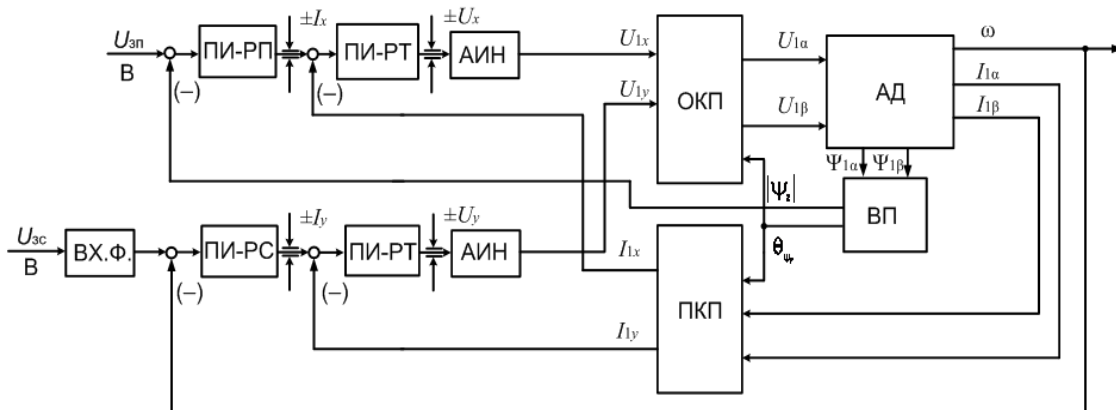


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления

На рис. 2 представлены результаты моделирования работы векторной системы управления двигателем типа АИР225М2 с номинальными мощностью  $P_{2н}=55$  кВт и скоростью вращения  $n_n=2940$  об/мин в составе привода главного движения шлифовального станка типа 3Е756.

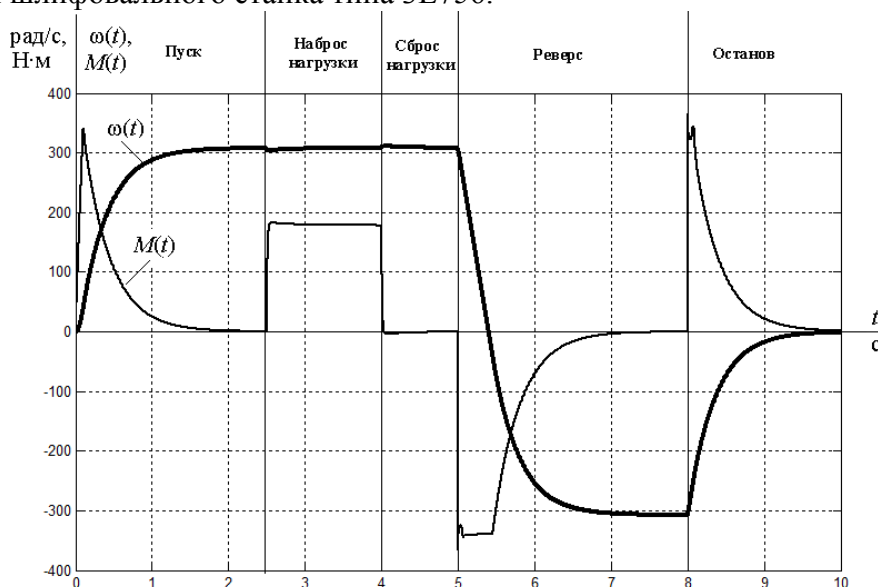


Рис. 2. Результаты моделирования работы векторной системы управления

Из полученных графиков видно, что при изменении нагрузки на валу двигателя скорость принимает заданное изначально значение, что очень важно при обработке станком металла.

**Список литературы:**

1. Галашев В.А. Станки для обработки материалов резанием. Краткий конспект обзорных лекций / УдГУ. Ижевск: 2001. с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

## ВОЛЬТОДОБАВОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

*А.О. Копнов, И.В. Никитин студенты гр. 5Г4Б*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г.Томск, пр.Ленина,30,  
Тел. 8-962-782-1851*

E-mail: chisamba188@mail.ru / aokopnov96@gmail.com

*Научный руководитель: С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент кафедры  
ЭПЭО ИШЭ ТПУ*

**Актуальность.** Для современного производства актуален вопрос улучшения технико-экономических показателей статических преобразовательных устройств, предназначенных для преобразования энергии постоянного тока одного напряжения в энергию постоянного тока другого напряжения [1].

В горнодобывающей промышленности для повышения безопасности и производительности труда используют огромное количество электрического оборудования и машин. Особенностью данной промышленности является использование электрических машин и оборудования на удалении от источника питания, вследствие этого может происходить опасное снижение питающего напряжения.

На сегодняшний день актуальна задача по созданию устройства, компенсирующего просадку напряжения, путем добавления необходимого количества «недостающих вольт». Пример такого устройства будет рассмотрен в данном докладе.

**Вольтодобавочное устройство.** Для перевозки материалов и работников в горизонтальных горных выработках, безопасных по взрыву угольной пыли используют специальную технику. Например, контактный напеченный локомотив TLP90F, представленный на рисунке 1. Данный локомотив передвигается по рельсовому пути и приводится в движение двумя асинхронными электродвигателями суммарной мощностью 110 кВт (2×55 кВт). Основные технические характеристики данного локомотива представлены в таблице 1. [2]

Таблица 1. Технические характеристики локомотива TLP90F

Мощность	110 кВт (2×55 кВт)
Максимальное тяговое усилие	40 кН
Скорость	0-20 км/ч
Ширина колеи	750-900 мм
Общая масса	14,5 т
Максимальный угол наклона пути	50 %

При работе транспорта в глубине шахты или рудника, он удаляется от источника питания постоянного тока 250В на несколько километров, что приводит к просадке напряжения. В случае просадки напряжения на 30% от номинального значения напряжения, то есть напряжение в этом случае будет составлять всего 175В, локомотив с полностью нагруженным составом не сможет тронуться, так как момент частотно-управляемого асинхронного двигателя будет много меньше пускового – это подкрепляется общеизвестным правилом, что электромагнитный момент тягового асинхронного двигателя прямо пропорционален

квадрату напряжения питания. В данном случае возникает необходимость увеличить пониженное напряжение питания с целью частотного пуска тягового асинхронного электродвигателя при максимальной нагрузке. Для решения этой задачи, можно применить вольтодобавочные устройства.



Рис. 1. Подземный локомотив TLP90F с троллейным токосъемом

**Вольтодобавочное устройство.** В общем случае вольтодобавочное устройство – это силовое преобразовательное устройство, включаемое последовательно с нагрузкой и создающее добавочное напряжение, складывающееся с напряжением основного источника питания, в случае его просадки, или вычитаемое из него, при его возрастании в процессе рекуперации энергии торможения. Наиболее просто, экономично и доступно это осуществляется с помощью двухобмоточного трансформатора, первичная обмотка которого питается от высокочастотного инвертора. Вторичная обмотка трансформатора подключается последовательно с нагрузкой через высокочастотный выпрямитель. С помощью этого трансформатора можно повысить или понизить напряжение на нагрузке на величину  $\pm \Delta U_{\text{доб}}$ . Другими словами, необходимая величина вольтодобавочного устройства определяется величиной напряжения вторичной обмотки обычного понижающего трансформатора.

Особенностью схемы вольтодобавочного устройства является наличие шунтирующего ключа. После того, как устройство произведет добавку напряжения, необходимого для создания момента трогания локомотива, и состав начнет свое движение, вольтодобавочное устройство необходимо шунтировать, дабы избежать нагревания силовых ключей обратным током рекуперации при торможении локомотива.

Обобщенная схема повышающего преобразователя для компенсации отклонения напряжения контактной сети для облегчения пуска локомотива TLP90F с полностью загруженным составом представлена на рисунке 2.

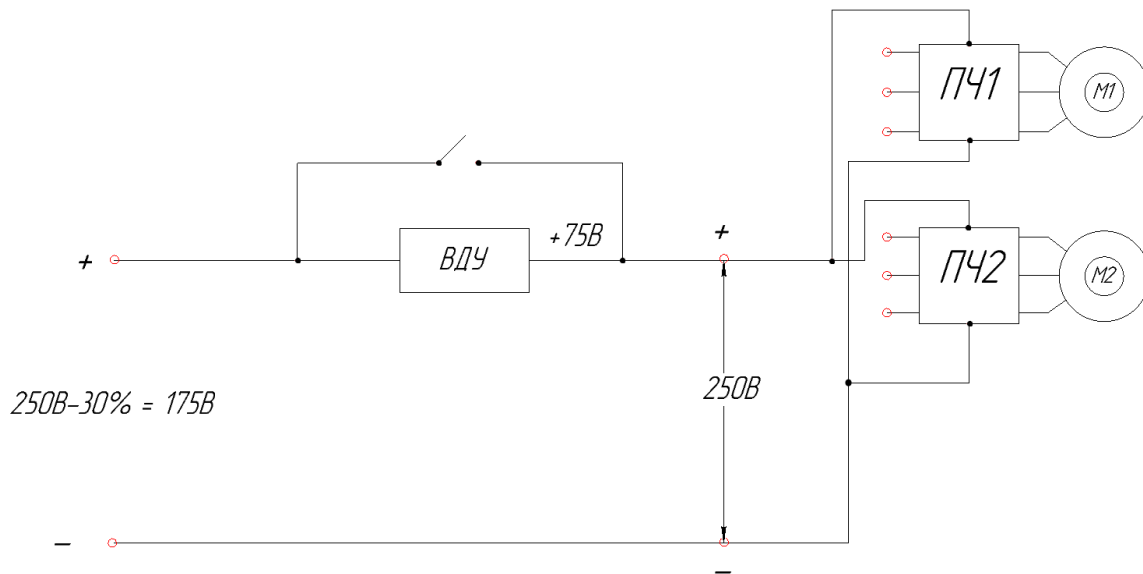


Рис. 2. Обобщенная схема повышающего преобразователя для компенсации отклонения напряжения контактной сети: ВДУ – вольтодобавочное устройство; ПЧ1 и ПЧ2 – преобразователь частоты 1 и 2; М1 и М2 – тяговый трехфазный асинхронный электродвигатель

**Расчет вольтодобавочного устройства.** Чтобы получить дополнительные 75В в троллейной линии постоянного тока необходимо разработать принципиальную схему повышающего силового преобразователя и выбрать ее элементы. На рис. 3 представлена принципиальная электрическая схема вольтодобавочного устройства. Данный преобразователь постоянного тока состоит из высокочастотного инвертора, выполненного по однофазной мостовой схеме, высокочастотного трансформатора и высокочастотного однофазного мостового неуправляемого выпрямителя. Отметим, что их частота  $f = 48\text{кГц}$ .

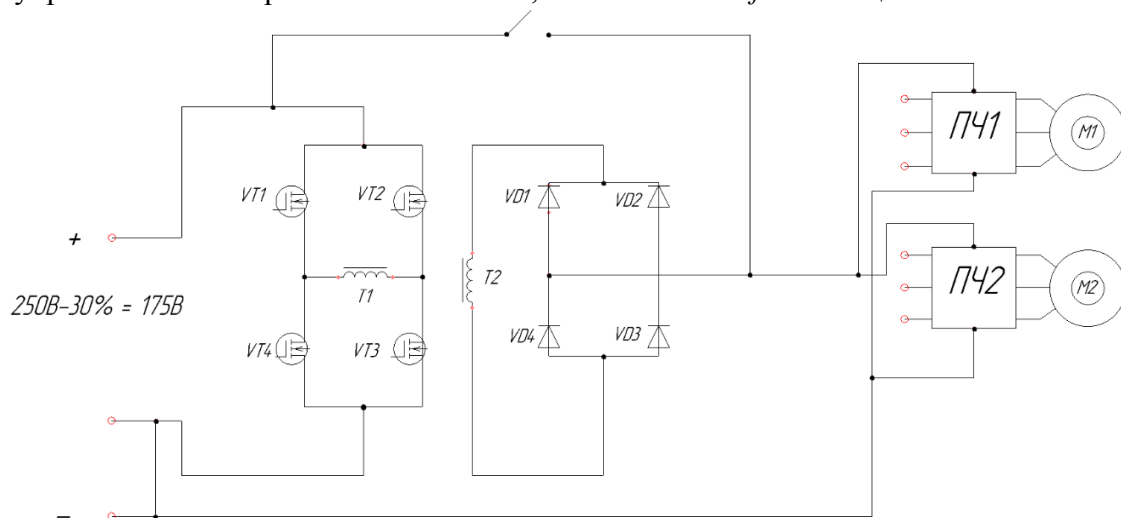


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема вольтодобавки

Так как выходная мощность последовательно включенного с нагрузкой преобразователя требуется порядка 33кВт, и его ток, имеет, значение 440А, следовательно, сечение обмоток согласующего высокочастотного трансформатора получается достаточно большим, и физически выполнить обмотку трансформатора с необходимым количеством витков при доступном размере магнитопровода не представляется возможным. Кроме того необходимо решить вопрос охлаждения полупроводниковых приборов при прохождении через них номинального тока в прямом направлении (от сети к исполнительным тяговым двигателям). При этом размеры охладителей будут достаточно большими.

Поэтому принято решение разбить силовую часть нашего преобразователя на параллельно включенные модули, каждый из которых имеет общий охладитель с размещенными на нем ключами высокочастотного инвертора, выпрямителя и согласующий трансформатор. Предварительный расчет показывает, что количество модулей преобразователя должно быть не менее двенадцати, тогда мощность каждого параллельно включенного модуля составит 2750Вт.

Также необходимо сказать, что решение разбить устройство на 12 модулей, позволяет снизить пульсации напряжения и получить равномерное распределение напряжения постоянного тока.

Схема блочного устройства с вольтодобавкой представлена на рис.4.

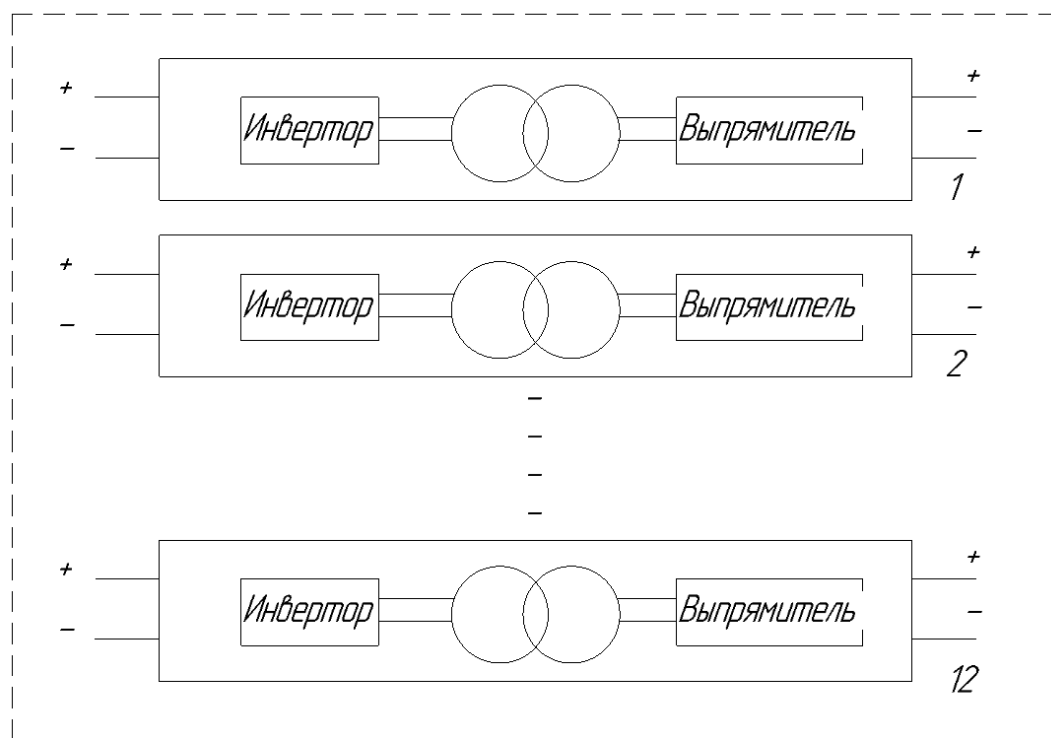


Рис. 4. Схема устройства вольтодобавки с 12 параллельными модулями

**Расчет одного модуля устройства последовательной вольтодобавки.** В результате расчета одного модуля, получаются следующие параметры вольтодобавочного устройства:

Высокочастотный трансформатор изготавливается из магнитопровода ГМ 503А ОЛ28/45-10, кольцевой из аморфного железа, коэффициент трансформации

которого  $K_{тр} = 2,3$ , имеет вид представленный на рисунке 5. Ток, протекающий в первичной обмотке  $I_1 = 15,7\text{A}$ , при этом число витков первичной обмотки – 6. Диаметр провода первичной обмотки в таком случае  $d_{пр1} = 2,55\text{мм}$ , однако диаметр провода не должен превышать 1мм, поэтому используем провод ПЭВТЛ диаметром  $d_{пр1*} = 0,8\text{мм}$  и скручиваем в литцендрат из 4 проводников, а площадь сечения в этом случае  $S_{M1} = 0,31\text{ см}^2$ . Ток, протекающий во вторичной обмотке  $I_2 = 36,7\text{A}$ , при этом число витков вторичной обмотки – 3. Диаметр провода вторичной обмотки в таком случае  $d_{пр2} = 3,94\text{мм}$ , однако диаметр провода не должен превышать 1мм, поэтому используем провод ПЭВТЛ диаметром  $d_{пр2*} = 0,8\text{мм}$  и скручиваем в литцендрат из 5 проводников, при этом площадь сечения  $S_{M2} = 0,68\text{ см}^2$ .

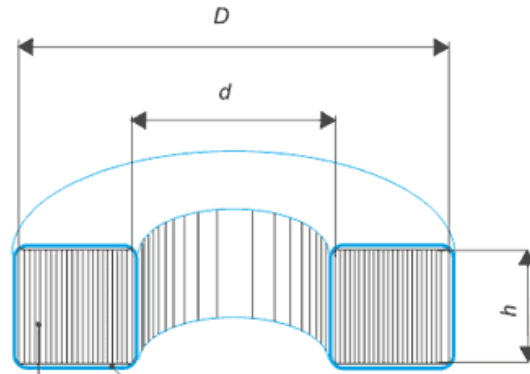


Рис. 5. Сечение выбранного магнитопровода:  $D = 45\text{мм}$ ,  $d = 28\text{мм}$ ,  $h = 10\text{мм}$ .

Высокочастотный инвертор высокочастотный изготавливаем на базе МОП-транзисторов, исходя из напряжения пробоя сток-исток  $U_{ds} = 369\text{В}$  и непрерывного тока утечки  $I_d = 15,7\text{A}$ , при этом необходимо делать запас по току и напряжению в 2-3 раза. В итоге выбираем МОП-транзистор *IXFK44N80P*, фирмы *IXYS*, изображенный на рисунке 6, характеристики которого:  $I_d = 44\text{A}$ ,  $U_{ds} = 800\text{В}$ . Всего используем 4 транзистора.

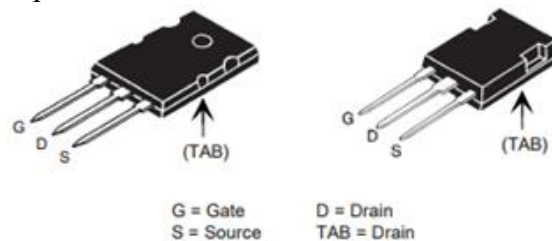


Рис. 6. МОП-транзистор *IXFK44N80P*, фирмы *IXYS*

Высокочастотный неуправляемый выпрямитель представлен однофазной мостовой схемой. Выбор диодов необходимо осуществлять по среднему прямому току и обратному напряжению. Обратное напряжение  $U_{обр} = 106\text{В}$ , а средний прямой ток  $I_{dcp} = 18\text{A}$ . Выбираем диод Шотки типа *VS-60APH03-N-S1*, изображенный на рисунке 7, фирмы *Vishay* с  $U_{обр} = 200\text{В}$ ,  $I_{dcp} = 60\text{A}$  параметры которых превышают рассчитанные значения.

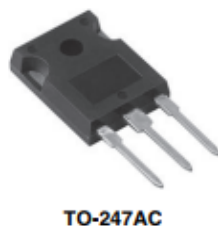


Рис. 7. Диод Шотки типа *VS-60APH03-N-S1*, фирмы *Vishay*

После такого деления устройства на 12 модулей, его можно расположить компактной платформе, на которую также устанавливается вентилятор для охлаждения устройства.

**Выводы:** Данное устройство проводит ток в одном направлении, для увеличения напряжения в точке токосъема с целью повысить тяговый момент асинхронных двигателей при пуске локомотива с полностью загруженным составом. После начала движения устройство вольтодобавки следует шунтировать. В тормозных рекуперативных режимах работы тяговый электропривод локомотива сбрасывает энергию в контактную сеть через ключ, который шунтирует вольтодобавочное устройство. Таким образом, компенсирование отклонения напряжения постоянного тока троллейной линии позволит обеспечить гарантированное трогание с места локомотива с нагруженным составом. Вольтодобавочное устройство реализовано на базе автономного инвертора, высокочастотного трансформатора и выпрямителя и позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели тягового электропривода по сравнению с аналогичными устройствами предыдущего поколения.

#### **Список литературы:**

1. Петрович В.П. Преобразователи постоянного тока / В.П. Петрович, А.В. Глазачев // Силовая электроника, – ТПУ, 2014. – с. 143-167.
2. FerritGlobalMiningSolutions [электронный ресурс] : - CzechRepublic, – Режим доступа: <http://ferrit.cz/ru/produkty/narocvennyj-transport>, свободный. – FerritRail (дата обращения: 15.11.2017).



## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ С ДЕФЕКТАМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ СЕТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

*П.В. Ворончихина, К.Д. Зюков, студенты гр. ГПП-15-1*  
*Научный руководитель - М.Н. Назарова, кандидат технических наук*  
*Санкт-Петербургский горный университет,*  
*199106, Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2,*  
*Тел. 8-981-164-29-72*  
*E-mail: polina1.2@mail.ru*

Промышленность по производству полиэтиленовых трубопроводов оценивает срок службы ПЭ труб в 50-100 лет при грамотном проектировании, установке и эксплуатации [1].

В Российской Федерации первый подземный газопровод из полиэтиленовых труб был построен в августе 1961 г. в Москве на территории Текстильного института [2]. Таким образом, с момента ввода в эксплуатацию газопроводов данного вида прошло более 50 лет. Поэтому так важно систематизировать данные по причинам появления аварийных ситуаций за первые 50 лет работы ПЭ газопроводов для предотвращения их возникновения на новых сетях и расчета вероятности аварий в последующие 50 лет работы.

Полиэтилен является относительно новым материалом, особенно, если сравнивать его с основными конкурентами. Он является органическим соединением молекул этилена, а также газа, связанных между собой в процессе полимеризации. Подобный подход позволяет добиться не только создания вещества с высокими эксплуатационными параметрами, но и установки заранее заданных характеристик.

Полиэтилен принято подразделять на несколько марок, обозначаемых ПЭ и добавлением числового индекса. Различие между ними заключается в отдельных моментах в процессе полимеризации. Образование новых молекул подразумевает создание новых связей и свободных ответвлений. Именно эти факторы определяют свойства вещества. Чем меньше свободных связей, тем больше плотность и выше технические характеристики. Числовой индекс в названии марки определяет степень кристалличности материала. В настоящее время для газопроводов сетей газораспределения применяют полиэтилен ПЭ 80 (MRS 8 МПа) и ПЭ 100 (MRS 10 МПа). Марку ПЭ 63 (MRS 6,3 МПа) сняли с производства по причине возникновения преждевременного излома (дефекты макромолекулярной структуры провоцируют медленное растрескивание ПНД под нагрузкой и последующие разрушения [3]).

Свойства материалов зависят от их кристалличности. Чем молекулярная решётка более упорядочена, тем легче производится спаивание изделий между собой. Получаемый шов имеет ровную структуру и минимальное число дефектов. Температурный режим для спаивания полиэтилена марки ПЭ 100 выше, чем для ПЭ 80. Соблюдая необходимую температуру улучшается надежность соединения.

Пластичность материала является не менее важной составляющей, чем плотность. На молекулярном уровне это достигается за счёт создания большого количества двойных связей, при минимальном числе свободных ответвлений. Таким образом ПЭ 100 имеет лучшие показатели как по пластичности, так и по прочности. Важным фактором является устойчивость полиэтилена к внешним факторам. При

попадании ультрафиолетового излучения на материал происходит незначительное повышение прочности и резкое падение пластичности. ПЭ 100, благодаря особенностям молекулярной структуры, лучше противостоит подобным факторам.

Как показывают исследования полиэтилен ПЭ 100 по всем эксплуатационным параметрам лучше своего предшественника ПЭ 80. Но его недостаток в большей стоимости [4].

Главным параметром при выборе газопровода является максимальное рабочее давление PMS (в МПа), которое рассчитывается по формуле:

$$PMS = \frac{2MRS}{C \cdot (SDR - 1)}$$

где C - Коэффициент запаса прочности C, который выбирают при проектировании газораспределительных трубопроводов из ряда R20 по ГОСТ 8032-84 с учетом условий эксплуатации;

SDR (Standard Dimensional Ratio – стандартное размерное отношение) – отношение номинальной толщины наружного диаметра к номинальной толщине стенки трубы;

MRS (Minimum Required Strength) – минимально требуемая прочность) – минимально прогнозируемая прочность трубы после эксплуатации ее в течении 50 лет при температуре 20°C [5].

При этом не должны снижаться критерии безопасности в течение всего срока эксплуатации. Кроме минимальной длительной прочности материал должен обладать стойкостью к медленному растрескиванию и стойкостью к быстрому растрескиванию. Последний фактор тем важнее, чем больше вероятность внешних повреждений, чем ниже качество сварных швов и чем суровее условия эксплуатации (особенно опасны низкие температуры). Поэтому использование ПЭ 100, превосходящего по показателю 10 стойкости к быстрому растрескиванию ПЭ 63 и ПЭ 80, на давление 1,2 МПа, не менее безопасно, чем труб из ПЭ 63 или ПЭ 80 на давление 0,6 МПа. Принятое в настоящее время допустимое давление в полиэтиленовых трубах из различных марок рассчитано в ГОСТ Р 508-38-95 для сырья при  $T_{\text{экспл}} = 20^\circ \text{C}$  и времени 50 лет [2].

Процесс трещинообразования зависит от совокупности факторов, оказывающих своё влияние на газопровод во время эксплуатации. Типы растрескивания зависят от различного сочетания этих факторов.

Вязкое разрушение, тип I, выражается в текучести и свидетельствует о подверженности материала сильной необратимой пластической деформации, возникающей под напряжением. В результате происходит локальное расширение участка стенки и в конечном счете разрыв деформированной зоны.

Разрушение II типа связано с ползучестью, разрушением при ползучести и растрескиванием под напряжением. Ползучесть – зависимая от времени необратимая деформация в условиях постоянного растягивающего напряжения. Разрушение при ползучести представляет собой последний этап этого процесса и соответствует моменту, когда материал под воздействием постоянной растягивающей нагрузки разрушается. На ускорение процесса разрушения при ползучести могут влиять: температура, концентрация напряжений, усталость материала, химическая среда.

Переход из вязкого состояния в хрупкое свидетельствует о том, что начался процесс растрескивания под напряжением. Для ПЭ прочность волокон и их сопротивляемость разрыву во многом зависят от молекулярной структуры, в частности, от молекулярного веса, его распределения, ветвистости молекул, степени кристаллизации и связывающих молекул. Связывающие молекулы соединены с кристаллическими блоками и пересекают аморфные зоны, выполняя функции механических связей между кристаллическими областями. Эти молекулы играют решающую роль в сопротивлении волокон разрыву и обеспечении механических свойств материала под воздействием напряжения.

Разрушение III типа связано с износом и повышением хрупкости пластика в результате термического окисления с течением времени.

Основным типом разрушений для находящихся в эксплуатации ПЭ труб является хрупкое растрескивание под напряжением, которому подвергается стенка трубы ввиду образования дефектов из-за концентрации напряжения в зоне сварного соединения. Трещины образуются из микроскопических разрывов и царапин, либо изначально присущих трубе, либо, что более вероятно, полученных из-за повреждения. Хрупкие механические разрушения, как правило, представляют собой целевые разломы, которые появляются параллельно направлению экструзии трубы. Кольцевое растягивающее напряжение на стенке трубы провоцирует раскрытие трещин.

Места соединения труб являются менее устойчивыми к растрескиванию относительно линейной части газопроводов. Растрескивание под напряжением происходит из-за концентрации напряжений в сварных швах в совокупности с вторичными изгибающими напряжениями. Скорость распространения трещин зависит от условий эксплуатации газопровода [7].

Возникновение трещин зависит от качества выполнения производственных процессов. Величина каждого учитываемого параметра определяется по физико-механическим характеристикам для конкретного трубопровода в отдельности. Параметры:

- Сварочное давление
- Давление протяжки
- Температура плавления
- Овальность трубы
- Торцовка и загрязнение
- Центрирование труб
- Время нагрева торцов
- Технологическая пауза

Применение *методов контроля* позволяют снизить риск возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации полиэтиленового газопровода.

1. Определение стойкости к внутреннему давлению после применения пережима. Настоящим методом определяют стойкость при постоянном внутреннем давлении трубы из полиэтилена после ее пережима. Технику пережима используют для предотвращения прохождения газа при техническом обслуживании и ремонте газопроводов из полиэтилена.

2. Определение стойкости к быстрому распространению трещин (БРТ) маломасштабным методом (S4). Определяют критическое давление, при котором не происходит быстрого распространения трещины.

3. Определение стойкости к быстрому распространению трещин (БРТ) полномасштабным методом (FS). Определяют длину распространившейся трещины. Испытание полномасштабным методом определения стойкости к быстрому распространению трещин моделирует режим работы труб подземного заложения в условиях эксплуатации газопроводов, когда скорость декомпрессии газа не замедляется при разгерметизации через любую трещину в трубе.

4. Определение стойкости к медленному распространению трещин (метод с надрезом). Регистрируют время до разрушения или время испытания. Испытание распространяют на трубы с номинальной толщиной стенки более 5 мм.

5. Определение термостабильности. Определяют индукционный период окисления материала методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), который характеризует степень стабилизации испытываемого материала.

6. Определение атмосферостойкости. Атмосферостойкость – старение при воздействии естественных климатических факторов [8].

*Методы контроля сварных соединений* имеют двухуровневую систему, состоящую из обязательных и специальных методов.

Обязательным (экспресс) методам оценки подвергаются сварные соединения, выполняемые перед началом строительства газопроводов (допускные стыки) и отбираемые из числа стыков, сваренных каждым сварщиком на объекте строительства (контрольные стыки).

Таблица 1 - Обязательные методы контроля

Обязательные методы	Способ сварки
Внешний осмотр	Нагретым инструментом встык. Детальями с ЗН
Испытание на осевое растяжение	Нагретым инструментом встык
Ультразвуковой контроль	Нагретым инструментом встык
Пневматические испытания	Нагретым инструментом встык. Детальями с ЗН
Испытания на сплющивание	Детальями с ЗН
Испытания на отрыв	Детальями с ЗН (только для седловых отводов)

Специальные методы испытаний проводятся отраслевыми испытательными центрами в случае необходимости подтверждения экспресс-методов, углублённых исследований и других целей [9].

Таблица 2 - Специальные методы контроля

Специальные методы	Способ сварки
Испытание на статический изгиб	Нагретым инструментом встык
Испытание при постоянном внутреннем давлении	Нагретым инструментом встык. Детальями с ЗН
Испытание на длительное растяжение	Нагретым инструментом встык
Испытание на стойкость к удару	Детальями с ЗН (только для седловых отводов)

Работоспособное состояние – состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект [10]. Оценка работоспособности полиэтиленовых газопроводов с дефектами-трещинами представляет собой совокупность параметров, которые необходимо учитывать на всех этапах создания безопасной газотранспортной системы (начиная с

производства полимерного материала и заканчивая контролем качества газопровода в процессе эксплуатации). Учет каждого параметра является основой для последующего моделирования аварийных ситуаций.

### Список литературы:

1. Plastics Pipe Institute. Handbook of Polyethylene Pipe, 2nd Edition, 2008.
2. Фаттахов М.М. Применение труб из термопластов при строительстве и реконструкции распределительных трубопроводов// Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. – 1-14 с.
3. Кимельблат В.И., Вольфсон С.И., Чеботарева И.Г. Прогнозирование эксплуатационных качеств экструзионного полиэтилена низкого давления по реологическим характеристикам. – Механика композитных материалов № 4, 1996. – с.558-663.
4. Отличие полиэтилена ПЭ 80 от ПЭ 100 [Электронный ресурс]: АОС – Универсальный поставщик стальных и пластиковых труб. – Режим доступа: <http://aosgk.ru>, свободный.
5. УК «Группа Полипластик» [Электронный ресурс]: Трубы из полиэтилена. – Презентация PDF. – Режим доступа: <http://rapts.ru/sites/default/files/spetsialistu>, свободный.
6. Крис О'Коннор. Полиэтиленовые трубопроводы: как избежать дефектов сварки? // Газ России. 2012. – №3. – 48-58с.
7. ГОСТ Р 50838-2009 (ИСО 4437:2007). Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технологические условия. – [б.и.], 2009. – 58с.
8. Свод правил по проектированию и строительству: СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. – [б.и.], 2003. – 91с.
9. ГОСТ 27.002 – 2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 28с.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО ШВА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СКЛОННОСТЬЮ К ОБРАЗОВАНИЮ СТРЕСС – КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН

*М. Н. Назарова, доцент кафедры ТХНГ,  
В. В. Понкратова, студентка гр. ГРП-14-2,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия Васильевского острова, 2,  
Тел. 8-911-081-6892  
E-mail: ponkratova\_lera@mail.ru*

### 1. Введение

Механические свойства сварного соединения зависят от его структуры, определяемой химическим составом, видом сварки и режимом термообработки. В большинстве случаев при авариях на газопроводах металл труб в месте разрушения имеет отклонение по химическому составу. Разные химические элементы могут как положительно, так и отрицательно воздействовать на формирование структуры сварного шва. Количественные связи между отклонениями по химическому составу

и их воздействием на процессы развития стресс-коррозии, в том числе в сварных швах, до сих пор не установлены. Далее представлен механизм влияния химических элементов на свойства сварного шва и его устойчивость к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН).

## **2. Влияние легирующих элементов на свойства сварного шва**

Легирующие элементы, упрочняя металл, вызывают снижение его пластичности и являются одной из причин появления хрупкой составляющей в изломе. Снижение пластичности сталей происходит за счет появления посторонних атомов в решетке растворителя. Это приводит к большей вероятности возникновения трещины в зонах с повышенной концентрацией напряжений при наличии примесей, по сравнению с чистым металлом.

Наиболее эффективным способом предотвращения восприимчивости аустенитных сталей к коррозии при воздействии сварочного термического цикла является снижение содержания углерода до уровня, близкого к пределу стабильной растворимости его в твердом растворе аустенита при комнатной температуре.

Азот в металле образует нитриды  $Fe_2N$ ,  $Fe_3N$ , которые повышают прочность и твердость металла шва, но снижают его пластичность. А чем менее пластичен металл, тем больше вероятность, что при превышении критического значения напряжения, начнется рост стресс-коррозионных трещин. Содержание углерода и азота должно быть в трубных сталях минимальным, так как эти элементы оказывают значительное влияние на температуру перехода механизма разрушения - от вязкого к хрупкому.

Титан, молибден, ниобий и ванадий оказывают значительное влияние на сопротивление коррозионному растрескиванию, так как они связывают углерод и азот в соединения, нерастворимые в  $\alpha$ - и  $\gamma$ - железе.

Фосфор придает металлу хладноломкость, т.е. снижение прочности и пластичности при низких температурах эксплуатации конструкции, а также способствует образованию холодных трещин в шве. С увеличением содержания фосфора понижается сопротивление стали коррозионному растрескиванию, увеличивается интенсивность наводороживания.

Сера придает металлу красноломкость, т.е. снижение прочности и явления ползучести при высоких температурах эксплуатации конструкции, а также способствует появлению горячих трещин в шве. Это объясняется тем, что сера образует с железом сернистое железо  $Fe_2S$ , имеющее температуру плавления  $1193^\circ C$ , меньшую, чем у железа  $1539^\circ C$ . Оно расплавляется по границам кристаллитов и при высокой температуре плавится в первую очередь.

Кремний повышает предел прочности и текучести стали, а также может повышать устойчивость сорбитных структур против отпуска. Он также вызывает довольно сильное охрупчивание при увеличении его содержания свыше экспериментально установленного диапазона для малоуглеродистых сталей. Кремний затрудняет релаксацию напряжений в местах их концентрации [1].

Хром относится к самопассивирующимся материалам. Вследствие пассивации хрома на поверхности сплава образуется пассивная пленка – защитный слой. Этот слой значительно повышает коррозионную стойкость сплава [2].

Установлено, что добавки кремния, никеля, ванадия и алюминия к железу вызывают значительное увеличение скорости деформационного упрочнения, при этом сопротивление распространению трещины уменьшается [1].

Под влиянием легирования молибденом, даже при сравнительно незначительных его количествах (примерно 0,5%), существенно возрастает кратковременная и длительная прочность стали при повышенных температурах. Добавки молибдена способствуют измельчению зерна сталей, повышают упрочняемость сталей термической обработкой, увеличивают усталостную прочность сталей. Легированные стали с содержанием молибдена 0,20-0,40 % или такое же количество ванадия замедляют возникновение отпускной хрупкости, но не устраняют ее полностью. Молибден повышает коррозионную стойкость сталей.

При введении в сталь всего 0,15—0,25% ванадия, резко повышается прочность, вязкость, сопротивление усталости и износоустойчивость металла. Небольшие его добавки способствуют повышению предела текучести стали и увеличению отношения предела текучести к пределу прочности.

Добавки хрома, никеля и молибдена в количестве от 2 до 6% повышают стойкость сталей к интеркристаллитному растрескиванию [3].

С увеличением содержания марганца сопротивление стали КРН понижается. Марганец способен удержать около себя атомы азота в объеме кристалла, из-за чего на дислокациях, которые расположены на границах зерен, собирается углерод, что может понижать сопротивление высокопрочной стали к растрескиванию. Также марганец в металле шва нейтрализует вредное влияние серы, образуя сульфид марганца (MnS). С увеличением содержания марганца склонность металла к образованию трещин при повышении содержания серы (до определенного уровня) не возрастает. Марганец повышает сопротивление сталей как вязкому, так и хрупкому разрушению. Однако в сталях с низким содержанием марганца менее 1 % при значительной пластической деформации наблюдается образование микротрещин. Влияние марганца как легирующего элемента в трубных сталях хорошо иллюстрируется отношением количества марганца к количеству углерода: вязкость малоуглеродистой стали увеличивается с ростом этого отношения [1].

### **Заключение**

Одни химические элементы, такие как углерод, азот, фосфор, сера способствуют снижению пластичности металлов и развитию стресс-коррозионных трещин. Другие же, марганец, хром, молибден, ванадий, никель, наоборот, повышают стойкость сталей к КРН. Некоторые, например, кремний, при различных концентрациях оказывают как полезное, так и вредное воздействие на развитие стресс-коррозионных трещин. Важный аспект борьбы с коррозионным растрескиванием как в сварных швах, так и в основном металле – правильный подбор химического состава сталей, т.е. соблюдение оптимального соотношения легирующих элементов

### **Список литературы:**

1. Акбашев Р.М., Ткаченко Д.А., Курдюмов Н.И. Повышение эффективности экспертизы промышленной безопасности трубопроводов путем использования взаимосвязи свойств металла и его склонности к разрушению по механизму стресс-коррозии// Достижения науки и образования, 2016. – № 3(4). – С. 9–12.
2. Кривоносова Е.А., Акулова С.Н., Мышкина А.В. К проблеме коррозионного разрушения сварных швов// Вестник ПНИПУ, 2017. –№3. – Т.19. – С. 114–137.
3. Онацкий В.Л. Совершенствование методов предупреждения развития коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных газопроводах//

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – 2017. – С. 1–118.

## РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОЗВЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*П.Г. Михайлов, д.т.н., профессор - научный руководитель,  
М. Златогорский – магистрант, Ю. Клейменов – магистрант, А. Верева –  
магистрант, А. Усачев – магистрант.*

*Пензенский филиал МГУТУ им. К. Г. Разумовского, г. Пенза*

*Тел. 89273788810*

*E-mail: pit\_mix@mail.ru*

При разработке метрологических моделей датчиков физических величин (ДФВ), используемых в системах автоматизации машиностроения, следует учитывать не только вклад отдельных узлов и блоков в общую погрешность преобразования, но и иметь возможность управления метрологическими характеристиками для повышения информативности всего измерительного канала [1, 2]. Как правило, хотя основную долю в общей погрешности преобразования ДФВ вносит ЧЭ и измерительный модуль, некоторые узлы датчика также вносят в общую погрешность свою долю. Это особенно заметно при экстремальных условиях работы датчиков [3]. Кроме того, и сами измерительные модули могут иметь сложную конструктивную структуру, включающую несколько преобразователей или функциональных узлов включенных последовательно (рис. 1). При этом и ЧЭ могут содержать несколько сенсорных элементов и структур, объединенных конструктивно и функционально [4]. В любом из перечисленных случаев, дополнительные узлы и преобразователи, участвующие в процессе приема, преобразования и выдачи измерительной информации, вносят свою, индивидуальную погрешность в общую погрешность преобразования измерительного канала [1].

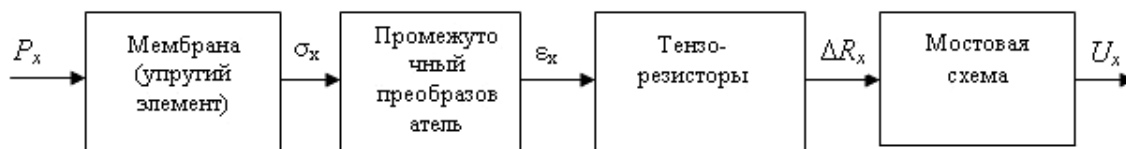


Рис. 1. Структурно-функциональная модель тензорезисторного датчика давления

Анализ как отдельных, так и общих погрешностей многозвенных измерительных структур удобно и наглядно проводить, используя совмещенную модель, на которой приведены структурные блоки и их функции преобразования (рис. 2) [5]. В результате учета и суммирования погрешностей отдельных звеньев измерительной цепи получают метрологическую модель всего измерительного преобразователя.

Таким образом, метрологическая модель (МТМ) датчика, являющейся разновидностью математических моделей (ММ), строится с использованием аппарата метрологического анализа и основывается на структурной и функциональной моделях датчика. МТМ позволяет установить связи между погрешностями датчика в целом и погрешностями его отдельных компонентов [6].



Построение МТМ цепи из линейных звеньев начинается с рассмотрения структурной схемы датчика (структурной функциональной модели). В частности, на рис. 2 приведены два последовательно включенных звеньев, имеющих номинальные функции преобразования  $y_1 = S_1 x_1$  и  $y_2 = S_2 x_2$ .

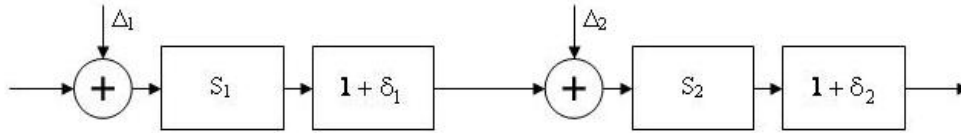


Рис. 2. Метрологическая модель двухзвенной измерительной цепи

Принимая выходную величину первого звена равной выходной величине второго звена, т.е.  $y_1 = x_2$ , получим:

$$y_2 = S_2(x_2) = S_2(y_1) = S_2(S_1 x_1) = S_1 S_2 x_1. \quad (1)$$

Опуская индексы у входных и выходных величин, получаем общую номинальную функцию преобразования:

$$y = S_1 S_2 x. \quad (2)$$

Реальные функции преобразования звеньев можно представить в виде:

$$y_1 = S_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1), \quad y_2 = S_2(1 + \delta_2)(x_2 + \Delta_2). \quad (3)$$

Согласно принципу суперпозиции, реальная выходная величина  $y_p$  будет состоять из трех слагаемых, по числу входов на модели  $x$ ,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ :

$$y_p = x S_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1) S_2(1 + \delta_2) + \Delta_1 S_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1) S_2(1 + \delta_2) + \Delta_2 S_2(1 + \delta_2) = \quad (4)$$

$$= x S_1 S_2(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_1 \delta_2) + \Delta_1 S_1 S_2(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_1 \delta_2) + \Delta_2 S_2(1 + \delta_2)$$

Пренебрегая произведениями погрешностей ввиду их малости, получаем:

$$y_p = x S_1 S_2(1 + \delta_1 + \delta_2) + \Delta_1 S_1 S_2 + \Delta_2 S_2. \quad (5)$$

Исходя из того, что номинальная функция преобразования  $y = S_1 S_2 x$ , получаем следующие модели различных видов погрешностей:

- абсолютная погрешность функции преобразования

$$y_p - y = x S_1 S_2(\delta_1 + \delta_2) + \Delta_1 S_1 S_2 + \Delta_2 S_2. \quad (6)$$

- аддитивная погрешность, приведенная к входу

$$\frac{y_p - y}{S_1 S_2} = x(\delta_1 + \delta_2) + \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{S_1}. \quad (7)$$

- аддитивная погрешность, приведенная к выходу

$$\Delta_Y = \Delta_1 S_1 S_2 + \Delta_2 S_2. \quad (8)$$

- мультипликативная погрешность

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (9)$$

От простейшей двухзвенной измерительной цепи перейдем на многозвенную, состоящую из последовательно соединенных нескольких линейных звеньев (рис. 3). Найдем в общем виде модель погрешности для таких измерительных цепей.

Номинальная функция преобразования  $n$  последовательно соединенных звеньев имеет вид:

$$y = x \prod_{i=1}^n S_i, \quad (10)$$

где  $y$  и  $x$  - выходная и входная величины;  $n$  - число звеньев;  $S_i$  - чувствительность звеньев.

Метрологическая модель такой цепи - это совокупность формул для вычисления мультипликативной и аддитивной погрешностей соединения

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i; \Delta_y = \sum_{i=1}^n \left( \Delta_i \prod_{j=i}^n S_j \right) \text{ или } \Delta_x = \Delta_1 + \sum_{i=2}^n \left( \Delta_i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{S_j} \right), \quad (11)$$

где  $\delta$  - максимальная мультипликативная погрешность измерительной цепи;  $\delta_i$  - мультипликативные относительные погрешности звеньев (погрешности чувствительностей  $S_i$ );  $\Delta_y$  и  $\Delta_x$  - аддитивные предельные абсолютные погрешности соединения, приведенные к выходу и к входу соответственно;  $\Delta_i$  - аддитивные предельные абсолютные погрешности звеньев, приведенные к их входам.

Если число слагаемых в сумме больше двух, то удобно использовать формулы математической статистики: вычисление среднеквадратических и среднегеометрических величин, так как они дают реальные величины погрешностей:

- среднеквадратическая форма

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots} \quad (12)$$

- среднегеометрическая форма

$$\delta = \sqrt{\sum (\delta_i)^2} \text{ или } \Delta = \sqrt{\sum (\Delta_i)^2}. \quad (13)$$

Метрологическая модель многозвенной измерительной цепи (рис. 3) строится по аналогии с моделью соединения двух звеньев (рис. 2) [11, 12].

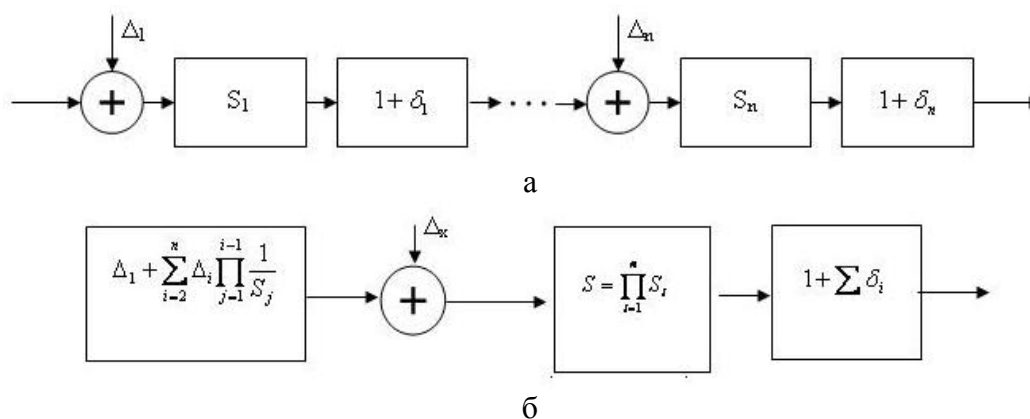


Рис. 3. Два варианта представления метрологической модели многозвенной измерительной цепи: а-развернутый ; б-сжатый

Выводы: синтез и последующий анализ метрологических моделей многозвенных измерительных цепей датчиков физических величин позволяет определить критические узлы датчиков в части вносимой погрешности преобразования и оптимизировать общую погрешность путем введения дополнительных обратных связей и корректирующих звеньев.

### Список литературы:

1. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А Зограф. Л. : Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
2. Михайлов П.Г. Синтез информационно-энергетических моделей датчиков / П.Г. Михайлов // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2003. № 3. С. 37-40.
3. Богущ, М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации / М.В. Богущ. Ростов-на-Дону.: Изд-во РГУ, 2005. 294 с
4. Михайлов, П.Г. Микроэлектронный датчик давления и температуры / П.Г. Михайлов // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2003. № 11. С. 29-31.
5. Мурашкина, Т.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления: Монография / Т.И. Мурашкина, В.И. Волчихин Пенза: Изд-во Пенз. гос. Ун-та, 1999. 188 с.
6. Михайлов, П.Г. Модели обратных преобразователей микроэлектронных датчиков / П.Г. Михайлов, А.В. Соколов, В.И. Лапшин // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: Межвуз. сб. науч. тр. под ред. проф. Н. К. Юркова. / Пенза: Изд-во ПГУ. 2012. Вып. 17. С. 262 - 268.
7. Михайлов, П.Г., Рахимжанова П.Т. Разработка математических моделей измерительных преобразователей Труды VII Международной научно-практической интернет конференции «Актуальные научные исследования в современном мире» 25.11.2015 Переяслав-Хмельницкий Украина вып. 7, ч.2. С. 100-105
8. Михайлов, П.Г. Кабдолдина А., Баясилова З. А. Анализ и синтез структурных моделей многозвенных измерительных преобразователей // Труды III Межвузовской НПК «Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы МСНПК-2016. (РИНЦ) Из-во ПГУ, 2016 - С. 136-139
9. Михайлов, П.Г. Ожикенов К.А. Особенности измерения и контроля геометрических параметров элементов и узлов датчиков физических величин Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль 2015, № 1(11), С. 36-43
10. Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Касимов А.О., Аналиева А.У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3(164) 2015 С. 184-193.
11. P.G. Mikhajlov, Yu.N.. Slesarev, V.A. Chulkov Mathematical Modeling of Combined Sensor Information - Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10332-10337 © Research India Publications. <http://www.ripublication.com>.
12. Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Ismagulova R.S. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components. // 2016 13<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).2016. Vol.1. - pp. 84-90.

## **ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ. ИНЖЕНЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

*П.Г. Михайлов, д.т.н., профессор - научный руководитель,  
М. Златогорский – магистрант, Ю. Клейменов – магистрант, А. Вережка –  
магистрант, А. Усачев – магистрант.*

*Пензенский филиал МГУТУ им. К. Г. Разумовского, г. Пенза*

*Тел. 89273788810*

*E-mail: pit\_mix@mail.ru*

На практике при разработке конструкции, технологии и освоении производства новых или модернизации средств автоматизации машиностроения, зачастую сталкиваются с факторами многозначности, многофакторности реальных процессов жизненного цикла разрабатываемой продукции. При этом невозможно учесть все влияющие при этом факторы, поэтому ранее разработанные стохастические модели устройств зачастую имеют недостаточную точность, адаптивность и информативность. В тоже время полностью адаптивные модели средств автоматизации создавать сложно, а зачастую и нецелесообразно по экономическим затратам. Приемлемым компромиссом между указанными моделями может служить третий тип моделей, включающих экспертные составляющие, возникающие из накопленных опытных данных и знаний специалистов (экспертов) в рассматриваемой сфере, в частности, в измерительных средствах систем автоматизации машиностроения. Экспертные методики и модели, включающие опыт разработчиков, технологов и производителей, принято называть инженерными моделями. Инженерные методики моделирования и создаваемые в процессе моделирования инженерные модели, не требуют высокой научной квалификации разработчиков, позволяя с приемлемой точностью проводить расчеты, не прибегая к дорогим, трудно осваиваемым, специализированным компьютерным программам. Рассмотрим применение инженерных методов к основному узлу измерительных преобразователей (ИП) – полупроводниковому чувствительному элементу (ПЧЭ) преобразователя давления (ИПД).

### **Моделирование прочности упругого элемента**

Толщина деформируемой части ИП – воспринимающего элемента (ВЭ) является определяющим чувствительность, диапазон линейного преобразования и геометрические размеры ПЧЭ. Технология жидкостного анизотропного травления, позволяет получить очень тонкие ВЭ, чем достигается увеличение чувствительности ИПД при сохранении постоянных его посадочных размеров. Или, наоборот, чувствительность преобразования может быть постоянной, но при этом могут быть уменьшены его геометрические размеры. Поэтому, используя типовую топологию сенсорной схемы, можно получить целый ряд ПЧЭ и измерительных модулей (ИМ), рассчитанных на различные диапазоны измеряемой величины путем изменения только толщины ВЭ, но не его размеров [1-4].

В отличие от обычных интегральных схем, в ПЧЭ на разброс характеристик ИПД, кроме обычных технологических факторов влияет ряд дополнительных, в частности, разброс геометрических размеров ВЭ преобразователя, который может достигать несколько десятков процентов. Отсюда становится очевидным, что контроль и воспроизводимость толщины ВЭ очень важны для минимизации разброса функции преобразования ИПД [5, 6].

Упругие свойства изотропных тел при объемном механическом напряженном состоянии определяются тремя параметрами: модулем Юнга  $Y$ , коэффициентом Пуассона  $\nu$  и модулем сдвига  $G$ . Два из них независимы, а третий выражается через них однозначно. Для анизотропных материалов, к которым принадлежат все полупроводники, упругие свойства определяются набором гораздо большего числа физических коэффициентов [7].

Поскольку кремний является анизотропным материалом, то, очевидно, и значения этих модулей не будут постоянными, а будут зависеть от выбранного направления в кристалле. В практике создания полупроводниковых ИПД, наиболее распространены плоскости ориентации кремниевых пластин: (111), (100) и (110). На рис. 1а представлено произвольное расположение системы координат плоскости ВЭ, а на рисунке 1б представлена модель ВЭ.

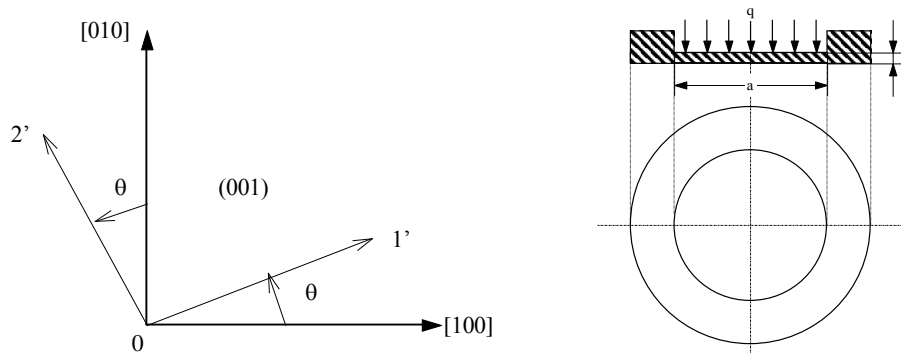


Рис. 1. а - расположение произвольной системы координат относительно исходной для плоскостей (001); б - геометрическая модель ВЭ - кремниевой мембраны

Согласно принятым в сопромате методикам, прогиб в центре ВЭ для плоскости (001) выражается формулой [8, 9]:

$$W_0 = 0,131 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R^4}{h^3} \cdot q, \quad (1)$$

где  $R=a/2$  - рабочий радиус мембраны, мм;  $h$  - толщина мембраны, мм;  $q$  - давление, Па.

Отметим, что края мембраны жестко закреплены, диаметр мембраны во много раз превышает ее толщину ( $2a \gg h$ ). Отсюда следует, что прогибы мембраны незначительны и не превышают 20 % от ее толщины.

Для нахождения толщины мембраны необходимо найти максимальное значение МН на окружности мембраны  $r = R$  в направлении радиуса:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{r \max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{PR^2}{h^2}, \quad (2)$$

где  $R$  = радиус мембраны, мм., откуда

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}}, \quad (3)$$

где  $P$  - приложенное давление.

Определим максимальное значение  $\sigma_{\max}$  из следующей формулы:

$$\sigma_{\max} = E_{\min} \cdot \varepsilon_{\max}, \quad (4)$$

где  $E_{\min} = 1,3 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> - модуль Юнга кремния в направлении [011];  $\varepsilon_{\max} = 5 \cdot 10^{-4}$  - максимальная деформация рабочей зоны мембраны.

Алгоритм прочностного расчета ВЭ представлен на рис. 2.

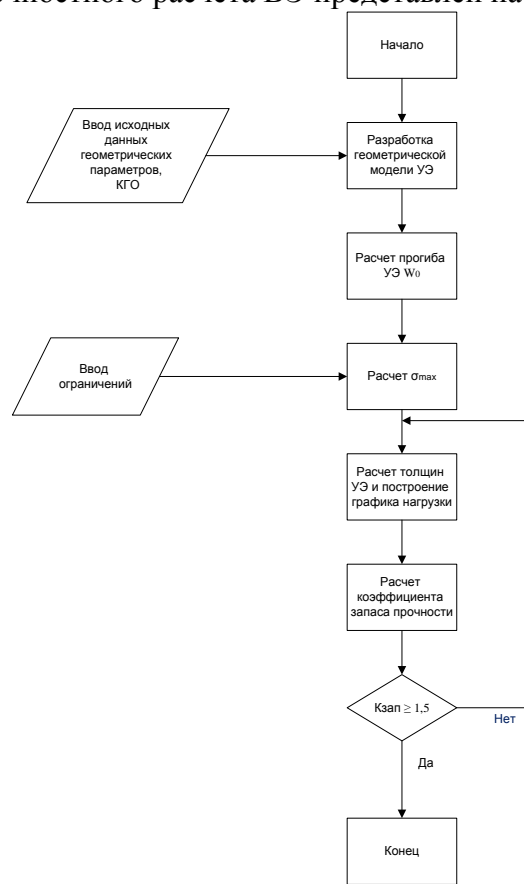


Рис. 2. Алгоритм прочностного расчета кремниевого ВЭ

По полученной аналитической нелинейной зависимости (3), с использованием программы *MS Excel*, была рассчитана графическая модель (рис. 3), по которой можно спрогнозировать механическую прочность ВЭ КЧЭ интегрального датчика. На графике также показана экспонента, аппроксимирующая зависимость  $h_x=f(P_x)$ .

Для обеспечения механической надежности работы ПЧЭ и всего ИПД в целом необходимо иметь запас прочности,  $K_{\text{зап}} \geq 1,5$ :

$$K_{\text{зап}} = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{\varepsilon_{\text{пред}}}{\varepsilon_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{пред}}$  и  $\varepsilon_{\text{пред}}$  – соответственно максимально допустимые значения напряжения и деформации для кремния (справочные величины).

Подставив ранее определенные значения относительных деформаций в (5), получим:

$$K_{\text{зап}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 2.$$

Таким образом, полученное значение  $K_{\text{зап}}$  подтверждает достаточно надежную работу кремниевого УЭ и датчика в целом [10].

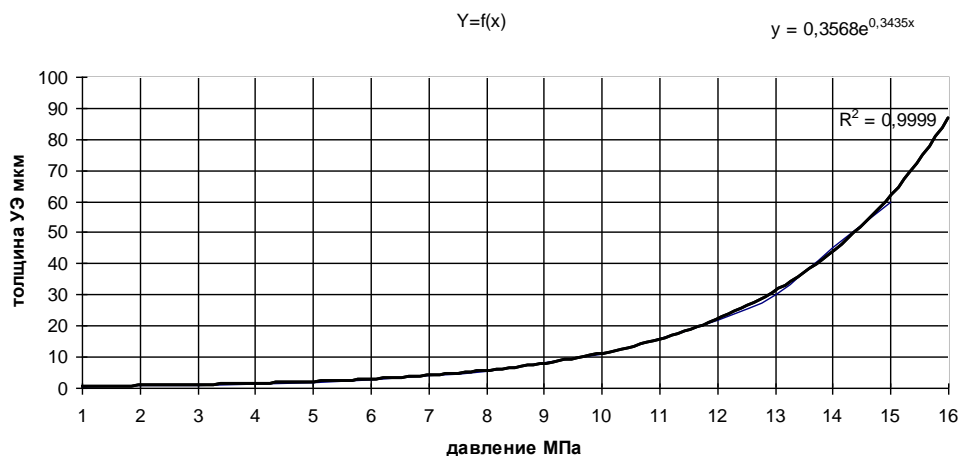


Рис. 3. Графическая зависимость толщины ВЭ КЧЭ от давления

### Список литературы:

1. Михайлов П.Г., Мокров Е.А. и др. Особенности метрологического обеспечения современных датчиков пульсаций давления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 5 (130). 2012 г.С. 174 – 179.
2. Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013 г № 5. С. 128 – 133.
3. Михайлов П.Г., Варламов А.В. Микроэлектронные датчики. Разработка и проектирование // Датчики и Системы. 2007–№ 8- С. 23-26
4. Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан № 6 2014. С. 27-34.
5. Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Касимов А.О., Аналиева А.У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3(164) 2015 С. 184-193.
6. P.G. Mikhajlov, Yu.N.. Slesarev, V.A. Chulkov Mathematical Modeling of Combined Sensor Information - Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10332-10337 © Research India Publications. <http://www.ripublication.com>.
7. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. / М.: Мир, 1967. 386 с.
8. Тихоненков, В.А. Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин / Ульяновск: УлГТУ, 2000. 452 с.
9. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики. Справочник. / Р.Г. Джексон, пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 380 с.
10. Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Ismagulova R.S. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components. // 2016 13<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).2016. Vol.1. -pp. 84-90.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*В.Г.Коротков<sup>1</sup>, Р.Ф.Сагитов<sup>2</sup>, В.П.Попов<sup>1</sup>, Е.У. Арыстаналиев<sup>3</sup>, Л.Х. Галиева<sup>3</sup>, З.Р. Ахмадиева<sup>4</sup>, Е.А.Цыркаева<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия;*

<sup>2</sup>*ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», Оренбург, Россия*

<sup>3</sup>*Атырауский университет нефти и газа, г. Атырау, Республика Казахстан*

<sup>4</sup>*Кумертауский Филиал Оренбургского государственного университета, Кумертау, РБ, Россия*

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам рационального питания (производство продуктов повышенной пищевой ценности) и разработке энергосберегающих технологий пищевой продукции.

К продуктам повышенной биологической ценности можно отнести так называемые нетрадиционные макаронные изделия (изделия с использованием пшеничных отрубей, сухой клейковины, плодоовощной мезги, крахмала и т.д.). Значительный вклад в производство нетрадиционных макаронных изделий внесли Г.М. Медведев, Р.Д. Поляндова, В.Д. Малкина, В.Я. Черных и др. Предыдущими исследователями разработаны различные технологии производства нетрадиционных макаронных изделий, однако, все они имеют значительную энергоемкость, получаемая продукция более низкое качество, чем традиционная. Единой технологии и оборудования, позволяющих вырабатывать как традиционные, так и не традиционные макаронные изделия в настоящее время не существует. В связи с вышеизложенным, является актуальным проведение исследований по разработке энерго- и ресурсосберегающих техники и технологии для производства как традиционных, так и не традиционных макаронных изделий.

В настоящее время известны различные способы приготовления макаронного теста [1,2] отличающиеся температурой и влажностью теста [1-3]. По данным Г.М. Медведева при производстве макаронных изделий из нетрадиционного сырья (со сниженным содержанием или отсутствием клейковины) ведущие зарубежные фирмы применяют частичную клейстеризацию крахмала [2,3]. Применение данной технологии приводит к значительному увеличению энергоемкости производства [3].

Вместе с тем, в пищевой промышленности перспективным является использование процессов, осуществляемых путем непосредственно контакта электрического тока с продуктом. Простота аппаратного оформления, высокий КПД, быстротечность, достаточно высокая равномерность температурного поля, доступность контроля и регулирования энергетических параметров - все свойственно электроконтактному методу[4].

Однако применение на стадии замеса нетрадиционного сырья, частичной клейстеризации и электроконтактного воздействия приводит к значительному изменению реологических свойств макаронного теста [5], а как следствие к необходимости создания инструмента оперативного управления ими в процессе экструдирования.

Реологические свойства макаронного теста рассматривали Калинин Ю.В., Максимов А.С., Назаров Н.И., Буров Л.А., Мачихин Ю.А., Николаев Б.А.[5-7].



Формование макаронных изделий, как правило осуществляется методом экструзии. Движение макаронного теста в канале шнека наиболее точно описывается реологической моделью Бингама [5,8].

Следующим этапом после экструдирования в процессе производства макаронных изделий является, как правило, их сушка. Исследователями Г.М. Медведевым, В.В. Манком, Jajima Mizio, Asama Chemicai Co, Tecedor Silverio Luis, Schryg Richard F. и т.д. изучались различные способы сушки как традиционных, так и не традиционных макаронных изделий и было установлено, что реологические свойства, получаемые при экструзии полуфабрикатов, существенно влияют на интенсивность и энергоёмкость их сушки [9,10].

Следует отметить, что предыдущими исследователями практически не изучались реологические характеристики макаронного теста непосредственно в ходе его экструдирования, не исследовались реологические характеристики теста из нетрадиционного сырья и не разрабатывались конструктивные элементы для их измерения [11].

В настоящее время имеется определенный успех в области математического моделирования процессов тепломассопереноса полимерных материалов в экструдере. Большой вклад в изучение процессов тепломассопереноса в экструдере внесли: Тадмор З, Раувендааль К., Торнер Р.В., Виноградов Г.В., Володин В.П., Шварцманн П. и др. [12]. Представленные в работах модели подразумевают переработку однородных легко пластифицируемых материалов, которые в разогретом состоянии представляют из себя псевдо пластические тела. Данные модели не подходят для описания процессов движения и теплообмена при экструдировании макаронного теста, так как оно по своей структуре представляет из себя неоднородное упруго-вязко-пластичное тело, содержащее зерна крахмала и нити белка, что не возможно учесть в выше представленных моделях.

Таким образом, создание математической модели процесса эструдирования макаронного теста является актуальной задачей в настоящее время.

За основу при составлении математической модели представленной в статье были взяты труды Калинина Ю.В., Мачихина С.А., Николаева Б.А., Тимофеевой Д.В., Короткова В.Г., Полищука В.Ю., Зубковой Т.М. и др. [5, 7] посвященных изучению реологических свойств макаронного теста и математическому описанию процессов движения и теплообмена при экструдировании клейковинобелковокрахмалсодержащего материала по своей структуре близкого к макаронному тесту.

Движение макаронного теста описывается моделью Бингама, для общего случая:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{(\tau - \tau_0)}{\eta_{nl}}, \quad (1)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $c^{-1}$ ;

$\dot{\tau}$  – скорость изменения касательного напряжения, Па/с;

$\tau$  – касательное напряжение, Па;

$\tau_0$  – предел текучести при сдвиге, Па;

$G$  – модуль упругости при угловой деформации, Па;

$\eta_{nl}$  – вязкость при сдвиге, Па·с.

Авторами статьи предлагается для оценки интенсивности произошедших в экструдере преобразований использовать крутящий момент на выходе из экструдера, измеряемый при помощи специальных насадок [12].

При этом уравнение для крутящего момента имеет вид:

$$M_{\vartheta} = (\dot{\gamma} \cdot \eta_{nl} \cdot \tau_0) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{G}{\eta_{nl}} t} \right) \cdot 2\pi RL^2 \quad (2)$$

где  $R$  – внутренний радиус насадки, м;

$t$  – время прохождения перерабатываемого материала через насадку, с;

$L$  – длина канала насадки, м.

Для оценки интенсивности воздействия процесса экструзии на обрабатываемый продукт в фильере матрицы можно использовать среднюю скорость сдвига псевдопластического материала, которую можно определить из выражения:

$$\dot{\gamma}_{u.c.p.m} = R_1 \cdot \left( \frac{\tau_{cm} - 2\tau_0}{4\eta_{nl}} \right) - \frac{2\tau_{cm}}{3G} \quad (3)$$

где  $\tau_{cm}$  - касательное напряжение у стенки фильеры;

$R_1$  - радиус фильеры, м;

В выражениях 2 и 3 величины  $\tau_0$ ,  $\eta_{nl}$ ,  $G$  требуют идентификации.

С целью идентификации переменных величин получены уравнения регрессии имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 14,5127 - 1,6485 \cdot t_1 + 0,9319 \cdot M_C \cdot t_1 + 1,0241 \cdot t_1 \cdot \omega_3 + \\ &+ 0,887 \cdot M_C \cdot \omega_3 + 0,9825 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 + 1,4076 \cdot M_C^2 - 2,1291 \cdot \omega_3^2 \\ \eta_{nl} &= 0,2113 + 0,0095 \cdot M_C - 0,019 \cdot t_1 + 0,0117 \cdot t_1 \cdot \omega_3 + \\ &+ 0,01424 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 - 0,0229 \cdot M_C^2 - 0,0249 \cdot \omega_3^2 \\ G &= 0,0659 - 0,0071 \cdot t_1 + 0,0078 \cdot \omega_3 + 0,0098 \cdot M_C \cdot t_1 + \\ &+ 0,0094 \cdot M_C \cdot \omega_3 + 0,0072 \cdot M_C \cdot t_1 \cdot \omega_3 + 0,0207 \cdot M_C^2 - 0,0212 \cdot \omega_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

где  $M_C$  - исходный момент смешивания сырья (зависит от химического состава и свойств сырья, определяется с помощью специальной насадки [12]);

$t_1$  - исходная температура макаронного теста;

$\omega_3$  - частота вращения шнека экструдера.

Величины  $M_C$ ,  $t_1$ ,  $\omega_3$  в условных единицах.

Для перевода условных единиц в натуральные используются уравнения:

$$\begin{aligned} M_C' &= 0,0013 \cdot M_C - 1,6667 \\ t_1' &= 0,0667 \cdot t_1 - 2,6667 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\omega'_3 = 0,0333 \cdot \omega_3 - 2$$

где единицы измерения величин:  $M'_c$  - Н·м,  $t'_1$  - с,  $\omega'_3$  - рад/с.

С целью установления границ применения модели были установлены рекомендуемые диапазоны значений параметров процесса экструдирования.

Для выявления диапазонов значений параметров процесса экструдирования макаронных изделий были проведены трехфакторные эксперименты на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ  $2^3$  с использованием следующих параметров:

- вращающий момент смешивания;
- угловая скорость вращения шнека;
- коэффициент сопротивления матрицы экструдера.

В качестве критериев эффективности взяты:

- комплексный показатель качества макаронных изделий (КПК);
- экспертная оценка свойств сырых и готовых макаронных изделий (ЭО);
- удельные затраты энергии на проведение процесса (УЗЭ).

По результатам эксперимента получены уравнения регрессии, адекватно описывающие экспериментальные данные при уровне значимости  $P = 0,95$ :

- для экспертной оценки свойств макаронных изделий:

$$\begin{aligned} \text{ЭО} = & 373,75 - 93 \cdot \omega_3 - 12,12 \cdot M_c - 100,9 \cdot k_{cm} - 17,37 \cdot \omega_3 \cdot M_c + \\ & + 20,2 \cdot M_c \cdot k_{cm} + 23,12 \cdot \omega_3 \cdot M_c \cdot k_{cm} + 52,24 \cdot \omega_3^2 + 63,63 \cdot M_c^2 - 134,7 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

- для комплексного показателя качества макаронных изделий:

$$\begin{aligned} \text{КПК} = & 68,92 - 12,57 \cdot \omega_3 - 2,3 \cdot M_c - 9,83 \cdot k_{cm} + 3 \cdot \omega_3 \cdot k_{cm} + 19,5 \cdot \omega_3^2 + \\ & + 9,5 \cdot M_c^2 - 21,3 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

- для удельных затрат энергии на проведение процессов смешивания и прессования:

$$\begin{aligned} \text{УЗЭ} = & 63,13 - 10,7 \cdot \omega_3 + 18,18 \cdot M_c - 11,8 \cdot k_{cm} - 4,25 \cdot \omega_3 \cdot M_c + \\ & + 5,58 \cdot M_c \cdot k_{cm} - 4,16 \cdot \omega_3 \cdot M_c \cdot k_{cm} - 1,9 \cdot \omega_3^2 - 1,8 \cdot M_c^2 + 1,3 \cdot k_{cm}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\omega_3$  - угловая скорость вращения шнека пресса-экструдера;

$M_c$  - крутящий момент после смешивания;

$K_{cm}$  - коэффициент сопротивления матрицы.

Для перевода величин, входящих в уравнения, в натуральную размерность, можно воспользоваться нижеприведенными выражениями

$$\begin{aligned} \omega'_3 &= 5 \cdot \omega_3 + 15 \\ M'_c &= 750 \cdot M_c + 1250 \\ k'_{cm} &= 18 \cdot k_{cm} + 22 \end{aligned} \quad (9)$$

Графоаналитическую оптимизацию процесса проводили путем построения поверхностей отклика и их наложения. На рисунке 1 представлен пример полученной поверхности отклика.

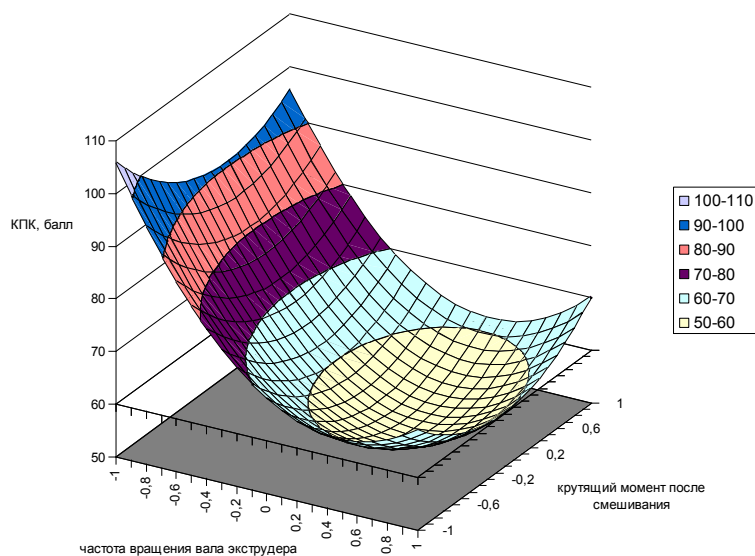
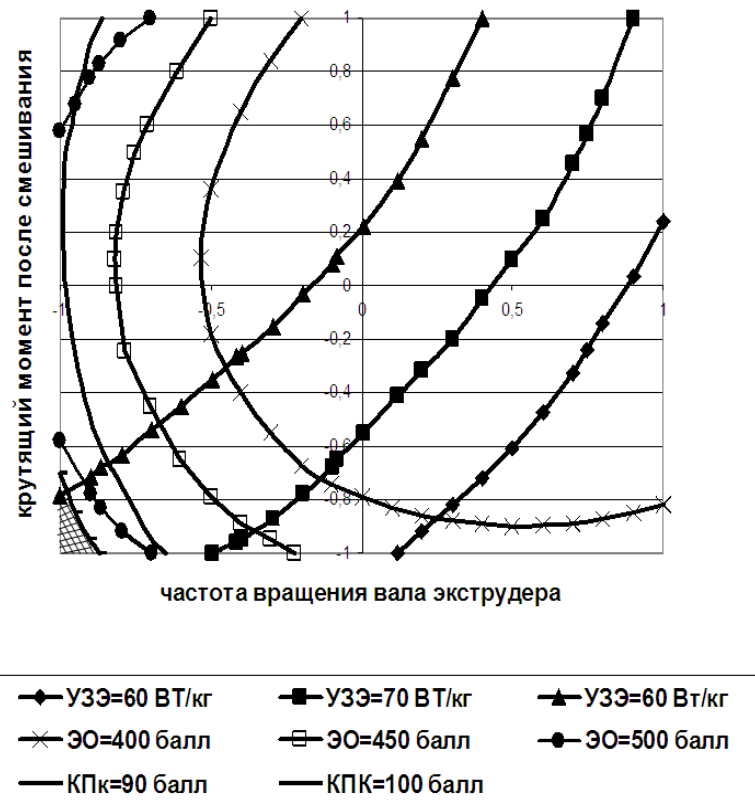
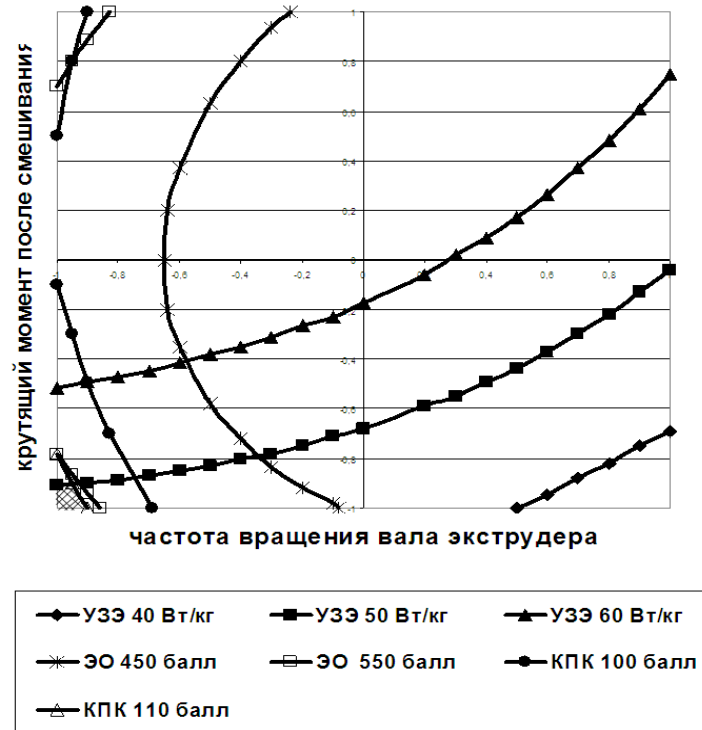


Рис. 1. Зависимость комплексного показателя качества от частоты вращения вала экструдера и крутящего момента после смешивания при  $K_{см} = 4\%$  (-1 у.е.)

Для проведения графоаналитической оптимизации использовались горизонтальные проекции полученных плоскостей отклика.

Рис. 2. Оптимизация процесса экструдирования  $K_{см} = 4\%$  ( $= -1$  у.е.)Рис. 3. Оптимизация процесса прессования ( $K_{см} = -0,5$ )

Анализ диаграммы (рисунок 3), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж1, 31, И1) показывает, что для  $k_{см} = -0,5$  оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 550 баллов, КПК = 110 баллов, УЗЭ = 60 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 38 рад/с ( $-1 \div -0,73$  в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 562 Н\*м ( $-1 \div -0,917$  в безразмерном выражении).

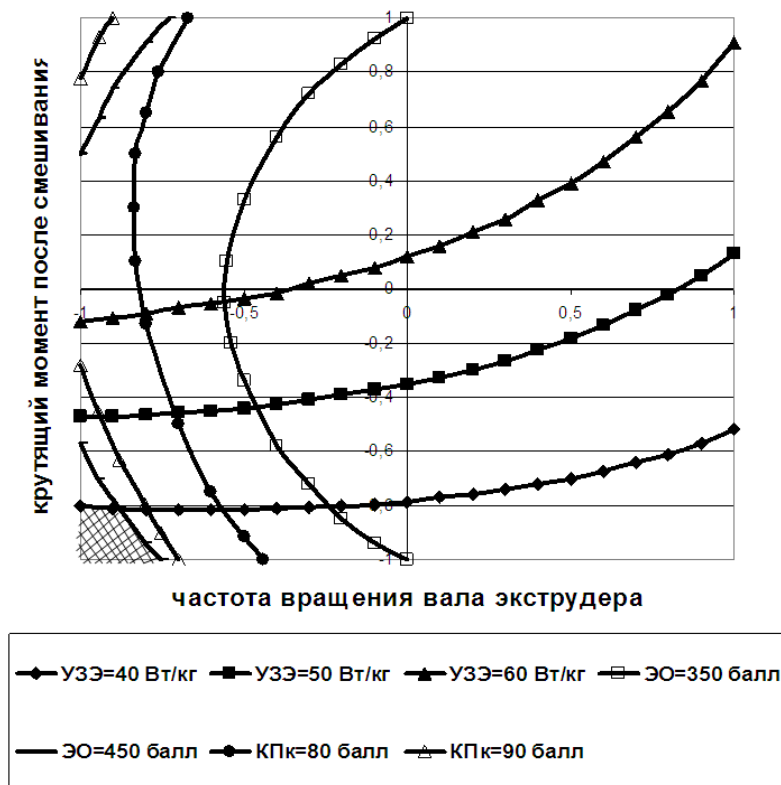


Рис. 4. Оптимизация процесса прессования ( $K_{см} = 0$ )

Анализ диаграммы (рисунок 4), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж2, 32, И2) показывает, что для  $k_{см} = 0$  оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 550 баллов, КПК = 110 баллов, УЗЭ = 50 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 33 рад/с ( $-1 \div -0,9$  в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 575 Н\*м ( $-1 \div -0,9$  в безразмерном выражении).

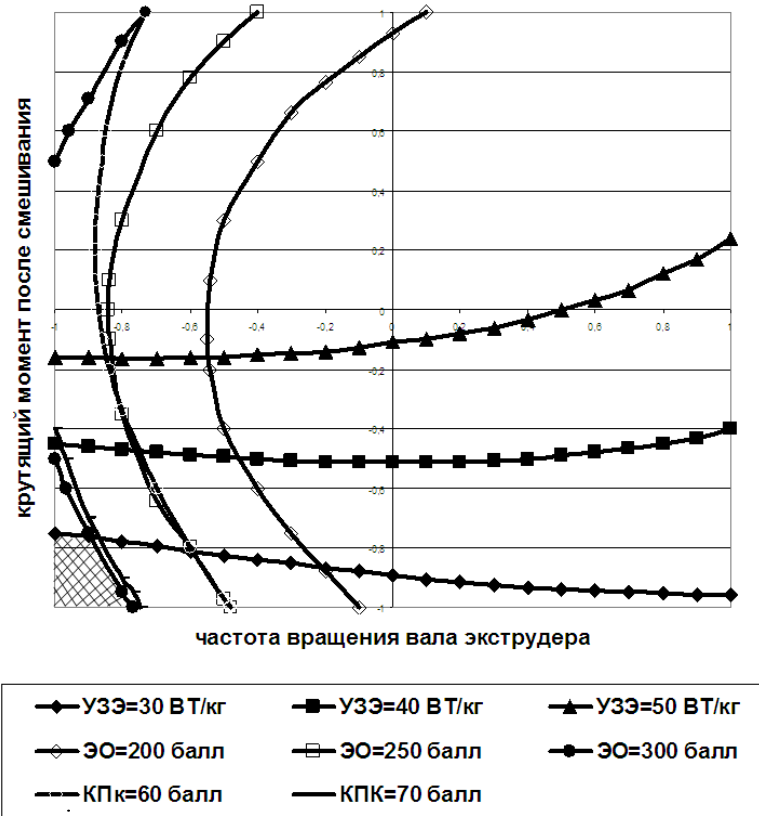


Рис. 5. Оптимизация процесса прессования ( $K_{см} = 0,5$ )

Анализ диаграммы (рисунок 5), полученной в результате наложения поверхностей (приложения ЖЗ, ЗЗ, ИЗ) показывает, что для  $k_{см} = 0,5$  оптимальная область, ограничена линиями: ЭОц = 450 баллов, КПк = 90 баллов, УЗЭ = 30 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 37,4 рад/с ( $-1 \div -0,753$  в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 650 Н\*м ( $-1 \div -0,8$  в безразмерном выражении).

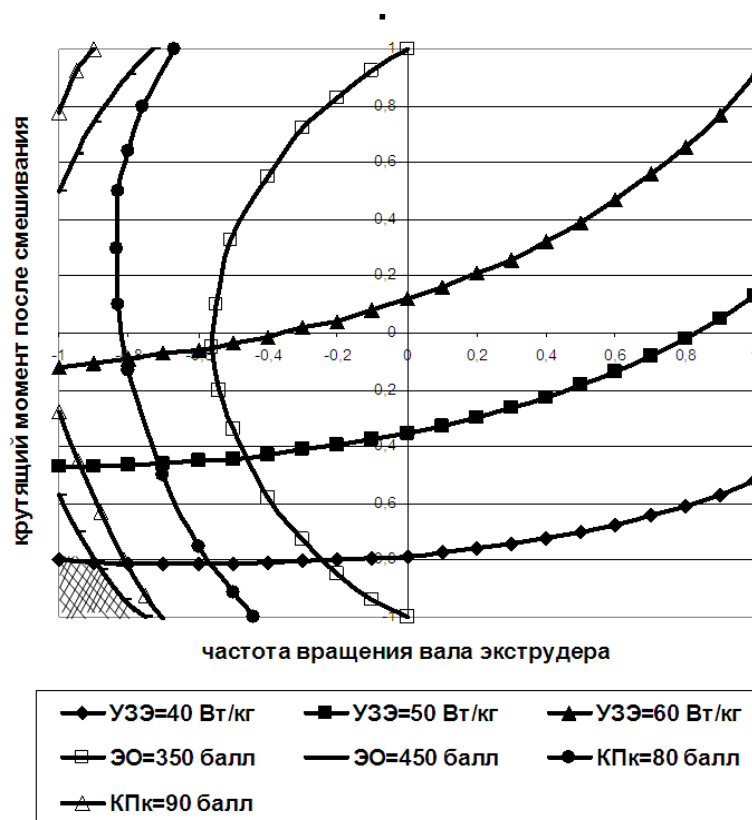


Рис. 6. Оптимизация процесса прессования ( $K_{см} = 1$ )

Анализ диаграммы (рисунок 6), полученной в результате наложения поверхностей (приложения Ж4, 34, И4) показывает, что для  $k_{см} = 1$  оптимальная область, ограничена линиями: ЭО = 300 баллов, КПК = 70 баллов, УЗЭ = 40 Вт/кг. При этом угловая скорость шнека экструдера должно составлять от 30 до 36,9 рад/с (-1÷-0,77 в безразмерном выражении), крутящий момент после смешивания от 500 до 687 Н\*м (-1÷-0,75 в безразмерном выражении).

В результате наилучшие параметры эффекта получены для матрицы с  $k_{см} = 0$  у.е. Уменьшение коэффициента сопротивления матрицы приводит к небольшому снижению качества полуфабриката и к увеличению удельных затрат энергии. Увеличение коэффициента сопротивления матрицы приводит к снижению удельных затрат энергии при значительном ухудшении качества полуфабрикатов.

Результаты графоаналитического поиска оптимальных параметров процессов смешивания и прессования сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Оптимальные параметры процессов смешивания и прессования

$K_{см}, \%$	$\omega_{э}, \text{об/мин}$	$M_c, \text{Н*м}$
4	30...34	500...665
13	30...38	500...562
22	30..33	500...575
31	30...37,4	500...650
40	30...36,9	500...687



Разработанная математическая модель позволит путем измерения крутящего момента на выходе из экструдера рассчитать реологическое состояние макаронного теста в любой точке экструдера, что в свою очередь позволит грамотно рассчитать конструкцию экструдера.

Полученные уравнения взаимосвязи коэффициентов уравнений модели от технологических параметров позволяют наиболее полно учесть особенности перерабатываемого материала в математической модели.

Попадание в данные границы диапазонов эффективности обеспечивает максимально высокое качество макаронных изделий.

### **Библиографический список:**

1. Чернов М.Е. Анализ макаронного производства и возможные направления его совершенствования // Хлебопечение России, 1998, №2. – С.20 – 21.
2. Карташов Л.П., Полищук В.Ю. Системный синтез технологических объектов АПК. – Екатеринбург: УроРАН, 1998. – 183 с.
3. Малышкина, В.А. Применение нетрадиционного сырья для производства макаронных изделий / В.А. Малышкина, Г.Б. Зинюхин, А.Г. Белова, Г.А. Сидоренко, В.П. Попов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2004. № 2. С. 168 – 170.
4. Бочкарева, И.А. Оптимизация процесса производства макаронных изделий специального назначения с использованием тыквенной мезги / И.А. Бочкарева, В.П. Попов, А.Г. Зинюхина // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 9 (170). С. 226 – 230.
5. Шрейдер, М.Ю. Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение / М.Ю. Шрейдер, В.А. Малышкина, Е.В. Ханина, В.П. Попов, А.М. Пищухин // патент на изобретение RUS 2293316 21.10.2004.
6. Горбатов, А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов/ под ред. А.В. Горбатова, А.М. Маслова, Ю.А. Мачихина и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность, – 1982. – 296 с.
7. Launay B., Guveliver G. Matériaux alimentaires et rhéologie// Ind. Alim.et. agr, 1999.116, №11.- S. 37- 48.
8. Tscheuschner H. D., Doan Du. Modellierung rheologischer Eigenschaften fester Lebensmittel, dargestellt am Beishiel Apfel// Lebensmittelindustrie, 32 (1985), H.6. – S. 251 – 255.
9. Попов, В.П. Разработка технологии производства сухих полуфабрикатов крекеров с использованием варочных экструдеров / В.П. Попов // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москва, 1995. – 22 с.
10. Выгодин, В.А. Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В.А. Выгодин, В.Л. Касперович, Г.Б. Зинюхин, В.П. Попов, В.А. Буцко // Пищевая промышленность. 1995. № 7. С. 4.
11. Назаров Н.И. Технология макаронных изделий. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 288 с.
12. Пищухин, А.М. Конструирование сложного технологического оборудования на основе метасистемного подхода / А.М. Пищухин, В.П. Попов // Сборник материалов Международной научной конференции, посвященной 60-летию Оренбургского государственного университета: Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации. Оренбург, 2015. С. 34 – 40.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 09Г2С В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ НА МЕТАЛЛ СВАРНОГО ШВА

*А. М. Файрушин, к.т.н., доцент кафедры ТНА*  
*Д. В. Каретников, к.т.н., доцент кафедры ТНА*  
*А. С. Романчук, магистрант гр. ММА-17-01*  
*Уфимский государственный нефтяной технический университет,*  
*450062, г.Уфа, Космонавтов,1,*  
*Тел. 8-987-490-6585*  
E-mail: rushaniya\_romanchuk@mail.ru

На сегодняшний день существует несколько способов получения габаритных металлических конструкций. Более технологичным способом, как правило, является изготовление с применением сварочных технологий.

Одним из недостатков получения конструкции с помощью сварки является то, что свойства сварных соединений редко достигает 80% свойств основного металла. Объясняется это тем, что сварное соединение является концентратором напряжений из-за температурных деформаций, различных дефектов и структурных изменений. Для улучшения механических свойств сварных соединений и повышения ресурса работы применяют различные способы термической обработки. Недостатком таких действий является существенные энерго- и трудозатраты, невозможность использования в труднодоступных местах, снижение качества поверхности и т.д.

Относительно новым, еще достаточно неизученным способом повышения качества сварных соединений является вибрационная обработка: обработка затвердевшего, расплавленного и кристаллизующегося металла [1-2]. Более эффективным является способ фоновой вибрационной обработки соединений непосредственно в процессе сварки. При вибрации жидкий металл в процессе своего затвердевания подвергается воздействию быстро чередующихся динамических импульсов, которые вызывают то потерю весомости, то компрессию металла за счет резкого изменения его эффективного веса. При потере весомости усиливается выделение растворенных газов и коагуляция их пузырьков; при последующем сжатии металла эти пузырьки усиленно выталкиваются на поверхность. То же происходит с неметаллическими включениями [3].

Зарождающиеся кристаллы под действием вибрационных импульсов не способны в начале процесса затвердевания металла удержаться на поверхности формы, в особенности, если ускорение будет значительным. Они будут отталкиваться более нагретыми частицами в сторону центра и одновременно устремляться вниз. В результате возрастает однородность структуры металла по толщине шва. Структура показывает значительное измельчение металла: улучшаются механические свойства, значительно увеличивается физическая плотность металла. Это позволяет получить более широкий спектр положительных эффектов. Так же возможен локальный ввод упругих колебаний, что значительно снижает требуемую мощность вибрационных устройств и повышает универсальность метода. Из различных источников известно, что при вибрации также наблюдается увеличение усадочной воронки прибыли. Практически устраняется ликвация. Можно получать также специальные структуры сплавов [3-5].

В данной статье приводятся исследования влияния основных параметров вибрационного нагружения на сварочную ванну упругими колебаниями, а также определения предельных режимов виброобработки в процессе сварки сварных соединений из низкоуглеродистых сталей.

Сварка образцов и наложение вибрационных колебаний осуществлялись в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1. Далее из сваренных пластин были изготовлены образцы для исследования влияния режимов вибрационной обработки на уровень остаточных напряжений и свойства металла сварных соединений.

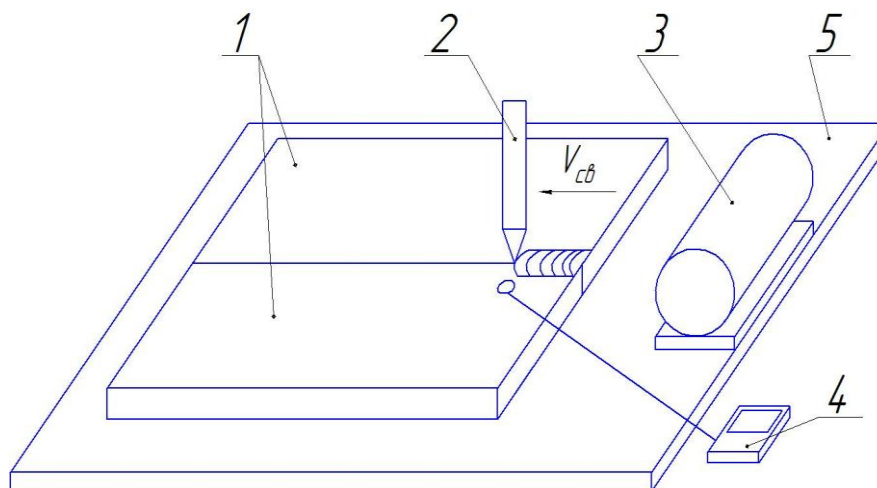


Рис. 1. Схема сварки с наложением вибрационных колебаний

Здесь приняты следующие обозначения:

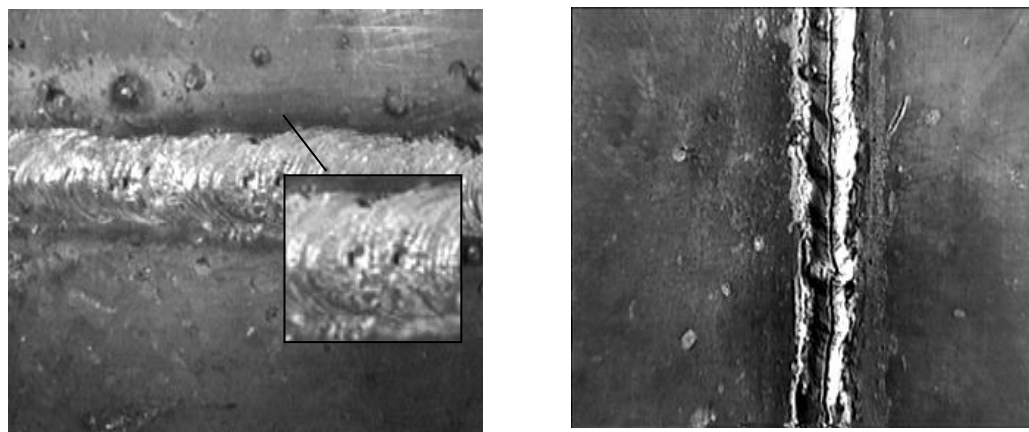
1 – свариваемые пластины; 2 – сварочная проволока трактора; 3 – вибрационное устройство, 4 – прибор для контроля параметров вибрации; 5 – сварочный стол.

Как подтверждают многочисленные исследования, наилучший эффект от применения вибрационной обработки в процессе сварки достигается при амплитудах вибрации 1.0 мм, при частоте от 50 и до 400 Гц. При литье амплитуду вибрации увеличивают до 3...10 мм, при этом частоту вибрации снижают до 30 Гц. Во многом это связано с тем, что при увеличении амплитуды вибрации (с увеличением мощности вводимых упругих колебаний) происходит увеличение свободной энергии, которая расходуется на обламывание ветвей дендритов и создание в системе дополнительных центров кристаллизации. Однако, в процессе сварки применение амплитуды вибрации более 1 мм приводит к снижению механических свойств металла шва, образованию трещин, пор и других дефектов.

Исследования по определению эффективных режимов вибрационной обработки в процессе сварки были выполнены в лабораторных условиях с использованием вибростенда ВЭС -400 и специально разработанного вибростола, на котором крепились электромеханический, либо пневматический вибратор.

Анализируя исследования предельных параметров вибрационной обработки можно установить, что визуально качественного сварного соединения можно добиться на режимах вибрации с различной частотой вибрации, но с амплитудой виброперемещения не более 1...1.2 мм. Использование амплитуды выше этих

значений повышало вероятность появления визуально определяемых дефектов в виде пор (рисунок 2,а), либо горячих трещин (рисунок 2,б) в сварном шве. Это объясняется низкой деформационной способностью металла в первоначальный момент кристаллизации, характеризуемый температурным интервалом хрупкости.



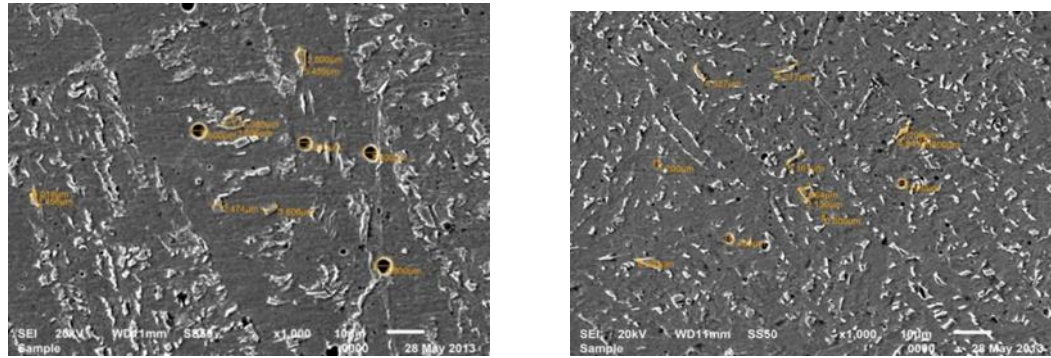
а) поры в шве, возникающие при амплитуде вибрации 1.2..1.8 мм      б) горячие трещины, возникающие при амплитуде вибрации 2.0..2.5 мм

Рис. 2. Дефекты сварных швов, полученных с применением операции вибрационной обработки в процессе сварки

Влияние таких параметров, как частота, виброскорость и виброускорение в пределах допустимой амплитуды вибрации не замечено. В работе проведена серия различных исследований, подтверждающих влияние вибрационной обработки в процессе сварки на структуру металла и сварочной ванны.

Эльдарханов А.С. и др. исследователи в своих работах доказали повышение плотности отливок при вибрационной обработке, что в дальнейшем благоприятно влияет и на другие свойства металла. Однако, влияние вибрационного воздействия сварочной ванны на повышение плотности металла сварного шва не рассмотрено в известных работах. С целью определения влияния вибрационной обработки на плотность металла сварного шва были проведены исследования снимков структуры на растровом электронном микроскопе JEOLJSM-6610LV.

Полученные снимки микроструктуры металла сварного шва стали 09Г2С с 1000-кратным увеличением приведены на рисунке 3. Как видно из данных снимков, вибрационная обработка позволяет значительно снизить размеры и площадь микрополостей в металле сварного шва, снизить размеры зерен и повысить однородность и в определенной степени плотность структуры.



а) без вибрации

б) амплитуда вибрации  
0.4-0.8 мм, частота 50 ГцРис.3. Микроструктура металла сварного шва,  $\times 1000$ 

Обработка данных снимков показала, что диаметры максимальных микрополостей с применением вибрационного воздействия на металл сварочной ванны снижаются практически в 2.8...3 раза, а общая площадь полостей - в 1.48.

Для оценки влияния режимов сопутствующей вибрационной обработки (в/о) на особенности микроструктуры сварных соединений из пластин были изготовлены шлифы для анализа микроструктуры образцов. Визуальный анализ микроструктуры металла сварного соединения проводился на оптическом микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21 с увеличением в 300 раз в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.

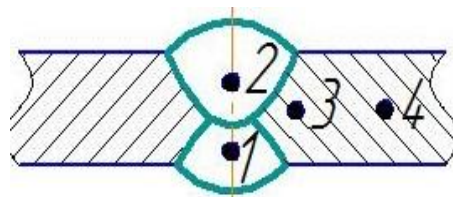


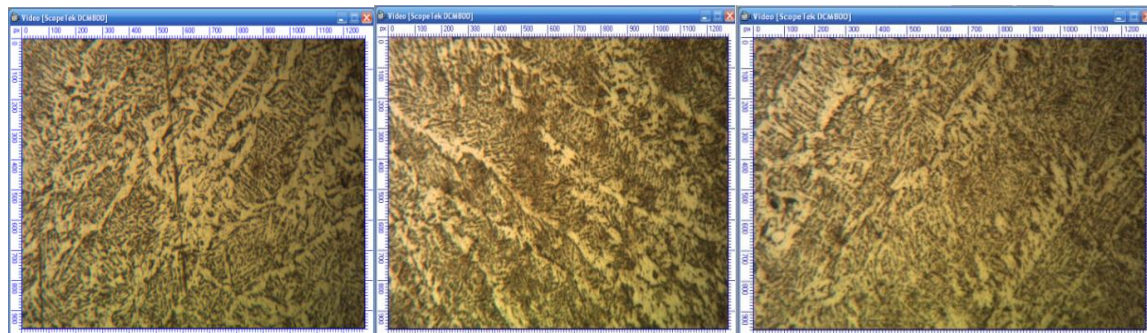
Рис. 4. Схема точек для анализа микроструктуры различных участков сварного соединения

Здесь приняты следующие обозначения:

Точка 1 – участок шва первого прохода; 2 – участок шва второго прохода; 3 – участок зоны термического влияния; 4 – участок основного металла.

На рисунке 5 представлена микроструктура металла лицевого валика шва - точка 1 в соответствующей вышеприведенной схеме. На рисунке 6 - микроструктура металла обратного валика (рисунок 4, точка 2). На рисунке 7 - микроструктура участка зоны термического влияния (рисунок 4, точка 3). На рисунке 8 - микроструктура основного металла (рисунок 4, точка 4).



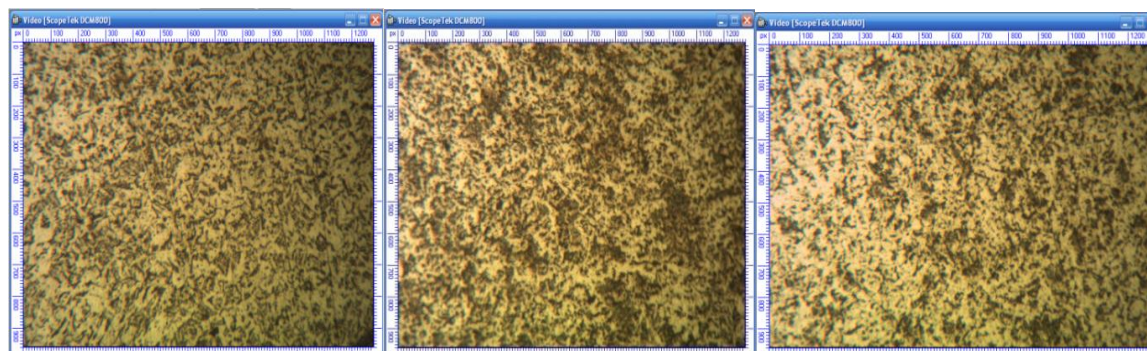


а) без обработки

б) в/о  $f=50$  Гц

в) в/о  $f=150$  Гц

Рис. 5. Микроструктура металла шва первого прохода, х300

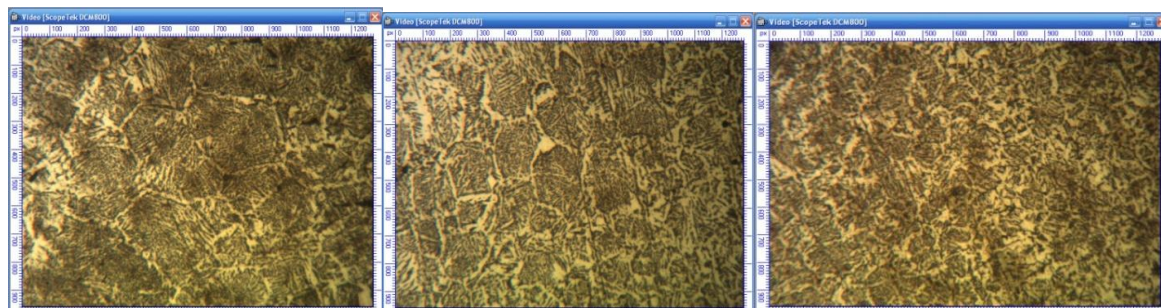


а) без обработки

б) в/о  $f=50$  Гц

в) в/о  $f=150$  Гц

Рис. 6. Микроструктура металла шва второго прохода, х300

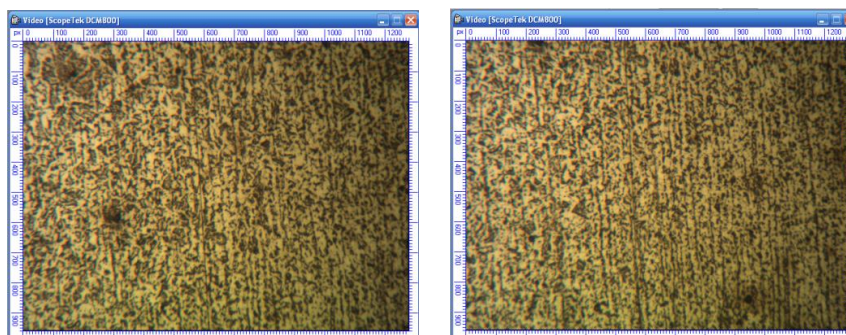


а) без обработки

б) в/о  $f=50$  Гц

в) в/о  $f=150$  Гц

Рис. 7. Микроструктура металла зоны термического влияния, х300



а) без обработки

б) в/о  $f=150$  Гц

Рис. 8. Микроструктура участка основного металла, х300

Произведя визуальный анализ снимков, представленных на рисунке 5, можно установить, что с увеличением возмущающейся частоты сопутствующей вибрационной обработки происходит уменьшение направленности микроструктуры металла лицевого валика сварного шва за счет возникновения в дендритной структуре ветвей дендритов второго и третьего порядка, которые характеризуются меньшими размерами и большей разнонаправленностью в поперечной плоскости шва.

Микроструктура металла сварного шва второго прохода каких-либо значительных изменений, в зависимости от режима обработки, не показала.

Анализ снимков микроструктуры участка металла зоны термического влияния (рисунок 7) выявил снижение размеров зерна участка перегрева. А это, в свою очередь, является значимым фактором, влияющим на прочность при переменных (циклических) нагрузках, особенно, при эксплуатации конструкций в условиях пониженных температур.

Микроструктура основного металла, находящегося вблизи сварного соединения и испытывающего вибрационные нагрузки аналогичные металлу сварного шва остается без изменений.

Из снимков микроструктуры видно, что наибольшее влияние наложение вибрационных колебаний в процессе сварки оказывает на микроструктуру металла лицевого валика (шва второго прохода) и зоны термического влияния. При этом для лицевого валика с увеличением частоты вибрации происходит снижение направленности микроструктуры металла за счёт дробления дендритных ветвей, а в зоне термического влияния наблюдается снижение средней площади размера зерна.

Показанное выше повышение прочностных свойств с точки зрения микроструктуры объясняется, во-первых, вследствие снижения средней площади зерна, во-вторых, благодаря возрастанию количества перлитной фазы в металле сварного соединения с увеличением интенсивности вибрационной обработки. Оценка балла феррито-перлитной структуры проведена компьютерным анализом снимков микроструктуры различных зон сварного соединения с применением программы SIAMS. Результаты оценки приведены в таблице 1, из которой видно, что с увеличением частоты вибрационного воздействия происходит незначительное снижение балла структуры.

Таблица 1. Результаты определения размера зерна феррито-перлитной структуры в программе SIAMS

Частота вибрации, Гц	Размер зерна феррито-перлитной структуры, балл			
	ОМ	ЗТВ	СВ1	СВ2
0	7.5	7.8	7.9	7.2
50	7.5	7.6	7.8	7.1
100	7.5	7.3	7.2	7.0
150	7.5	7.1	7.1	7.0
200	7.5	7.1	7.0	7.0

Примечание: ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; СВ1 – второй шов; СВ2 – первый шов.

Увеличение прочности обрабатываемых сварных соединений подтверждают и результаты измерения микротвёрдости металла. Для исследования влияния режимов вибрационной обработки на микротвёрдость различных участков сварного соединения нами по ГОСТ 9450 были произведены измерения по схеме, представленной на рисунке 9. Шаг измерений на участке сварного шва составлял 0.25 мм, в зоне термического влияния – 0.50 мм. Оценка твердости производилась при помощи микротвердомера ПТМ-3М1 вдавливанием трехгранной алмазной пирамиды при нагрузке 0.981 Н по зернам перлитной фазы.

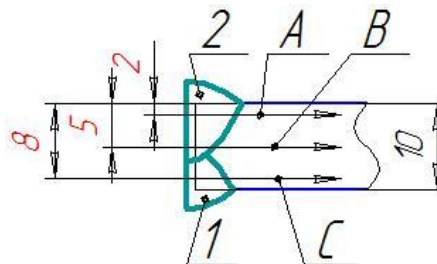
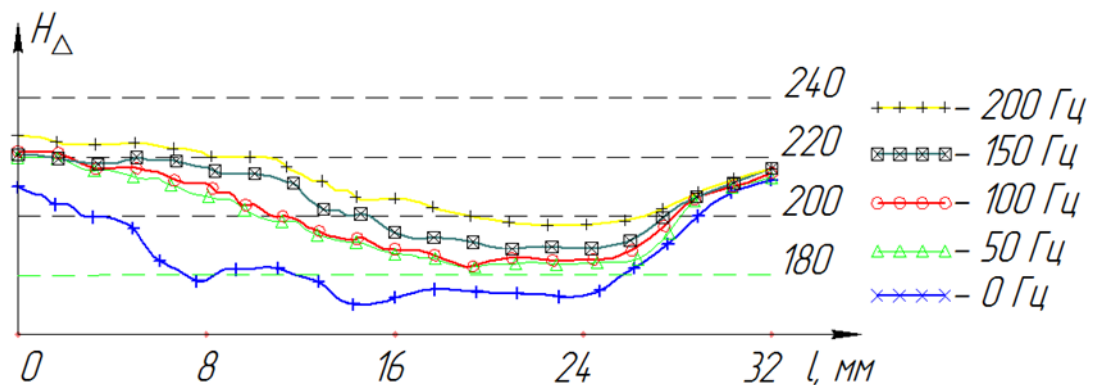


Рис. 9. Схема измерения микротвёрдости

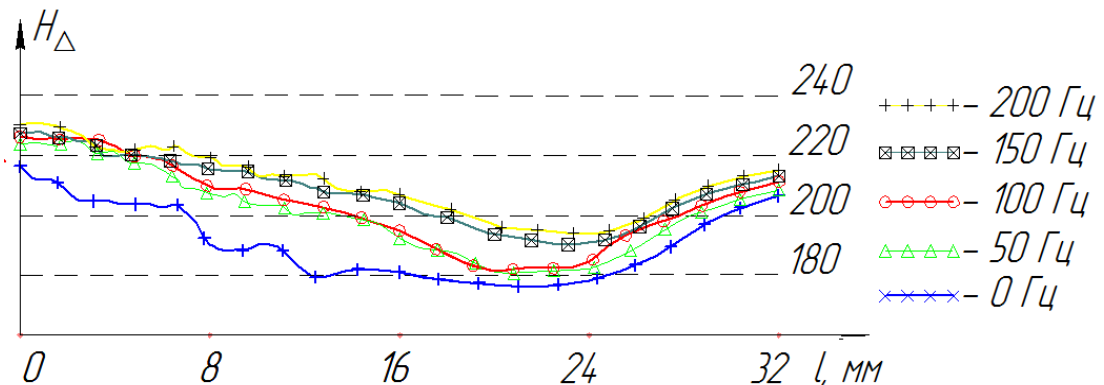
Здесь приняты следующие обозначения:

1 – шов первого прохода; 2 – шов второго прохода; А, В, С – линии измерения микротвердости.

Распределение значений микротвердости металла сварного шва по линиям А, В и С представлено на рисунке 10.

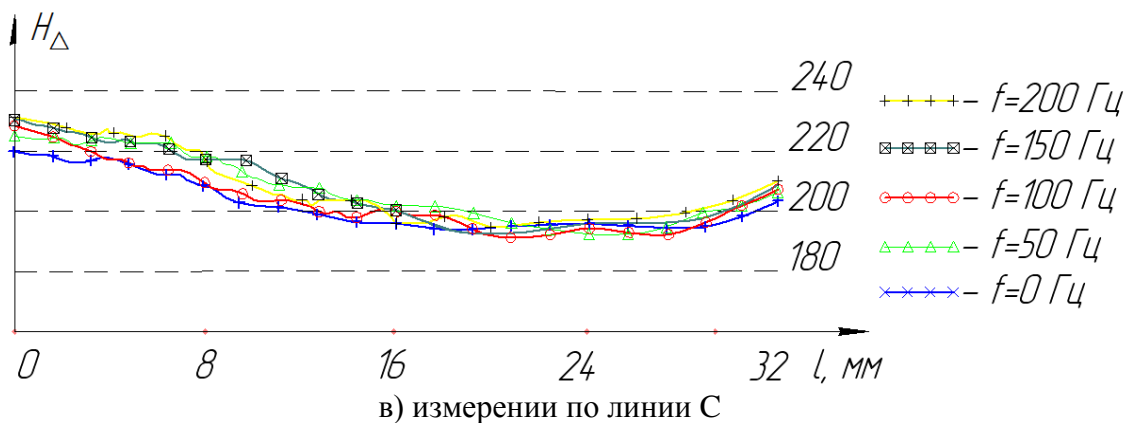


а) измерение по линии А



б) измерение по линии В





в) измерении по линии С  
Рис. 10. Распределение микротвердости металла по ширине сварного соединения

Анализ кривых распределения микротвердости по различным участкам сварного соединения показывает, что с увеличением частоты вибрационного воздействия происходит смещение кривых вверх по координатной сетке, т.е. происходит увеличение механических характеристик зерен перлитной фазы. Это в свою очередь подтверждают и результаты механических испытаний металла сварного соединения, представленных в работах [5-6]. При этом с увеличением частоты вибрационного воздействия, происходит сглаживание кривых микротвердости, что свидетельствует о снижении неоднородности механических свойств по ширине сварного соединения. Это в свою очередь увеличивает объем металла сварного соединения, вовлекаемого в пластическую деформацию при статическом нагружении сварных соединений, что является фактором увеличивающим характеристики статической прочности.

Проведенные исследования доказывают положительное влияние вибрационного воздействия на структуру кристаллизующегося металла сварочной ванны. В отличие от вибрационного воздействия при литье, в процессе сварки вибрационную обработку необходимо проводить при больших значениях частоты (100..200 Гц) и меньшей амплитуде (до 1 мм).

#### Список литературы:

1. Сутырин, Г.В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 22 – 24.
2. Каретников Д.В., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Колохов К.С. Повышение надежности нефтегазового оборудования, работающего в условиях значительного перепада температур // Сварочное производство. – 2012. – № 6. – С. 21-25.
3. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995 – 272 с.
4. Игнатьев И.Э., Концевой Ю.В., Игнатьева Е.В., Долматов А.В., Пастухов Э.А. Условия обеспечения турбулентного перемешивания расплавов при их вибрационной обработке низкочастотными колебаниями тигля // Расплавы. – 2010. – №5. – С. 3-9.
5. Голоднов А.И., Сулицин А.В., Хазан Г.Л. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства меди // Расплавы. – 2009. – №5. – С. 38-44.

6. Файрушин А.М., Ризванов Р.Г., Каретников Д.В., Гасимзянов Б.А. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва // Расплавы. – 2017. - № 2. – С. 162-170.

## ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Котыхова Ольга Анатольевна  
кандидат химических наук, доцент кафедры «ХимБиоТех»,  
Московского политехнического университета  
(107023, Москва, ул. Б. Семёновская, 38),  
E-mail: buhtaprov59@mail.ru

Трутнев Николай Степанович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
«Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств»,  
директор центра «Нано МТ»,  
Московского политехнического университета  
(107023, Москва, ул. Б. Семёновская, 38),  
E-mail: trutnev7@yandex.ru

Самойлова Анастасия Сергеевна  
Студентка 2-го курса группы 161-231 Машиностроительного факультета,  
Московского политехнического университета  
(107023, Москва, ул. Б. Семёновская, 38),  
E-mail: tiger.56@mail.ru

### **Введение.**

Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) уже нашли применение в получении полимеров, защитных покрытий, цементов, смазочных материалов с улучшенными свойствами, композиционных материалов с повышенной прочностью, электропроводностью, теплопроводностью и т. д. [1,2]. Эти материалы играют важную роль в машиностроении, в частности, автомобилестроении. В современных автомобилях доля разнообразных пластмассовых деталей постоянно растёт. Исследования в области получения новых полимерных материалов не завершены, и существуют перспективы создания веществ и композитов с новыми свойствами.

МУНТ - порошкообразный материал, технологичный в переработке, может быть введен в различные материалы (полимеры, смазки, цементы) как в сухом виде, так и в виде суспензий [3].

МУНТ образуют дисперсные системы с некоторыми растворителями в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4]. Однако в литературе мало сведений о количественном соотношении смешиваемых компонентов и об условиях получения тех или иных дисперсных систем, об их стабильности и степени дисперсности и методике введения таких суспензий в полимерные матрицы..

Для получения новых ценных свойств МУНТ добавляют в вещества или композиты разной химической природы (углеводородные полимеры, полиэферы, полиамиды), которые находятся в растворах или расплавах. Следовательно, и растворители (и, соответственно, стабилизаторы) для МУНТ требуются разные,

способные сочетаться с исходной матрицей для обеспечения наилучшего смешивания и взаимопроникновения. В этой связи важно исследовать возможность получения стабильных дисперсных систем с МУНТ на основе растворителей разных химических классов с последующим введением их в полимерные вещества. Создание устойчивых мелкодисперсных систем МУНТ в жидких растворителях является актуальной задачей.

Суспензии, содержащие МУНТ, учитывая размеры агломератов нанотрубок, могут быть мелкодисперсными или грубодисперсными. Эта классификация дисперсных систем у разных авторов не всегда совпадает [5,6,7]. Главное, грубодисперсные частицы «быстро оседают или всплывают, что приводит к расслоению фаз» [5], а также при фильтровании через бумажный фильтр остаются на нём и визуально хорошо различимы, поскольку их размеры превышают 10-3см [6]. В отличие от них мелкодисперсные (или микрогенные) частицы участвуют в броуновском движении, проходят через бумажный фильтр, визуально не различимы, их размеры соответствуют интервалу 10<sup>-5</sup> – 10<sup>-3</sup>см.

Целью настоящей работы является получение устойчивых жидкофазных или гелеобразных мелкодисперсных систем, содержащих МУНТ, на основе разных растворителей для обеспечения введения этих систем в матричные вещества или композиты.

#### **Методика эксперимента**

В данной работе исследована возможность диспергирования МУНТ марки DEALTOM [8] в таких растворителях как 1) вода дистиллированная и вода с электролитами с концентрацией не более 2%: 2) гексан, бензол, толуол, этанол, изопропанол, ацетон, динониловый эфир фталевой кислоты, этиленгликоль, глицерин, этилацетат, дихлорэтан, тетрахлорметан, N-метилпирролидон.

Навеску МУНТ вначале смешивали с небольшим количеством растворителя, оставляли на час, затем добавляли ещё растворитель и диспергировали в ультразвуковой ванне (частота 28 кГц, мощность 50 Вт) при температуре 20°C. Время диспергирования определялось опытным путём по внешнему виду дисперсной системы (однородная или с крупными, визуально различимыми частицами дисперсной фазы) и наличием (или отсутствию) осадка МУНТ. Мелкодисперсную смесь сливали, остатки растворителя выпаривали на водяной бане и осадок взвешивали. Доведя осадок до минимума, определяли наиболее подходящее соотношение масс смешиваемых веществ и оптимальное время диспергирования. В наших условиях заметное диспергирование наступало после 20-ти минутной обработки УЗ, оптимальное время – 30 минут.

Учитывая, что МУНТ обладают электропроводимостью [9], представляло интерес оценить изменение электропроводности растворителей разной химической природы при введении в них МУНТ. Электропроводность определялась при помощи кондуктометра «Эксперт – 002» в диапазоне значений от 0,01 до 199900 мкСм/см при постоянной температуре. Для выбранной концентрации МУНТ осуществлялось, как минимум, по три измерения удельной электропроводности (УЭП). Если относительная погрешность измерений не превышала 2% (как рекомендуется в описании к прибору), то выбиралось среднее значение.

Нанотрубка представляет собой многослойную сетку из sp<sup>2</sup>-гибридных атомов углерода [9], являясь пространственным полимером. Если дисперсные системы полимеров гидрофобны и неустойчивы, то они могут быть

стабилизированы введением дополнительных природных или синтетических растворимых полимеров [10,11], поэтому для усиления дисперсности и стабилизации полученных систем были добавлены природные (желатин и крахмал), и синтетические (поливинилпирролидон и поливиниловый спирт) полимеры.

Оптимальное соотношение МУНТ, полимера и растворителя определялось опытным путём по «однородности» дисперсной системы и массе осадка из МУНТ. Осадок не содержал полимеры, так как они полностью растворялись.

Однородность полученных таким образом стабильных мелкодисперсных систем дополнительно оценивали, наблюдая их в оптическом микроскопе со 100-кратным увеличением объектива.

Мелкодисперсные суспензии с МУНТ вводились в расплавы некоторых полимеров, смешанных с небольшим количеством того же растворителя.

### **Результаты и их обсуждение.**

В результате проведенных исследований показано, что по способности диспергировать в себе МУНТ рассмотренные растворители можно разделить на три категории:

1. Растворители, практически не диспергирующие МУНТ. В них частицы фазы либо не смачиваются и собираются на поверхности, либо опускаются комочками на дно (дистиллированная вода, вода с любыми электролитами, лёгкие углеводороды)

2. Растворители, диспергирующие МУНТ, но некоторые частицы дисперсной фазы визуально просматриваются, а в течение часа МУНТ укрупняются и оседают (глицерин, этиленгликоль, динониловый эфир фталевой кислоты, бензол, толуол, этанол, изопропанол, бутанол, ацетон, N-метилпирролидон).

3. Растворители, хорошо диспергирующие МУНТ (этилацетат, дихлорэтан, тетрахлорметан). Полученные смеси на вид однородны, частицы визуально не просматриваются, проходят через бумажный фильтр, однородность сохраняется приблизительно сутки, потом происходит заметная коагуляция.

Учитывая, что МУНТ обладают электропроводимостью, представляло интерес оценить изменение удельную электропроводность (УЭП) некоторых растворителей после введения МУНТ, не зависимо от степени дисперсии.

Получилось, что при данных условиях диспергирования МУНТ практически не повлияли на электрическую проводимость растворителей за исключением толуола. Его проводимость увеличилась почти в 10 раз. Возможно, МУНТ образует с толуолом ассоциаты, способствующие увеличению электропроводимости.

Для усиления дисперсии МУНТ в представленные растворители были добавлены такие стабилизирующие полимеры как: крахмал, желатин, поливиниловый спирт (ПВС) и поливинилпирролидон (ПВП).

Природные полимеры - крахмал и желатин, набухая в воде, по-разному ведут себя по отношению к МУНТ. Желатин способствует образованию устойчивых суспензий, а крахмал нет. В набухший желатин добавили МУНТ и диспергировали ультразвуком. Концентрация желатина в смеси – 5%, а МУНТ – 0,1%.

С синтетическими полимерами мелкодисперсная система получилась на основе ПВП. Макромолекулы ПВП «обволакивали нанотрубки и тем самым устраняли неспособность смачиваться» [11]. Представляло интерес воспроизвести эти системы не только в воде, но и в других растворителях, определить количественные соотношения масс компонентов в смесях и оценить изменение УЭП при введении МУНТ.

ПВП растворим в воде, этаноле, изопропанол, хуже - в этиленгликоле и глицерине. В эти смеси вводились МУНТ. Получилось, что в присутствии ПВП в УЗ МУНТ гораздо сильнее диспергируют, чем в чистом растворителе, образуя мелкодисперсные суспензии. Так в воде в присутствии ПВП и под действием УЗ МУНТ смачиваются и диспергируют. Наиболее удачное соотношение масс компонентов для получения относительно однородной суспензии приблизительно равно 1 (МУНТ) к 10 (ПВП). В частности, можно на 0,01 грамм МУНТ взять 0,1 грамм ПВП при объеме воды 20 мл. Массовая доля МУНТ в такой системе равна около 0,05%. Однако водные суспензии МУНТ неустойчивы. Примерно через 2 часа дисперсность нарушается, МУНТ ассоциируются и выпадают в осадок.

В отличие от дистиллированной воды, в этаноле и изопропанол в присутствии ПВП МУНТ образуют устойчивые мелкодисперсные суспензии на длительное время. Оптимальное весовое соотношение МУНТ к ПВП для спиртовых суспензий составляет 1:4. Массовая доля МУНТ в такой системе составляет приблизительно 0,1%. Доля МУНТ невелика, однако низшие спирты легко испаряются, что даёт возможность при некоторых условиях эту концентрацию увеличить.

В этиленгликоле и глицерине ПВП растворяется хуже, чем в воде или простых спиртах. Однако дисперсные системы МУНТ, образованные в смеси глицерина или этиленгликоля с ПВП, однородны и стабильны.

ПВС не способствует дисперсии МУНТ ни в одном растворителе.

Для систем, содержащих МУНТ, растворители (воду, этанол, изопропанол, этиленгликоль), и растворимые полимеры (ПВП или желатин), определены изменения УЭП при введении МУНТ. В табл. 2 представлены значения УЭП1 растворителя с растворимым полимером (их весовые соотношения указаны в скобках) и УЭП2 растворителя с растворимым полимером и МУНТ, а также абсолютные и относительные изменения УЭП ( $\Delta$ УЭП и  $\Delta$ УЭП/УЭП1). Концентрации МУНТ указаны в весовых процентах.

Таблица 2.

Удельные электропроводности дисперсных систем, содержащих растворитель, растворимый полимер и МУНТ после УЗ диспергирования.

Растворитель / растворимый полимер (весовые соотношения соответственно)	УЭП1 мкСм/см	Концентрация МУНТ, %	УЭП2, мкСм/см	$\Delta$ УЭП, мкСм/см	$\Delta$ УЭП/УЭП1, %
Дистиллированная вода / желатин (100:5)	860,0	0,1	1065,0	205,0	23,8
		0,2	1070,0	210,0	24,4
Дистиллированная вода / ПВП (100:2,5)	95,0	0,1	99,0	4,0	4,2
		0,2	101,0	6,0	6,3

Этанол / ПВП (100:1)	3,2	0,1	8,2	5,0	156,3
		0,2	8,6	5,3	165,6
Изопропанол / ПВП (100:1)	2,6	0,1	6,0	3,4	130,8
		0,2	6,9	4,3	165,4
Этиленгликоль / ПВП (100:0,5)	1,1	0,1	2,1	1,0	90,9
		0,2	2,6	1,5	136,4
N-метилпирролидон / ПВП (100:1)	6,8	0,2	7,8	2,0	29,4

Согласно полученным данным во всех представленных смесях наблюдается тенденция увеличения УЭП при возрастании концентрации МУНТ. Исходя из сравнения относительных изменений УЭП, можно отметить, что наиболее эффективно она растёт в системах со спиртами в качестве растворителей.

Для систем 1) «Этанол – ПВП – МУНТ»; 2) «Изопропанол – ПВП – МУНТ»; 3) «Этиленгликоль – ПВП – МУНТ» зависимость УЭП от концентрации МУНТ представлена графически (рис. 1). Из графиков видно, что при увеличении концентрации МУНТ УЭП возрастает до определённой величины, потом практически не меняется.

Дисперсные системы «Этанол – МУНТ» и «Этанол – ПВП – МУНТ» с концентрациями МУНТ 0,1%, рассмотрены под микроскопом. В системе «Этанол – МУНТ» (рис.2а) просматривались ассоциаты МУНТ с размерами, превышающими 15 мкм, а в трёхкомпонентной системе (рис.2б) частицы дисперсной фазы изолированы с размерами 1-5 мкм. Таким образом, добавление ПВП значительно усиливает дисперсию МУНТ.

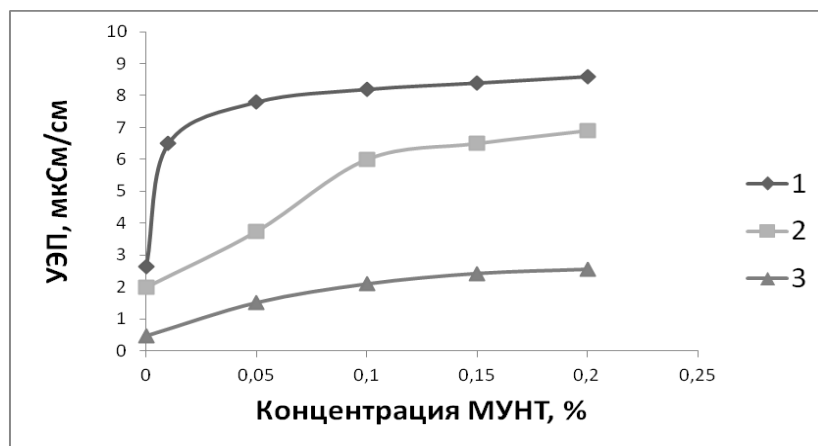


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности (УЭП) от концентрации МУНТ в мелкодисперсных системах с этанолом (1), изопропанолом (2), этиленгликолем (3).

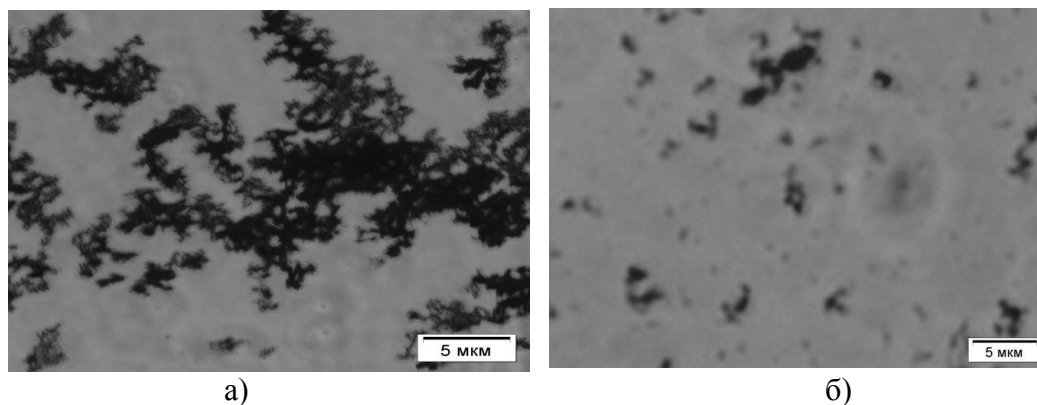


Рис. 2. МУНТ в этаноле а) с ПВП; б) без ПВП после УЗ диспергирования (оптический микроскоп, 100-кратное увеличение объектива)

Полученные трёхкомпонентные мелкодисперсные системы были введены в расплавы полимеров, в присутствии небольших количеств соответствующих растворителей. Массовая доля МУНТ составила около 0.03%. Новые модифицированные полимеры (МП) обладали иными физико-химическими свойствами. В частности, полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, модифицированные МУНТ, стали прочнее и эластичнее.

#### **Выводы.**

1. МУНТ плохо диспергируют в большинстве растворителей за исключением этилацетата, тетрахлорметана, дихлорэтана. Усилению дисперсии способствует добавление растворимых стабилизирующих полимеров, в частности, ПВП и желатина.

2. Присутствие МУНТ ведёт к увеличению электропроводности дисперсных жидких систем. С возрастанием концентрации МУНТ УЭП увеличивается до некоторого предельного значения.

3. Мелкодисперсные системы на основе простых и многоатомных спиртов, N-метилпирролидона с добавлением ПВП, этилацетата, тетрахлорметана, воды с желатином могут быть рекомендованы для добавления МУНТ в различные материалы и смеси, свойства которых меняются даже при очень малых концентрациях МУНТ.

#### **Список литературы:**

1. Губин С. П., Ткачев С.В. Графен и материалы на его основе. //Радиоэлектроника .Наносистемы . Информационные технологии. 2010, Том 2, номер 1-2, стр.99-137.
2. Chatterjee S., Nuesch F.A., Chu B.T.T. Crystalline and tensile properties of carbon nanotube and graphene reinforced polyamide 12 fibers. // Chem. Phys. Lett. 2013, v.557, 92-96.
3. Bourlinos A.B., Georgakilas V., Zboril R., Steriotis T.A., Stubos A.K. Liquid-Phase Exfoliation of Graphite Towards Solubilized Graphenes. //Small, 2009. V. 5. № 16.P. 1841-1845.
4. Ciesielski A., Samori P. Graphene via sonication assisted liquid-phase Exfoliation. //Review Article. Chem. Soc. Rev. 2013.№43. P. 381-398.
5. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии, Академия, М., 2006, 240с.

6. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. 2-е изд., «Лань», СПб, 2004, 336с.
7. Муллаев Б.Т. Проектирование и оптимизация технологических процессов в добыче нефти. // Т1, Litres, 2017, 533с.
8. Томишко М.М., Демичева О.В., Алексеев А.М., Томишко А.Г., Клинова Л.Л., Фетисова О.Е. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), М., 2008, т. LII, № 5, стр.39-43
9. Раков Э.Г., Углеродные нанотрубки в новых материалах, М., Усп. хим., 2013, т.82, вып.1, стр.27-47.
10. O'Connell M.J., Boul P., Ericson L.M., Huffman C., Wang Y.H., Haroz E., Kuper C. Reversible water-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping. //Chemical physics letters, 2001, vol.342, No.3-4, pp.265-271.
11. Teruo Takahashi, Katsunori Tsunoda, Hirofumi Yajima, Tadahiro Ishii. Isolation of Single-wall Carbon Nanotube Bundles Through Gelatin Wrapping and Unwrapping Processes. // Chemistry Letters, 2002, vol. 31, No. 7, pp. 690-691

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*А.С. Ложкин, студент гр. 5Г4Б*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,*

*634050, г.Томск, пр.Ленина,30,*

*Тел. 8-913-100-30-65*

*E-mail: anatoij.lozhkin@bk.ru*

**Актуальность.** В условиях децентрализованного электроснабжения, при использовании источников электроэнергии ограниченной мощности, перепады напряжения и частоты могут привести к нестационарным и аварийным режимам работы электрооборудования. Дизельная электростанция (ДЭС) имеет переменную частоту вращения вала, от которой зависит генерируемая частота генератора, а вырабатываемое напряжение будет колебаться в зависимости от нагрузки. Поэтому требуется обеспечить постоянность параметров вырабатываемой электрической энергии (ЭЭ).

Состав электростанции:

Электростанция(рис. 1) состоит из следующих основных элементов:

- Приводной двигатель, включая системы смазки, подачи топлива, охлаждения, выхлопа и шумоподавления. В зависимости от типа привода – бензинового или дизельного двигателя внутреннего сгорания, различают бензиновые электростанции и дизельные электростанции.
- Альтернатор, который вращается от приводного двигателя и генерирует переменное 1-но или 3-х фазное напряжение.
- Контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА) – осуществляют контроль за работой всех составляющих электростанции, реализуют автоматическое включение электростанции при пропадании основного сетевого напряжения, а также защиту двигателя и альтернатора от аварийных режимов и выхода из строя.



- Рама (каркас, корпус) – объемная или плоскостная конструкция, связывающая все перечисленные агрегаты в единый комплекс. В раму чаще всего встраивается штатный топливный бак для работы станции без дозаправки на время от 3 до 15-20 часов [1].



Рис. 1. Общая схема ДЭС

**Дизельная электростанция** выпускается с двигателями внутреннего сгорания с различной частотой оборотов коленчатого вала: 1500 об/мин. или 3000 об/мин. Первые являются малозумными и имеют увеличенный ресурс работы двигателя (наработка на отказ 15000...40000 часов), при необходимости они могут работать без остановки двигателя круглые сутки. Вторые дешевле и меньше по массогабаритным характеристикам, но обладают повышенным шумом, имеют более высокий расход топлива и значительно меньший ресурс.

В дизельных электростанциях для увеличения мощности при сохранении габаритов, веса и объема камеры сгорания применяется турбонаддув. Воздух в двигателях, прежде чем попасть в камеру сгорания, сжимается в турбокомпрессоре. Его турбина приводится в движение выхлопными газами. После сжатия воздух либо сразу направляется в камеру сгорания, либо охлаждается в промежуточном радиаторе и также поступает в камеру сгорания двигателя.

Дизельные электростанции, собранные на высокооборотных двигателях воздушного охлаждения, считаются резервными, с наработкой порядка 500 моточасов в год, их использование в качестве основных источников электроэнергии не рекомендуется. Для круглосуточной работы без ограничения наработки должны применяться дизельные электростанции только с жидкостным охлаждением и с вращением коленвала 1500об/мин. Такие электростанции отличаются долговечностью, оптимальным расход топлива, низким шумом и высоким моторесурсом.

Дизельная электростанция более экономична и надёжна, чем бензиновая, но стоит значительно дороже. Диапазон мощностей очень широк: от нескольких кВт до нескольких МВт. Возможно создание энергосистемы, состоящей из нескольких дизельных электростанций.

Существуют разные виды приводных двигателей. Рассмотрим альтернатор, выполненный в виде синхронного генератора трёхфазного тока.

Синхронные альтернаторы отличаются более высоким качеством вырабатываемой электроэнергии и способностью выдерживать 3-х кратные мгновенные перегрузки. Они построены конструктивно сложнее асинхронных альтернаторов, например, у них на роторе находятся обмотки [2].

Частота выходного напряжения электростанции зависит от частоты вращения приводного двигателя, которая в свою очередь зависит от величины нагрузки и от количества полюсов альтернатора. Чем больше нагрузка, тем меньше частота вращения двигателя и, соответственно, меньше частота выходного напряжения. Чтобы частота вырабатываемой электроэнергии не выходила за пределы, определенные ГОСТом, применяются регуляторы оборотов двигателя.

Частота вращения двигателя стабилизируется двумя видами регуляторов механическими и электронными. В системах аварийного электроснабжения предприятий требуется высокая точность параметров питающей ЭС, поэтому предпочтительны именно электронные регуляторы. Они предназначены поддерживать постоянную частоту 50Гц вне зависимости от суммарной нагрузки на двигатель. Электростанции с электронной стабилизацией частоты вращения двигателя стоят дороже обычных с механическим регулятором.

Воздействуя на рейку топливного насоса, он изменяет и регулирует подачу топлива. Таким образом, благодаря этому устройству происходит стабилизация скорости работающего двигателя и это особенно важно при изменении нагрузок.

Так благодаря регулированию частоты вращения двигателя, расположенного в электроагрегатах, достигаются следующие показатели: в дизельных электростанциях вырабатывается электроэнергия высокого качества или обеспечивается параллельная работа нескольких **дизель-генераторов**.

Электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала двигателя способствует не только выработке электроэнергии высокого качества, но и снижению токсичности выхлопных газов и задымленности. Кроме того, он оказывает влияние на топливную экономичность и ресурс **двигателя** положительным образом, а также защищает мотор в случае возникновения аварийных ситуаций [3].

**Автоматические регуляторы напряжения (AVR)** – это специальные устройства, которые при возможных изменениях нагрузки обеспечивают стабильную и постоянную подачу выходного напряжения. Тем самым защищая от поломок приборы, потребляющие вырабатываемую электроэнергию, а, также, не только предотвращая серьезные перегрузки двигателя электростанции, но и увеличивая в целом коэффициент полезного действия энергетического оборудования.

Стабильная работа дизельной электростанции, в том числе, в аварийных ситуациях напрямую зависит от правильной и точной настройки **AVR**. Ведь именно он незамедлительно отключает дизель-генератор в предаварийных и аварийных случаях, а также в нужный момент создает параллельные подключения энергетического оборудования и центральных электросетей.

Существуют требования, предъявляемые к **автоматическому регулятору напряжения**, вне зависимости от его вида, а также марки используемого генератора. Например, отклонение напряжения выходного тока, которое способен удерживать **AVR**, не должно превышать  $\pm 2,5\%$  в обычном режиме работы и  $\pm 3,5\%$  -

в аварийных ситуациях. При изменении нагрузки не должно наблюдаться резкое снижение напряжения. Поэтому в момент переходных процессов напряжение обязано варьироваться в следующих пределах: не менее 85% и не более 120% от номинальной величины. А по окончании этих процессов **корректор регулятор напряжения** должен в течение 1,5 секунд привести к номинальным значениям величину выходного тока.

Во избежание неприятных ситуаций, связанных с выводом из строя ДЭС, а также приборов, потребляющих вырабатываемую электроэнергию, настройку и проверку **корректора напряжения** должны проводить только специалисты, владеющие специальными знаниями и умениями.

Самостоятельно, не имея определенных навыков в работе с подобным оборудованием, а также без технической документации, невозможно произвести процесс настройки корректным образом, т.к. различные модификации дизельных генераторов даже при одинаковой мощности могут иметь отличные друг от друга динамические и статистические характеристики. Поэтому такой важный вопрос стоит доверять только профессионалам своего дела.

Для стабилизации выходного напряжения можно использовать инверторные преобразователи, которые позволят получить высокую точность в получаемом выходном напряжении (рис.2).

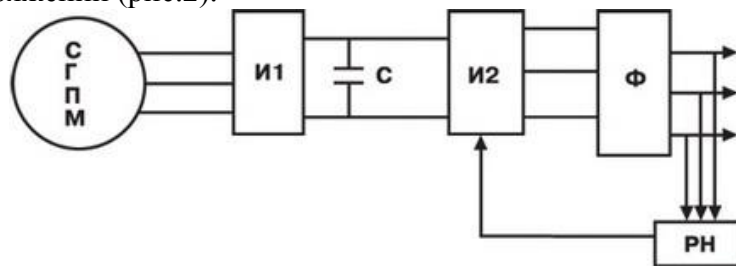


Рис. 2. Схема ДЭС СГПМ с стабилизируемым напряжением

СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами; И1 – инвертор, преобразующий переменный ток в постоянный; С – блок конденсаторов; И2 – выходной инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный; Ф – выходной фильтр; РН – регулятор напряжения.

Установив регулятор напряжения и регулятор частоты вращения (рис. 3) ДЭС будет питать ЭС в соответствии с ГОСТ, приборы, устройства и т.п. будут работать при номинальных значениях напряжения и частоты питающей ЭС [4].

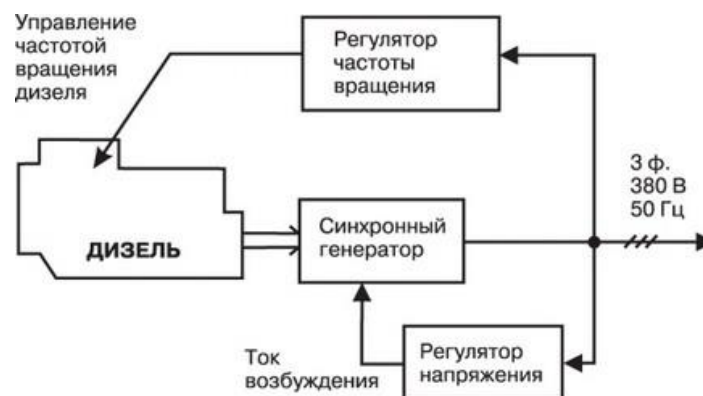


Рис. 3. Классическая схема ДЭС

**Выводы:** обеспечение стабильной электрической энергии залог работы аппаратуры в штатном режиме работы и непрерывности производственного процесса. В данной статье приведены основные методы стабилизации ЭЭ. Другие методы имеют либо большую стоимость реализации, либо масса-габаритные показатели, либо же будут иметь недостаточную точность выходных величин, потому необходимо учитывать, что именно требуется от регулятора и выбирать в соответствии с поставленной задачей.

**Список литературы:**

1. Бесперебойное электроснабжение. Инжиниринговый центр и интернет-магазин. [Электронный ресурс]: Режим доступа: свободный(22.11.17). [http://www.tdm.ru/equipment/section.php?SECTION\\_ID=390](http://www.tdm.ru/equipment/section.php?SECTION_ID=390)
2. Дизельные электростанции. Регуляторы частоты вращения. [Электронный ресурс]: Режим доступа: свободный (22.11.17). <https://www.adkom.ru/reg-chast-vrash/>
3. Дизельные электростанции. Регуляторы напряжения. [Электронный ресурс]: Режим доступа: свободный(22.11.17). <https://www.adkom.ru/avr>
4. Инженерные системы. [Электронный ресурс]: Режим доступа: свободный (22.11.17). <http://stroysss.ru/systems/electrichestvo/395.html>

**ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПРИ НЕКОНСЕРВАТИВНОЙ  
ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛАХ**

*В.Г. Кульков, профессор*

*Филиал Национального исследовательского университета МЭИ,*

*399110, г.Волжский, пр.Ленина,69*

*E-mail: vikulkov@yandex.ru*

Демпфирующая способность металлических материалов определяется уровнем внутреннего трения, рассеивающего энергию вибраций. Это свойство материалов бывает востребованным при эксплуатации механизмов и машин. Весьма важным видом деформации поликристаллических металлов является зернограничное проскальзывание. Известно, что оно определяет значительный вклад во внутреннее трение как пикового, так и фонового характера. Классические модели этого явления используют как правило представления о плоских границах зерен, скольжение по которым имеет однородный характер. Реальные границы всегда содержат неизбежные отклонения от плоских конфигураций и содержат различного рода ступеньки, фасетки и другие неровности. Их учет приводит к смешанному механизму скольжения с большой долей неконсервативных процессов диффузионного характера.

Рассмотрим одномерную модель смещения двух сопрягающихся зерен вдоль границы, содержащей ступени противоположного знака с плоскими участками между ними. Одни из них переводят границу в параллельную плоскость на расстояние, равное высоте ступеньки  $d$ , а другие возвращают назад. Вдоль границы действует переменное напряжение простого сдвига с частотой  $\omega$ . На ступенях имеются нормальные напряжения растяжения и сжатия. Химические потенциалы вакансий на них имеют противоположные знаки, что приводит к их диффузионным

потокам, определяющим скорость проскальзывания.

Общий метод решения подобных задач изложен в [1]. Решается уравнение диффузии для избыточной в сравнении с равновесной концентрации вакансий

$$\frac{\partial C_b(x,t)}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 C_b(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{с граничными условиями} \quad C_b(0,t) = C'_b \exp(-i\omega t),$$

$C_b(l/2,t) = 0$  Это соответствует периодическим условиям на ступеньке и нулевым по концентрации в середине плоского сегмента. Решение имеет вид

$$C_b(x,t) = C'_b \frac{\sin(\gamma(1+i)(l-x))}{\sin(\gamma(1+i)l)} \exp(-i\omega t), \quad (1)$$

где  $\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2D_b}}$ ,  $D_b$  – граничный коэффициент диффузии вакансий,  $x$  – координата

вдоль направляющей плоского участка границы,  $C'_b$  – постоянная, линейно связанная с амплитудой действующего напряжения и определяемая из учета эффекта подстройки напряжения [2]. Скорость взаимного смещения зерен

$x = j d \Omega / d$  выражается через плотность потока вакансий  $j = -2D_b \left. \frac{\partial C_b(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0}$ . Здесь

$\Omega$  – атомный объём,  $\delta$  – диффузионная ширина границы. С такой скоростью проскальзывания связано напряжение на плоских участках границы  $y_1 = z^{-1}x$ , где  $\eta^{-1}$  – эффективная вязкость границы. Баланс сил на плоских участках и ступенях имеет

вид:  $2y_1l = 2lz_x + \frac{C'_b d k T}{C_{0b} \Omega} \exp(-i\omega t)$ . Из выражений для напряжения и скорости

проскальзывания получаем величину внутреннего трения  $Q_1^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W}$ . Здесь в

числителе стоит энергия, рассеянная за один период, а в знаменателе – упругая

энергия, запасённая в объёме  $V_0$  зерна  $W = \frac{V_0 \sigma_0^2}{2G}$ . С учетом (1) находим:

$$Q_1^{-1} = \frac{2iGl \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \sqrt{F(2\gamma l)}}{R^2 z_{ш}} \left[ (\sin(2\gamma l) + \lambda F(\gamma l))^2 + (\text{sh}(2\gamma l) + \lambda F(\gamma l))^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Здесь  $G$  – модуль сдвига,  $R$  – средний размер зерна,  $\theta$  – геометрический фактор,  $l$  – расстояние между ступенями,  $C_{0b}$  – равновесная концентрация вакансий в границе, а

также  $\text{tg} \varphi_1 = \frac{\sin 2l\gamma - \text{sh} 2l\gamma}{\sin 2l\gamma + \text{sh} 2l\gamma + 2\lambda F(\gamma l)}$ ,  $\text{tg} \varphi_2 = \frac{\sin 2l\gamma - \text{sh} 2l\gamma}{\sin 2l\gamma + \text{sh} 2l\gamma}$ ,  $F(z) = \sin^2 z + \text{sh}^2 z$ .

$$\lambda = \frac{d^2 k T}{4D_b d \Omega^2 C_{0b} z \gamma l}$$

Параметр  $\lambda = v_s / v_d$  имеет смысл отношения скорости собственного проскальзывания по границам без ступенек и скорости неконсервативного процесса, реализуемого диффузией между ступеньками. Механизм первого из этих процессов не предполагает диффузии вакансий на дальние расстояния в границе, а определяется долькой локальными перестройками ее атомной структуры [3]. Оценки показывают, что во многих случаях  $\lambda \gg 1$ . Преобразуя выражение (2) в случаях высоких и низких температур, можно получить выражения для внутреннего трения.

$$Q^{-1} = \frac{4\theta G l \Omega^2 \delta C_{0b}}{R^2 d^2 k T} \frac{D_b}{\omega}, \quad \gamma l \ll 1; \quad (3)$$

$$Q^{-1} = \frac{4\theta G l^2 \Omega^2 \delta C_{0b}}{R^2 d^2 k T} \sqrt{\frac{D_b}{\omega}}, \quad \gamma l \gg 1. \quad (4)$$

На рисунке 1 приведена зависимость логарифма величины внутреннего трения от обратной температуры. Согласно (3) и (4) здесь имеются два прямолинейных участка с различающимися в два раза тангенсами углов наклона к оси абсцисс.

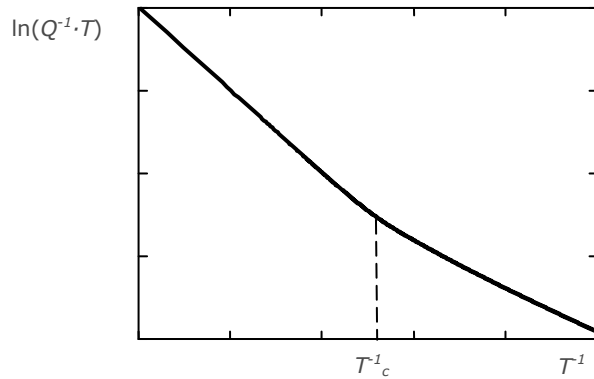


Рис. 1. Характер зависимости логарифма внутреннего трения от обратной температуры в условных единицах.

Подобный результат наблюдался неоднократно ранее в системах с различными неоднородностями на границах [4, 5]. Такой вид зависимости внутреннего трения можно понять из следующих соображений. Поток вакансий из ступеньки определяется градиентом их концентрации, пропорциональным  $j \sim D_b C_b / l_d \sim D_b \sigma_0 / l_d T$ , где  $l_d$  – диффузионная длина вакансий,  $\sigma_0$  – амплитуда напряжения. Тогда потери  $\Delta W$  за период колебаний  $T_0$  пропорциональны  $\Delta W \sim j \sigma_0 T_0 \sim D_b T_0 \sigma_0^2 / l_d T$ , упругая энергия  $W \sim \sigma_0^2$ . Следовательно,  $Q^{-1} \sim D_b T_0 / l_d T$ .

При низких частотах или высоких температурах диффузия успевает пройти на всем плоском сегменте, поэтому за диффузионную длину можно принять его размер  $l$ , который от периода колебаний не зависит, тогда  $Q^{-1} T \sim D_b T_0 \sim D_b / \omega$ . В области высоких частот или низких температур основную роль в диффузионных процессах играют области вблизи границ сегмента протяженностью  $l_d \sim \sqrt{2 D_b T_0}$ . В этом

случае  $Q^{-1} \cdot T \sim \sqrt{D_b T_0} \sim \sqrt{D_b / \omega}$ . В отсутствие ступенек зависимость имела бы вид прямой без областей излома. Температура  $T_c$  соответствует равенству диффузионной длины вакансий размеру плоского сегмента. Определив в эксперименте эту температуру, можно оценить расстояние между ступеньками на межзеренной границе.

### Список литературы:

1. Кульков В.Г. Межкристаллитное проскальзывание вдоль фасетированных границ зерен // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные

исследования. – 2005. – № 11. – С. 108-112.

2. Кульков В.Г. Диффузионная модель внутреннего трения в нанокристаллическом материале // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 3. – С. 43-48.

3. Кульков В.Г. Межзеренное проскальзывание по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости // Вестник МЭИ. – 2005. – № 5. – С. 96 – 100.

4. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.

5. Калинин Ю.Е., Даринский Б.М. Высокотемпературный фон внутреннего трения в твердых телах // МиТОМ. – 2012. – №5. – С. 15 – 18.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА КОМПОНЕНТА УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО КАСКАДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА.**

*Афанасьев Виктор Леонидович – аспирант, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, тел. 8-952-833-4627, E-mail: buguvix@mail.ru*

*Карандей Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий  
Сташ Адам Нурбиевич – студент, гр.15-3НМ-ЭЭ1*

*Кубанский государственный технологический университет, 350072 г.Краснодар, ул. Московская 2*

Большой сложностью при проектировании электрических приводов различных конструкций [1-2] является расчет электромагнитных параметров компонентов [3-4]. Необходимо применять сложный математический аппарат [5-7] для определения магнитных параметров, даже для неподвижной системы, тем более большой сложностью является определение магнитных параметров при изменении положения ротора, так как происходит постоянное и непрерывное изменение магнитных параметров, в частности магнитных сопротивлений. Предлагается новый подход к определению магнитных параметров для подвижной системы координат [8]. Приведен пример определения магнитных параметров типового электрического двигателя АИР63А4У3.

### **1 Определение магнитных сопротивлений статора**

При изменении положения ротора происходит постоянное изменение величины магнитных параметров в частности магнитных сопротивлений участков магнитной системы электрической машины таких как: зубцовая зона статора и ротора, а также воздушного зазора (рисунок 1;2;3). Нам удалось получить расчетные формулы позволяющие определить магнитные сопротивления при изменении положения ротора.

Магнитные сопротивления находятся по следующей зависимости:

$$R_{zi}^{(k)} = \frac{2}{\mu_0} \frac{\delta}{n b_{зр} l_m}, \quad (1)$$

где  $R_{zi}^{(k)}$  – общее магнитное сопротивление воздушного зазора  $i$ -ой катушки при  $(k)$ -ом угле сдвига оси поля ротора относительно оси поля статора;  $n$  – коэффициент для каждого сопротивления.

Коэффициент показывает изменение магнитного сопротивления. В таблице 1 приведены значения коэффициента для всех катушек и всех положений оси поля ротора относительно оси поля статора.

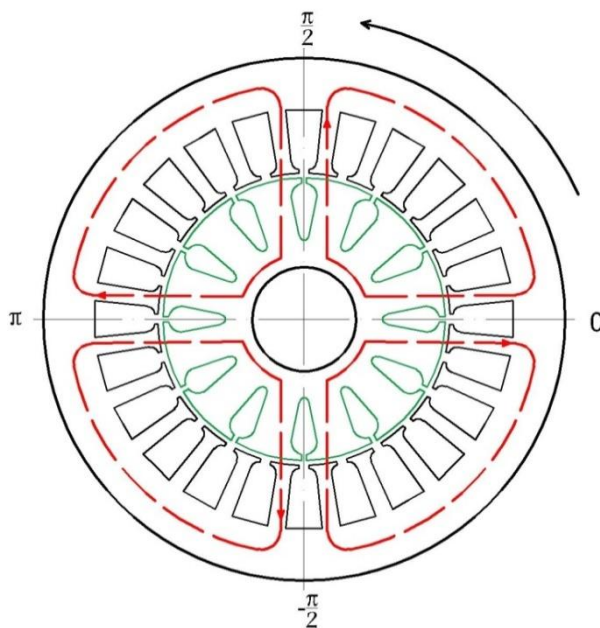


Рис.1. Угол поворота ротора 0 градусов

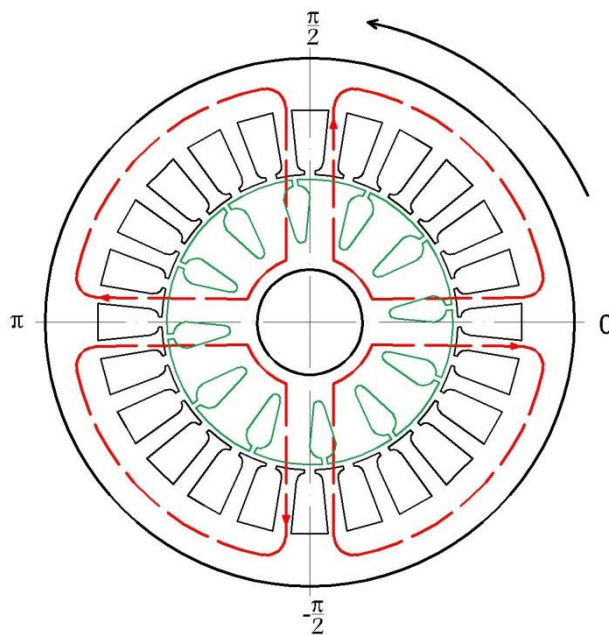


Рис.2. Угол поворота ротора 6 градусов



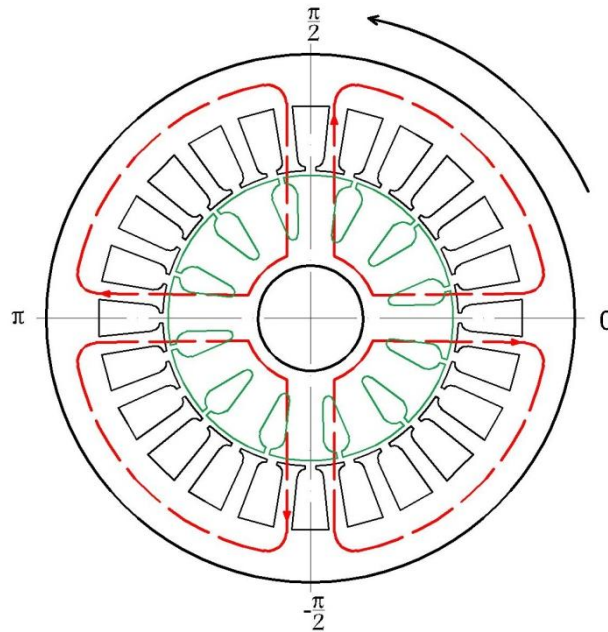


Рис.3. Угол поворота ротора 12 градусов

Таблица 1. Значение коэффициента  $n$ 

Угол поворота оси	Номер катушки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5
1,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
3	3,539	2,462	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,460	3,5377	2,461	3,537	2,461
4,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
6	3,538	2,461	3,537	2,462	3,537	2,462	3,538	2,461	3,5374	2,461	3,537	2,461
7,5	3,5391	2,4622	3,5389	2,4622	3,538	2,4619	3,5377	2,4616	3,5377	2,4616	3,538	2,4619
9	3,5391	2,461	3,538	2,4625	3,5385	2,4625	3,5388	2,4619	3,53748	2,4614	3,5377	2,4622
10,5	3,5385	2,4622	3,5385	2,4622	3,538	2,4616	3,5385	2,4614	3,5377	2,4611	3,538	2,4619
12	3,5385	2,4619	3,538	2,4622	3,538	2,4622	3,5383	2,4619	3,5374	2,4614	3,5372	2,4614
13,5	3,538	2,4622	3,5385	2,4619	3,538	2,461	3,5377	2,461	3,5377	2,461	3,538	2,461
15	3,500	2,5	3,502	2,5	3,500	2,5	3,499	2,5	3,5001	2,5	3,4995	2,5
16,5	3,462	2,538	3,4622	2,5383	3,4622	2,538	3,4622	2,5377	3,4622	2,537	3,4622	2,538
18	3,462	2,538	3,4625	2,5383	3,4616	2,5383	3,4616	2,538	3,4614	2,537	3,4614	2,5377
19,5	3,463	2,5383	3,4622	2,538	3,4616	2,538	3,4616	2,538	3,4614	2,537	3,4619	2,538
21	3,4597	2,5352	3,458	2,5383	3,4633	2,5385	3,4647	2,5388	3,4641	2,539	3,4603	2,538
22,5	3,4622	2,5383	3,4622	2,5385	3,4622	2,538	3,4622	2,5377	3,4616	2,538	3,4619	2,538
24	3,461	2,535	3,46	2,536	3,462	2,539	3,467	2,541	3,4639	2,539	3,460	2,537
25,5	3,463	2,537	3,462	2,538	3,461	2,538	3,461	2,537	3,4616	2,536	3,461	2,538
27	3,461	2,535	3,458	2,536	3,462	2,538	3,465	2,539	3,463	2,538	3,460	2,537
28,5	3,449	2,528	3,454	2,532	3,466	2,542	3,475	2,547	3,4697	2,543	3,456	2,534
30	3,5	3,15	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5
31,5	3,539	2,461	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,461	1,5377	2,461	3,538	2,461
33	3,539	2,462	3,538	2,462	3,538	2,461	3,538	2,460	3,5377	2,461	3,537	2,461

Произведем расчет магнитных сопротивлений по представленной формуле выше, с использованием коэффициента  $n$  представленного в таблице 1

Пример расчета значений магнитных сопротивлений для нулевого положения ротора:

$$R_{31}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{32}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.1}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{33}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{34}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{35}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{36}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{37}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{38}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{39}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{310}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{311}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.287 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{312}^{(0)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.5 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.202 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

Значение магнитных сопротивлений для угла поворота ротора 6 градуса:

$$R_{з1}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.1}{3.538 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з2}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4619 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з3}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з4}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4622 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.251 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з5}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з6}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4622 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.251 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з7}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.538 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з8}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4619 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з9}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5374 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з10}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4616 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з11}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{3.5377 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 2.263 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$R_{з12}^{(6)} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{2.4616 \cdot 0.03615 \cdot 0.055} = 3.253 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

## 2 Расчет магнитных сопротивлений ротора

Произведен расчёт магнитных сопротивлений от обмотки ротора асинхронного двигателя. Магнитное сопротивление ярма ротора и зубцовой зоны ротора для соответствующих катушек останутся прежними. Также останутся без изменения и магнитные сопротивления ярма статора и зубцовой зоны статора для соответствующих катушек.

При повороте ротора изменится величина магнитного сопротивления воздушного зазора по следующей зависимости:

$$R_{зи}^{(k)} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{n b_{zc} l_m}$$

где  $R_{3i}^{(k)}$  – общее магнитное сопротивление воздушного зазора  $i$ -ой катушки при  $(k)$ -ом угле сдвига оси поля ротора относительно оси поля статора;  $n$  – коэффициент для каждого сопротивления.

В рассматриваемом типе двигателя обмотка ротора выполнена по типу беличьей клетки. Токи в данной типе обмотки распределяются по полюсам

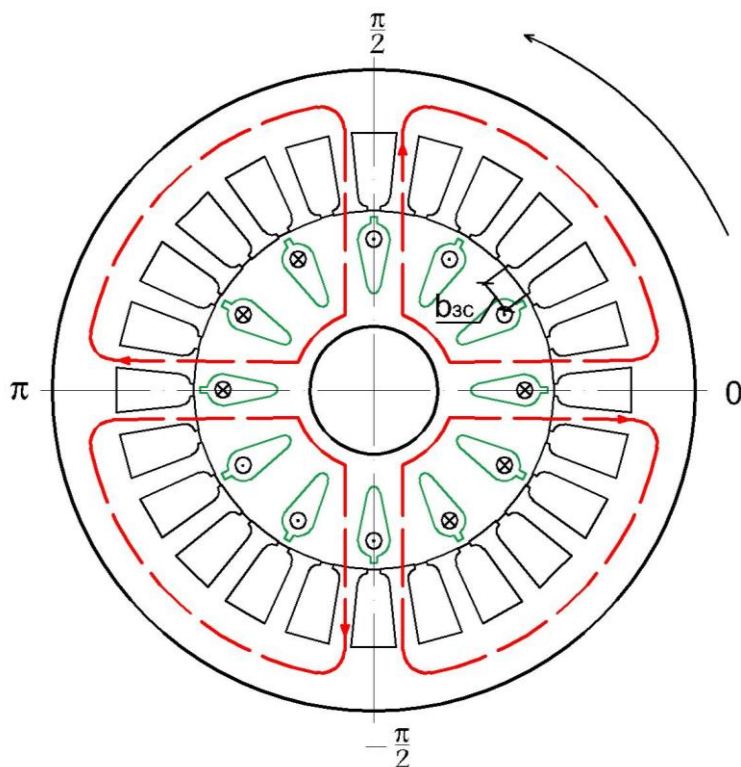


Рис.4. Распределение токов в обмотке ротора

Так как в рассматриваемом электрическом двигателе используется симметричная обмотка статора, а обмотка ротора выполнена по типу беличьей клетки, это предполагает, что количество катушек обмотки ротора будет равно количеству полюсов сформированных обмоткой статора. Поэтому в данном электрическом двигателе коэффициент  $n$  будет постоянным и равен 6.

Произведем расчет для данного значения:

$$R_{31}^{(28.5)} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0.001}{6 \cdot 0.01468 \cdot 0.055} = 16.435 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Предложенный подход к определению магнитных параметров позволит правильно производить оптимизационные задачи [9] при создании специальных типов электрических приводов и реализовывать предложенные алгоритмы в общепромышленных устройствах управления технологическими процессами [10].

**Список литературы:**

1. Карандей В.Ю. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.

2. Попов Б.К. Управляемый каскадный асинхронный электропривод с общим ротором/ Попов Б.К., Попова О.Б. // Патент на изобретение № 2556862 зарегистрировано 21.07.2014 г.

3. Шмитц Н. Введение в электромеханику [Текст] /Н. Шмитц, Д. Новотный// – Пер. с англ. – М.: Энергия, 1969. – 336 с.

4. Вольдек А.И. Электрические машины [Текст] /А.И. Вольдек// – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

5. Киреев В.И. Численные методы в примерах и задачах [Текст] / В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. – М.: Высш. шк., 2004. – 480 с.

6. Даффин Р. Геометрическое программирование [Текст] /Р. Даффин, Э. Питерсон, К. Зенер// – Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 311 с.

7. Попова О.Б. Математическое моделирование и оптимизация специальных электромеханических систем :Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 [Текст] /О.Б. Попова// – Краснодар, 2002. – 214 с.

8. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – №08(132). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> , 0,978 у.п.л. – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>

9. Popova O. Optimel: software for selecting the optimal method Popova O., Popov B., Romanov D., Evseeva M. SoftwareX. 2017. T. 6. C. 231-236.

10. Попов Б.К. Интеллектуальное микропроцессорное устройство автоматического управления приборами/ Попов Б.К., Попова О.Б., Ключко В.И.// Патент на изобретение № 2542881 зарегистрировано 30.10.2012г.

**СРЕДСТВА И УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

*Ткачев А.К., Майков Р.А.*

*Научный руководитель: Кладиев С.Н., к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИИ*

***Общие понятия о релейной защите. Назначение устройств РЗА.***

Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов. (Ненормальные режимы: Перегрузка оборудования, вызванная сверхтоком, т. е. увеличением тока сверх номинального значения). При возникновении ненормальных режимов защита выявляет их и в зависимости от

характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима, или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

К основным устройствам такой автоматики относятся: автоматы повторного включения (АПВ), автоматы включения резервных источников питания и оборудования (АВР) и автоматы частотной разгрузки (АЧР).

## ***2. Виды повреждений, возникающие в электрических установках.***

Рассмотрим более подробно основные виды повреждений и ненормальных режимов, возникающих в электрических установках, и их последствия.

В энергетических системах на электрооборудовании электростанций, в электрических сетях и на электроустановках потребителей электроэнергии могут возникать повреждения и ненормальные режимы. Повреждения в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы.

Повышенный ток выделяет большое количество тепла, вызывающее разрушения в месте повреждения и опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования, по которым этот ток проходит.

Понижение напряжения нарушает нормальную работу потребителей электроэнергии и устойчивость параллельной работы генераторов и энергосистемы в целом.

Качания возникают при нарушении синхронной работы генераторов электростанций ЭЭС.

Асинхронный режим. К ненормальным режимам относится также работа синхронного генератора без возбуждения [на-пример, при отключении автомата гашения поля (АГП)]. При работе в асинхронном режиме увеличивается частота вращения генератора и возникает пульсация тока статора.

Ненормальные режимы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонение от нормального режима и принять меры к его устранению (например; снизить ток при его возрастании, повысить напряжение при его снижении и т. д.).

В связи с этим и возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающих систему и ее элементы от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

### ***Структурные части основные элементы.***

Измерительная часть (ИЧ) осуществляет непрерывный контроль за состоянием защищаемого объекта и, реагируя на появление в нем повреждения (или ненормального режима), срабатывает и выдает дискретные сигналы на вход логической части (ЛЧ), приводящие ее в действие.

Логическая часть (ЛЧ) воспринимает дискретные сигналы ИЧ, производит с помощью логических элементов (реле) по заданной программе логические операции и подает выходной сигнал о срабатывании РЗ на управляющую часть (УЧ).

Управляющая (исполнительная) часть (УЧ) служит для усиления сигнала ЛЧ до значения, необходимого для отключения выключателя и приведения в действие других устройств, поскольку сигналы ЛЧ (особенно при выполнении ее на

полупроводниковых элементах) обычно имеют недостаточную мощность, и для размножения сигнала ЛЧ.

Источник питания (ИП). Для приведения в действие элементов ЛЧ и УЧ, подачи команды на отключение выключателей, а также для питания полупроводниковых элементов ИЧ и ЛЧ предусматривается специальный источник стабильного напряжения.

#### 4. Элементные базы.

В практике современного релестроения используются три типа элементных баз:

- электромеханическая, которая может использоваться для осуществления всех функциональных частей и органов РЗ в виде электромеханических реле;
- полупроводниковая, которая может использоваться для осуществления всех функциональных частей и органов РЗ в виде полупроводниковых элементов аналоговых и цифровых микросхем;
- микропроцессорная, которая может использоваться для осуществления измерительной и логической частей РЗ на базе микроЭВМ или многопроцессорных систем, основным элементом которых являются микропроцессоры.

#### 1.2 Требования к релейной защите

К релейной защите предъявляются следующие основные требования:

- селективности: релейная защита должна определять поврежденный элемент и подавать команду на локализацию (отключение) этого элемента выключателями, ближайшими к месту повреждения. Например, для сети, изображенной на Рис.4, короткое замыкание в точке К1 должно отключиться выключателями Q6 и Q7, а короткое замыкание в точке К2 должно ликвидироваться при помощи выключателей Q1 и Q3;

• быстродействия: быстрое отключение коротких замыканий позволяет уменьшить размер повреждения оборудования за счет термического и динамического действия токов, снизить влияние понижения напряжения на работу потребителей, повысить вероятность сохранения устойчивости параллельной работы энергосистемы. Защита считается быстродействующей при времени ее срабатывания до 0,1 сек;

• надежности: защита должна обладать аппаратной и функциональной надежностью. Аппаратная надежность обеспечивается надежностью ее отдельных компонентов, грамотными схемными реализациями и условиями эксплуатации. Функциональная надежность достигается за счет совершенства алгоритма функционирования защиты;

• резервирования: релейная защита объекта в случае отказа основных защит или защит смежных присоединений должна обеспечивать ликвидацию коротких замыканий. Считается, что защита обеспечивает функции ближнего резервирования, если она срабатывает при отказе собственных защит, и

дальнего резервирования - при несрабатывании защитили выключателей смежных элементов;

- чувствительности: защита должна четко фиксировать все виды повреждений, предусмотренные алгоритмом ее функционирования. Наряду с изложенными выше требованиями при выборе и проектировании устройств релейной защиты следует принимать во внимание ряд дополнительных факторов.

#### 5. Основные алгоритмы функционирования защит

По способам обеспечения селективности все защиты можно разделить на две группы:

- защиты с относительной селективностью;
- защиты с абсолютной селективностью.

*Защиты с относительной селективностью* могут работать как при коротких замыканиях на защищаемом объекте, так и при повреждениях на смежных присоединениях в режиме резервирования. К таким защитами относятся токовые защиты, защиты напряжения, дистанционные защиты.

Для иллюстрации принципов работы защит этого типа рассмотрим в качестве защищаемого объекта линию с односторонним питанием (Рис.6)

*Токовые защиты* основаны на фиксации увеличения тока при возникновении короткого замыкания.

*Защиты напряжения* учитывают уменьшение напряжения при коротком замыкании.

*Дистанционные защиты* фиксируют изменение сопротивления. Если учесть, что  $Z_{ЛК} = Z_0 L_K$ , где  $Z_0$  – сопротивление одного км линии, а  $L_K$  - расстояние в км до места короткого замыкания, то сопротивление  $Z_{ЛК}$  пропорционально расстоянию до места короткого замыкания  $Z_{ЛК} \sim L_K$ , следовательно, дистанционный принцип позволяет определить местовозникновения короткого замыкания.

Защиты с относительной селективностью при нормальных условиях работы действуют на отключение выключателей поврежденной линии.

Например, при коротком замыкании в точке  $K_1$  (Рис.6) защита действует на выключатель  $Q_1$ . При коротком замыкании в точке  $K_2$  должна сработать защита *Линии 2*, однако при отказе этой защиты или выключателя  $Q_2$  должна сработать защита *Линии 1* и отключить короткое замыкание выключателем  $Q_1$ .

*Защиты с абсолютной селективностью* работают только при коротком замыкании на защищаемом участке. К таким защитами относятся дифференциальные и дифференциально-фазные защиты.

Принцип действия *дифференциальной защиты* основан на сравнении токов на входе и выходе защищаемого объекта.

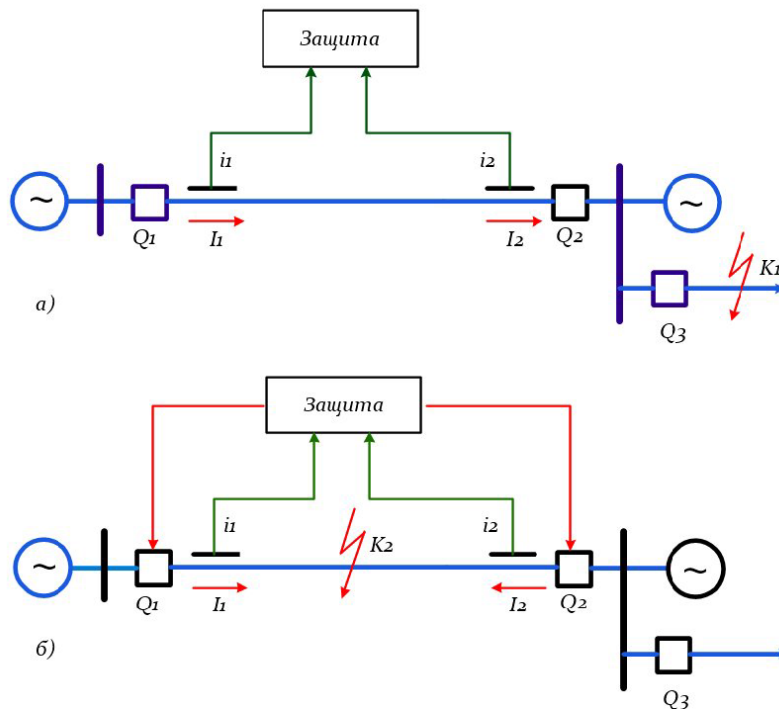
Рассмотрим функционирование дифференциальной защиты на примерелинии с двухсторонним питанием (Рис.7).

В нормальном режиме и в режиме внешнего короткого замыкания в точке  $K_1$ , выполняется соотношение  $I_1 = I_2 = I$ . В защите эти токи сравниваются между собой, и при их равенстве защита не работает.

При возникновении короткого замыкания в зоне действия защиты, например в точке  $K_2$ , в случае одностороннего питания вектор тока  $I_2$  становится равным нулю, равенство токов нарушается, и защита сработает. При наличии



двухстороннего питания значение тока  $I_2 > 0$ , и в принципе модули токов могут оказаться равными, но векторы имеют разные знаки, и защита также будет работать.



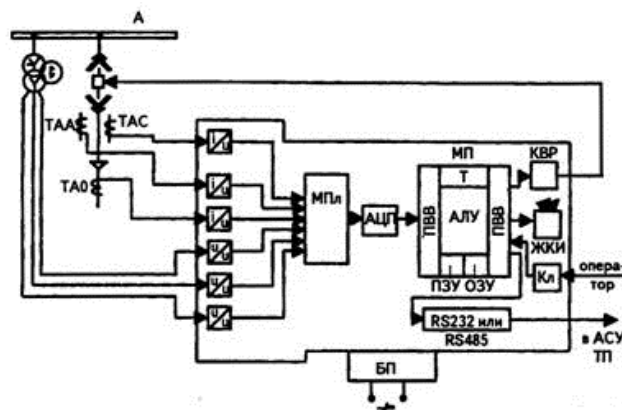
**Рис. 7.** Принцип действия дифференциальной защиты:

а) короткое замыкание вне зоны защиты;

б) короткое замыкание в зоне действия защиты

Принцип *дифференциально-фазной* защиты основан на сравнении фаз токов на входе и выходе объекта.

#### 4. Микропроцессорные устройства релейной защиты: обзор возможностей и спорных вопросов.



**Рис. 8.** Схема микропроцессорного УРЗ

Около 15 лет назад в энергетике стало массово внедряться новое оборудование для защиты объектов энергоснабжения, использующее компьютерные технологии на базе процессоров. Его стали называть сокращенным термином МУРЗ — микропроцессорные устройства релейной защиты.

Они выполняют функции обыкновенных устройств РЗА на основе новой элементной базы — микроконтроллеров (микропроцессорных элементов).

*Преимущества микропроцессорных устройств релейной защиты*

Отказ от электромеханических и статических реле, обладающих значительными габаритами, позволил более компактно размещать оборудование на панелях РЗА. При этом управление посредством сенсорных кнопок и дисплея стало более наглядным и удобным.

Сейчас внедрение МУРЗ стало одним из основных направлений в развитии устройств релейных защит.

Ряд дополнительных функций:

- регистрация процессов аварийного состояния;
- опережение отключения синхронных потребителей при нарушениях устойчивости системы;
- способность к дальнему резервированию.

Реализация таких возможностей на базе электромеханических защит ЭМЗ и аналоговых устройств не осуществляется ввиду технических сложностей.

Микропроцессорные системы релейной защиты точно работают по тем же принципам быстродайствия, избирательности, чувствительности и надежности, что и обычные устройства РЗА.

*Недостатки*

- высокая стоимость;
- низкая ремонтпригодность

***Высокая надежность микропроцессорных устройств релейной защиты по сравнению с электромеханическими защитами***

Производители микропроцессорных устройств рекламой делают акцент на отсутствие в системе подвижных частей, что связывают с исключением условий механического износа. Сюда же добавляют вопросы коррозии металлов и старение изоляции у конструкций электромеханической и полупроводниковой базы.

Дефекты изоляции и коррозии могут возникнуть только в двух случаях:

- нарушение технологии изготовления;
- отклонение от правил эксплуатации и обслуживания.

В то же время в микропроцессорных устройствах релейной защиты:

- большинство компонентов постоянно осуществляют мониторинг электрической схемы и обмениваются сигналами между собой;

- элементы электрических входов все время подвергаются воздействию высокого напряжения 220 вольт, а также импульсных и пиковых величин переходных процессов;
- блоки питания в/ч импульсной схемы работают без отключения с выделением тепла и формируют основную долю отказов МУРЗ.

*Надежность реле постепенно повышается от электромеханических конструкций к полупроводниковым на дискретных компонентах, затем к интегральным микросхемам и самая высокая у микропроцессорных устройств*

Выводы статистики свидетельствуют о более высокой надежности электромеханических реле перед полупроводниковыми аналогами в повседневной эксплуатации. Обратная картина наблюдается только при увеличении циклов коммутации до нескольких сотен тысяч или миллионов.

*Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты повышает встроенная самодиагностика*

В составе микропроцессорных защит работают:

- аналого-цифровые преобразователи;
- память (ПЗУ — ROM + ОЗУ — RAM);
- центральный процессор;
- источник питания;
- выходные электромагнитные реле;
- узлы аналоговых и цифровых входов.

*Трудности эксплуатации*

*Электромагнитная совместимость*

Современная микроэлектроника очень чувствительна к электромагнитным излучениям, а комплекты микропроцессорных устройств релейной защиты устанавливаются на подстанциях, работающих в условиях повышенной напряженности электрического поля, требующей надежной экранированной защиты с отводом накапливаемых потенциалов в землю.

*Выполняемые задачи*

Отказ одной микропроцессорной защиты приводит к более тяжелым последствиям для энергетики, чем неисправность электромагнитных защит потому, что функционально микропроцессорное устройство релейной защиты выполняет задачи 3÷5 электромагнитных защит.

*Подготовка персонала*

При поступлении нового вида микропроцессорных устройств релейной защиты даже того же производителя процесс обучения персонала необходимо возобновлять.

*Выводы*

Микропроцессорные устройства релейной защиты являются действительно прогрессивным направлением развития энергетики.

Провозглашаемая производителями высокая надежность микропроцессорных устройств релейной защиты не всегда соответствует действительности.

**Список литературы:**

1. Копьев В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 153 с.
2. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Учебное пособие для техникумов. – М.: Энерготомиздат, 1998. – 800с.: ил.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНОСБОРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ ИНДУСТРИИ 4.0**

*А. В. Гурьянов, Д.А. Заколдаев, А.В. Шукалов, И.О.Жаринов  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
198095, г.Санкт-Петербург, ул.Маршала Говорова, 40,  
Тел. 8-812-252-2037  
E-mail: mpbva@mail.ru*

Обзор методов проектирования механосборочных производств Индустрии 3.0 показывает [1, 2], что предлагаемые специалистами инженерные методы расчета основаны на итерационной процедуре «поучасткового» проектирования со специализированными критериями качества, соответствующими технологическим операциям изготовления изделий приборостроения. Распространение такого «скаляризационного» подхода на проектные процедуры создания производств предприятий Индустрии 4.0 представляется нецелесообразным, т.к. этот подход допускает возможность появления в процессе решения проектной задачи «конфликта интересов» подсистем (технологических участков) и системы (механосборочного производства) в целом на уровне несогласованных частных и общего критериев качества проекта. Для решения многопараметрической оптимизационной задачи проектирования механосборочного производства целесообразно воспользоваться методом В.Л. Волковича [3], модифицированным для создания производственных комплексов предприятий Индустрии 4.0.

В основе базового метода В.Л. Волковича, основанного на анализе аддитивных сепарабельных критериев, и разработанного для проектирования сложных систем автоматического управления, лежит гипотеза о возможности введения в проектные процедуры частных критериев качества для подсистем (технологические участки) проектируемой системы (механосборочное производство) с последующим расчетом интегрального критерия качества объекта проектирования, вычисляемого аддитивно для всех критериев качества каждой из подсистем. Метод В.Л. Волковича основан на последовательном исключении (отсева) из множества проектных альтернатив вариантов, не удовлетворяющих заданным критериям качества проекта.

Специфическим свойством метода В.Л. Волковича является однородность частных и интегрального критериев качества проекта, что позволяет их

суммировать на финальном этапе решения задачи оптимизации. Следствием этого является вывод о возможности выбора варианта проектного решения, для которого обеспечивается экстремум глобального критерия качества, на основании проектных решений подсистем с экстремальными значениями всех частных критериев качества.

Исходными данными для модифицированного метода В.Л. Волковича в приложении к решению задачи проектирования механосборочного производства Индустрии 4.0 являются:

- матрица критериев качества технологического оборудования:

$$e_{iajm}(x_1, x_2, \dots, x_n) \xrightarrow{f_k} f_k(e_{iajm}(x_1, x_2, \dots, x_n)) = f_k(e_{iajm}), k=1, 2, \dots, K;$$

- бинарная матрица  $\mathbf{B} = \{b_{iaj}\}$  практической реализации участков цифрового производства:  $b_{iaj} = 1$ , если  $j$ -ый производственный автомат задействован в  $a$ -ом алгоритме технологического процесса, выполняемом на  $i$ -ом технологическом участке производства, в противном случае  $b_{iaj} = 0$ .

Алгоритм модифицированного метода В.Л. Волковича в приложении к автоматизированному проектированию технического облика механосборочного производственного комплекса предприятия Индустрии 4.0 приведен на рисунке 1.

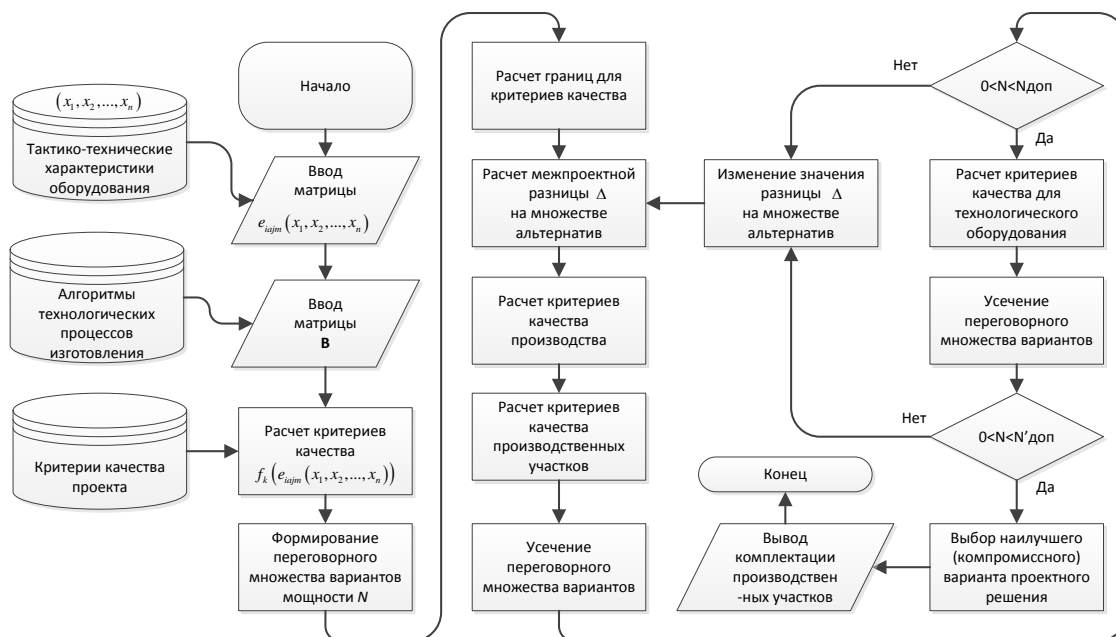


Рис. 1. Блок-схема алгоритма модифицированного метода В.Л. Волковича для проектирования механосборочного производства Индустрии 4.0

Формирование проектного решения  $\{m_j\}$  с использованием идей метода В.Л. Волковича осуществляется с помощью алгоритма. Модификация метода В.Л. Волковича выполнена в части изменения набора входных данных, необходимых для реализации алгоритма проектирования механосборочного производства Индустрии 4.0, и отказа от морфологических блоков и таблиц в пользу матричного представления исходных данных. Итерационный характер процедуры

автоматизированного выбора технологического оборудования, основанный на применении метода дихотомии к межпроектной разнице, позволяет создавать проектные решения с регулируемой мощностью переговорного множества.

**Список литературы:**

1. Чарнко Д.В., Хабаров Н.Н. Основы проектирования механосборочных цехов, М.: Машиностроение, 1975, 352 с.
2. Мамаев В.С., Осипов Е.Г. Основы проектирования машиностроительных заводов, М.: Машиностроение, 1974, 290 с.
3. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем, М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982, 286 с.

**ВЛИЯНИЕ КОБАЛЬТА НА СМАЧИВАНИЕ ВОЛЬФРАМА И КАРБИДА  
ВОЛЬФРАМА ОЛОВЯННО-МЕДНЫМИ ПРИПОЯМИ**

*Озолин А. В., аспирант кафедры автосервиса и материаловедения.  
Кубанский государственный технологический университет  
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2  
Тел. 89180585654  
E-mail: ozolinml@yandex.ru*

*Соколов Е.Г., к.т.н., доцент кафедры автосервиса и материаловедения  
Кубанский государственный технологический университет  
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2  
Тел. 89034110312  
E-mail: e\_sokolov.07@mail.ru*

**Введение**

В машиностроении алмазно-абразивные инструменты применяют для шлифования твердых неметаллических материалов, керамики, а также для правки шлифовальных кругов из корунда и карбида кремния. Эксплуатационные характеристики алмазно-абразивных инструментов во многом определяются свойствами металлической связки.

Припой системы Sn-Cu-Co используется в качестве связки для закрепления алмазных зерен на рабочих поверхностях алмазного инструмента. Они отвечают требованиям, предъявляемым к металлическим связкам: хорошо смачивают алмаз, имеют температуру пайки ниже температуры графитизации алмазов, имеют высокую износостойкость, прочно удерживают алмазные зерна [1].

При добавлении в связку Sn-Cu-Co порошка W увеличивается вязкость припоя, необходимая для получения сложных фасонных поверхностей. Однако в работе [2] показано, что порошок W при пайке плохо смачивается жидкой фазой припоя, о чем свидетельствует наличие пор по периметру частиц W. В результате повышенная пористость связки негативно сказывается на износостойкости инструмента. Устранение данного дефекта возможно при установлении

оптимальных условий, способствующих смачиванию порошка W другими компонентами связи.

Цель данной работы – определить условия для смачивания расплавами Sn-Cu-Co порошков вольфрама и карбида вольфрама.

Как известно, хорошее смачивание достигается многими факторами: химическим родством элементов, температурой пайки, вязкостью припоя, газовой средой пайки [3].

Наибольший научный интерес среди перечисленных факторов представляет исследование влияния химического средства элементов припоев, обеспечивающего высокий уровень смачивания.

Влияние добавления кобальта на смачиваемость W и WC компонентами припоев установлено с помощью описанного ниже эксперимента.

#### **Методика проведения исследований**

Смачивание W и WC расплавами припоев и влияние добавления кобальта на смачиваемость изучали при пропитке пористых образцов.

Подложки для пропитки были приготовлены из порошков вольфрама и карбида вольфрама (массой по 30 г).

В качестве пропиточного материала были приготовлены образцы припоев (массой по 5 г) из порошков олова, меди и кобальта технической чистоты следующих составов, % (масс.):

31Sn+69Cu

30Sn+68Cu+2Co

Частицы порошков имели равноосную форму и следующие размеры, мкм: олово – 13...30, медь – 45...70, кобальт – 1...2, вольфрам – 6...20, карбид вольфрама – 1...3.

Для приготовления порошковых смесей указанных составов использовали аналитические весы AdventurerAR2140 фирмы «OHAUS» с точностью взвешивания 0,0001 г.

Порошковые навески припоев и подложек прессовали в стальной пресс-форме с усилием в 12 т/см<sup>2</sup> и подвергали предварительному спеканию в вакууме при температуре 1150°C с временем выдержки 180 минут.

Согласно диаграмме тройных сплавов Sn-Cu-Co [4], пропиточные материалы указанного состава при температуре 1150°C находились в жидком состоянии. После спекания пропиточные материалы взвешивали для контроля потери масс при испарении.

Смачивание подложек расплавами изучали следующим образом: на подложки W и WC помещали образцы сплавов Sn-Cu и Sn-Cu-Co и нагревали в вакууме при температуре 900°C с временем выдержки 20 минут. Затем полученные образцы фотографировали, угол смачивания измеряли при помощи программного обеспечения ImageJ, готовили поперечные срезы образцов. Микроструктуру зон взаимодействия сплавов с прессовками изучали при помощи металлографического микроскопа AxioObserver.A1m фирмы CarlZeiss при увеличениях ×50...1000. Измерение элементов микроструктуры осуществляли при помощи программного обеспечения AxioVisionRel. 4.8. Для выявления микроструктуры использовали травитель, содержащий 5 г хлорного железа FeCl<sub>3</sub>, 15 мл соляной кислоты HCl, 100 мл воды. Микротвердость структурных составляющих измеряли по методу Виккерса при нагрузке 10 г на автоматическом твердомере DuraScan80 фирмы EmcoTest.

### Результаты исследования и их обсуждение

Внешний вид образцов после нагрева показан на рисунке 1. На фотографии видно, что расплав припоев без кобальта (рисунок 1.а и 1.б) образовывал с подложками краевой угол смачивания свыше  $90^\circ$ , не смачивал поверхность и скатывался с поверхности подложек.

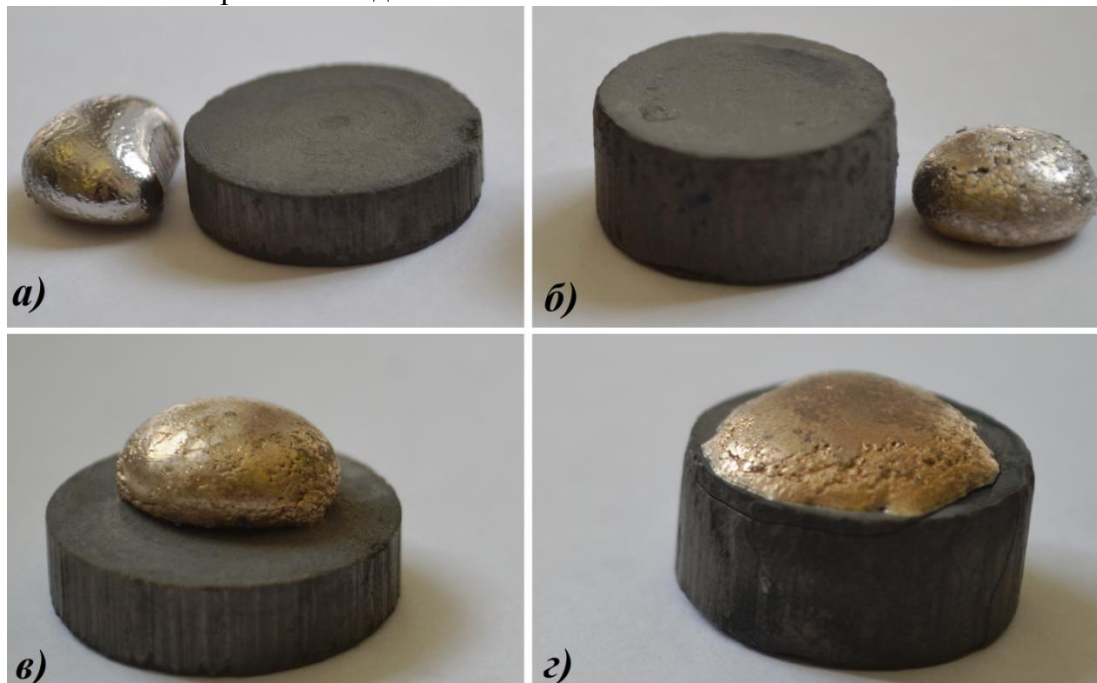


Рис. 1. Результаты эксперимента по исследованию пропитки подложек W и WC припоями Sn-Cu-Co и Sn-Cu:  
а – Sn-Cu на W подложке, б – Sn-Cu на WC подложке, в – Sn-Cu-Co на W подложке, г – Sn-Cu-Co на WC подложке

Образец припоя Sn-Cu-Co (рисунок 1.в) образовал краевой угол смачивания с вольфрамовой подложкой  $\theta \approx 119^\circ$  (рисунок 2.а). Анализ микроструктуры образца (рисунок 3.а) показал, что на границе контакта припоя с подложкой в отдельных точках происходило смачивание и проникновение расплава в поры на глубину около 30 мкм. Это подтверждается результатом измерения микротвердости: твердость припоя составила 200 HV, твердость припоя, проникшего в поры – 180-190 HV.

Припой Sn-Cu-Co хорошо смочил подложку из карбида вольфрама (рисунок 1.г), образовав краевой угол смачивания  $\theta \approx 57^\circ$  (рисунок 2.б).



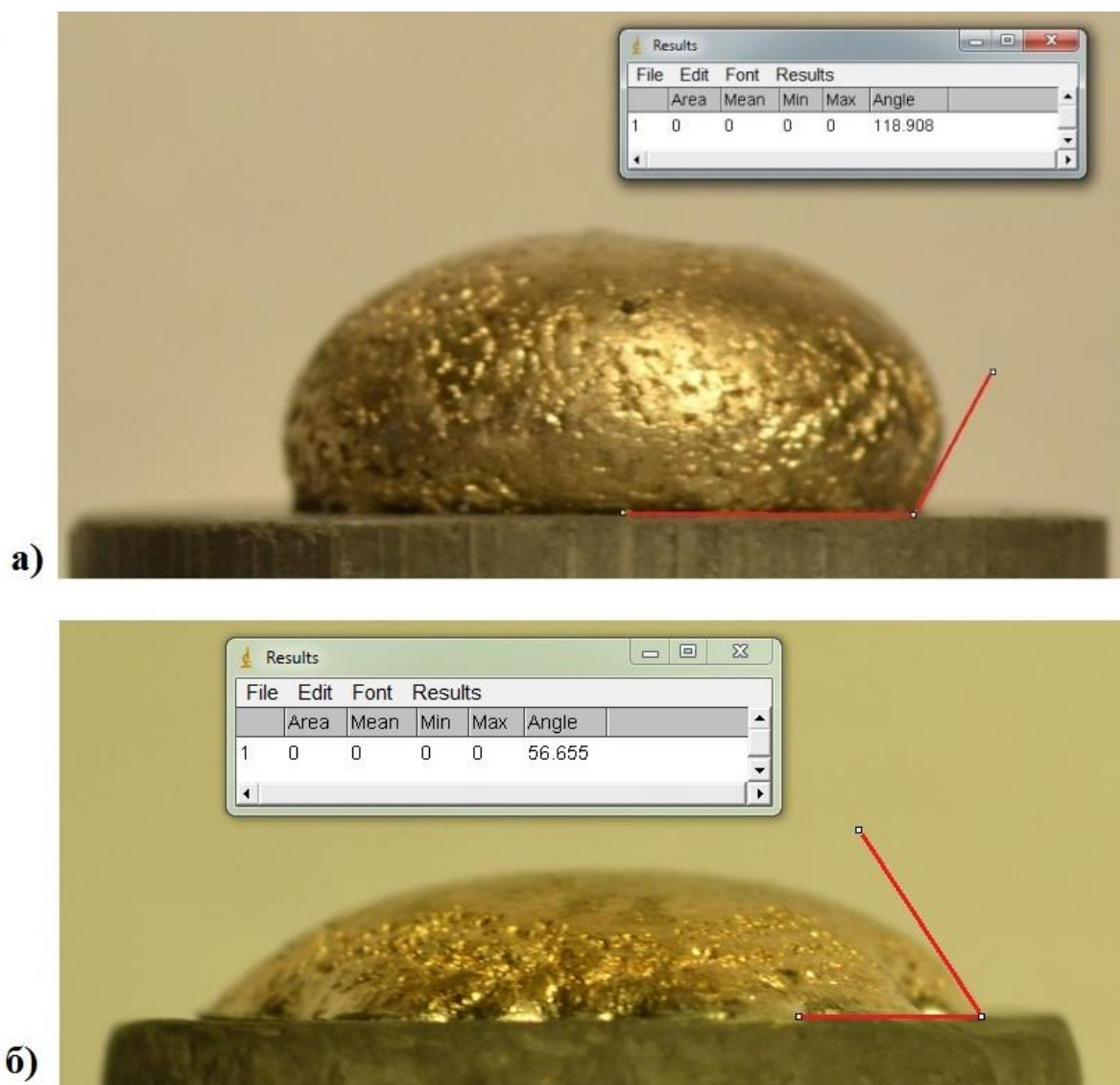


Рис. 2. Измерение краевых углов смачивания припоями Sn-Cu-Co подложек из: *a* – вольфрама, *б* – карбида вольфрама

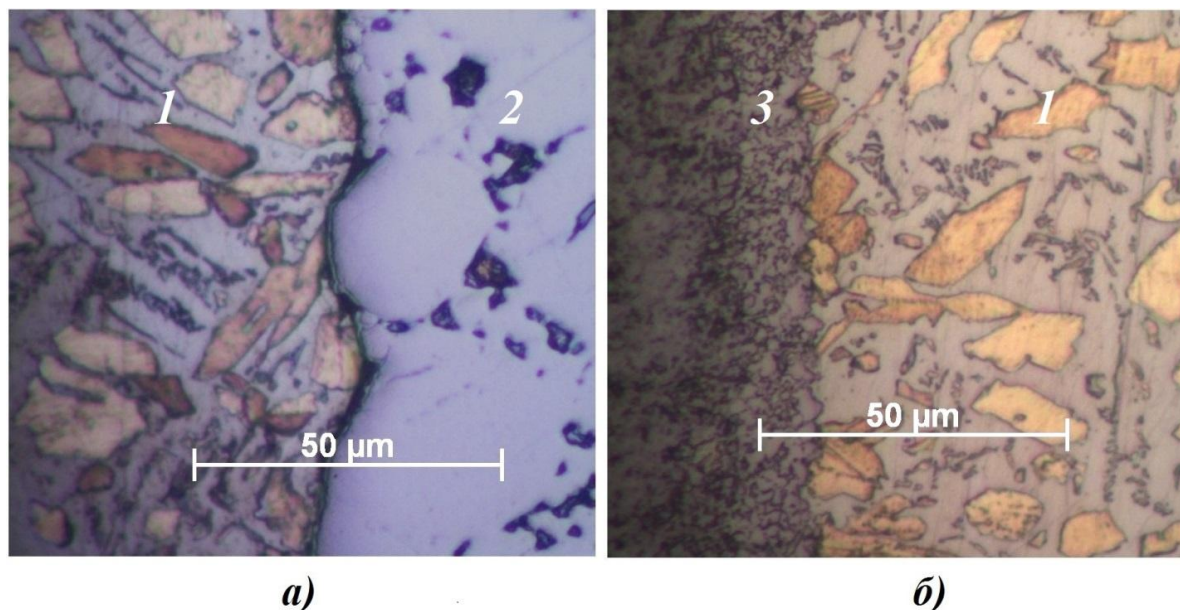


Рис. 3. Микроструктуры зон взаимодействия припоев Sn-Cu-Co с подложками из: *a* – вольфрама, *б* – карбида вольфрама,  $\times 500$ ;  
1 – припой Sn-Cu-Co, 2 – подложка W, 3 – подложка WC

Отсутствие смачивания припоями Sn-Cu подложек W и WC объясняется тем, что, олово и медь не взаимодействуют с вольфрамом и карбидом вольфрама ни в твердом, ни в жидком состояниях [5].

Высокий показатель смачивания подложки WC припоем Sn-Cu-Co обусловлен высоким химическим сродством Co к WC, что подтверждается анализом тройной диаграммы W-Co-C.

Несмотря на наличие высокого химического сродства Co к W, расплав Sn-Cu-Co смачивал подложку W только на отдельных участках, что связано с наличием оксидных пленок на поверхности W.

Удаление оксидных пленок с поверхности металлов может происходить следующим образом: восстановление, диссоциация оксидов, растворение их в основном металле, а также растворение контактирующей жидкой фазой. Согласно ряду химического сродства элементов к кислороду, компоненты припоев Sn-Cu-Co обладают меньшим сродством к кислороду, чем W, поэтому восстановление оксидов расплавом происходить не будет.

В соответствии с данными [2], оксидные пленки W начинают распадаться при нагреве в вакууме при температуре около  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако температура  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  оказалась недостаточной для полного удаления оксидных пленок. Для их удаления с поверхности W целесообразно повышать температуру пайки.

#### **Выводы**

1. Добавление в припой Sn-Cu порошка Co способствует смачиванию порошков W и WC.

2. Несмотря на высокое химическое сродство Co к W, смачивание W расплавом Sn-Cu-Co при  $900^{\circ}\text{C}$  затруднено ввиду наличия на поверхности W стойких оксидных пленок. Для их удаления и получения беспористой связки Sn-Cu-Co-W целесообразно проводить спекание при температурах выше  $900^{\circ}\text{C}$ .

**Список литературы**

1. Sokolov E.G., Artemyev V.P. Interaction of composite brazing alloy Sn-Cu-Co-W with diamond at brazing of diamond abrasive tools // Applied mechanics and materials.– 2015 -Т. 799-800 - Р. 266-271
2. Соколов Е.Г., Артемьев В.П. Влияние вольфрама на свойства металлических связок алмазных инструментов, полученных композиционной пайкой // Технология металлов. - 2005 – С. 19-22
3. Петрунин И.Е. Справочник по пайке. Машиностроение, 2003
4. Yu-KaiChen, Chia-MingHsu, Sinn-WenChen, Chih-MingChen, Yu-ChihHuang. Phase Equilibria of Sn-Co-Cu Ternary System // Metallurgical and Materials Transactions A.–2012 - V. 43, Is. 10 -Р. 3586-3595
5. Н.П. Лякишев. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3-х т. Машиностроение, 1996

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗБОЙКОВОГО СИЛОВОГО  
МЕХАНИЗМА**

*Б.С. Алексеев, студент гр. 4Е41*

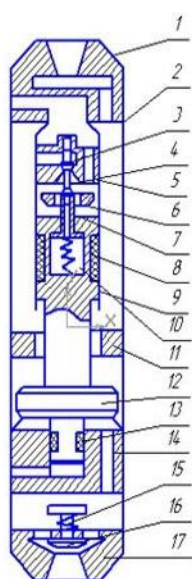
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,*

*634050, г.Томск, пр.Ленина,30,*

*Тел. 8-913-1103-33-98*

*E-mail: Alekseev.bn@gmail.com*

Одним из перспективных направлений развития бурильных машин и механизмов является безбойковый силовой механизм. Однако на данный момент наиболее широкое применение имеет гидроударный привод объемного типа. Принцип работы гидроударника (рис.1) заключается в прямом действии поршень-ударник, который перемещается вниз и наносит удар по наковальне под действием жидкости, а в первоначальное положение возвращается под действием пружины сжатия.



- |                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 1- Переходник                     | 12- Боёк              |
| 2- Корпус                         | 13- Хвостовик         |
| 3- Впускной клапан                | 15- Пружина           |
| 4- Толкатель                      | 16- Пусковой клапан   |
| 5- Клапанная коробка              | 17- Нижний переходник |
| 6- Выпускной клапан               |                       |
| 7- Хвостовик выпускного клапана   |                       |
| 8- Поршень                        |                       |
| 9- Цилиндр                        |                       |
| 10- Пружина                       |                       |
| 11,14- Верхняя, нижняя наковальня |                       |

Рис. 1. Модель гидроударника

Основными недостатками гидроударника являются:

1. Наличие бойкового механизма (Результат- огромное выделение тепла, а также износ бойка и наковальни).
2. Большие потери энергии, в связи с перетеканием жидкости и большим ходом поршня.
3. Наличие маслостанции

Использование ресурсоэффективной системы бурения на основе безбойкового силового механизма позволяет избежать данных недостатков. Принцип работы данного механизма заключается в создании импульсов давления жидкости. При работе гидроимпульсатора, плунжер совершает возвратно-поступательное движение, при этом создаются импульсы давления жидкости, которые передаются в гидроцилиндр. В связи с тем, что упругая сила поджимает гидроцилиндр, происходит его раскачка вместе с инерционной массой  $m$ . При этом происходит циклическое повышение и понижение давления. Важно отметить, что именно работа кривошипно-шатунного механизма влияет на конечную буровую штангу. Тогда, можно подобрать зависимость горной породы от режима работы плунжера.

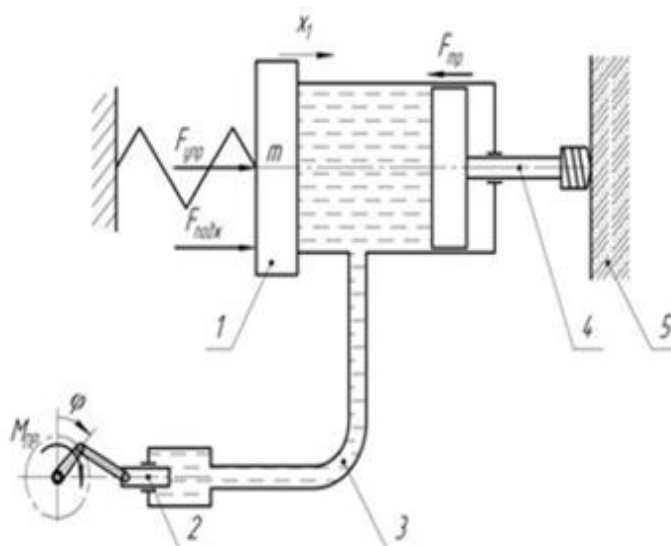


Рис. 2. Физическая модель гидроимпульсного механизма

На рисунке 2 изображена модель гидроимпульсного механизма, где:

- 1- Гидроцилиндро с активной массой
- 2- Плунжер
- 3- Рукав высокого давления
- 4- Разрушаемая порода

Основные отличия гидроимпульсного механизма от гидроударника:

1. Отсутствие маслостанции
2. Отсутствие соударяющихся частей, а как следствие низкое тепловыделение
3. Отсутствие искрообразования
4. Малая шумность при работе механизма
5. Повышенный КПД

**Заключение:** Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод о том, что при сравнение двух систем: гидроударный механизм и гидроимпульсный механизм-гидроимпульсный механизм обладает большей энергоэффективностью по сравнению с гидроударным механизмом.

**Список литературы:**

1. Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Юровский П. Г., Пономарев А. В.. Патент на ПМ 133152 РФ. МПК7 E02D 7/10. Гидроимпульсная сваебойная машина / Опубл. 10.10.2013.
2. Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Юровский П. Г. Повышение эффективности бурения шпуров применением безбойковой гидроимпульсной системы. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4(1) – С. 521-527.
3. Саруев Л.А., Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Кузнецов И.В. Силовой механизм сваебойной машины. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4(1) – С. 482-485.
4. Коровкин П.В, Пашков Е.Н. Гидроударные буровые машины. В сборнике: Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник в 2-х томах. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2013. – С. 224-227.
5. Всяких К.А., Пашков Е.Н. Оборудование погружения забивных свай. В сборнике: Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник в 2-х томах. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2013. – С. 187-190

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ОБОРУДОВАНИЯ ОЧИСТНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗАБОЯ  
НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОЕЕ**

*В. Н. Панчехин, студент гр. ГМ-13,  
научный руководитель Д. А. Задков  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2,  
Тел. 8-921-633-13-50  
E-mail: tenchu8@mail.ru*

Не смотря на использование современного высокотехнологичного оборудования процесс добычи угля в очистных забоях угольных шахт характеризуется большой неравномерностью, а потенциал очистных механизированных комплексов используется не полностью. В совокупности перерывы из-за влияние горно-геологических условий и из-за отказов горношахтного оборудования не являются единственной причиной и не объясняют полностью динамику нагрузок на очистной забой [1].

Оптимизация эффективности процесса добычи угля является сложной задачей, так как все составные части этого процессов находятся в постоянном движении, протекают параллельно и оказывают взаимное влияние на ключевые производственные параметры среди которых можно назвать, например, подготовку

выемочных столбов, обеспечение оптимальных режимов работы горных машин, надежность, доставка материалов, транспортировка и складирование горной массы. С организационной и технологической точки зрения существуют два наиболее важных фактора, определяющих эффективность (производительность) очистного забоя, это коэффициент использования рабочего времени (коэффициент готовности) и коэффициент машинного времени.

Коэффициент использования рабочего времени (коэффициент готовности), характеризует долю суммарного времени работы очистного комбайна в общей продолжительности рабочей смены. За исключением времени на проведение планового технического обслуживания или осуществление некоторых специальных непроизводительных операций все остальное время, когда бригада находится в забое, теоретически может быть эффективно использовано для добычи угля. Однако, в практических условиях производственный процесс прерывается [2]. Такие остановки могут быть вызваны рядом причин, такими как чрезмерная нагрузка, отключение оборудования, превышение содержания метана, человеческий фактор и др. Так же могут быть и внешние причины: остановка транспортной системы, аварии в системах подачи электрической и гидравлической энергии.

Коэффициент машинного времени, характеризует степень использования оборудования в лаве. Он показывает долю времени работы оборудования, которая соответствует работе комбайна с номинальной глубиной захвата и с номинальной скоростью [2]. Очистной комбайн только часть общего рабочего времени работают с номинальной глубиной захвата и номинальной скоростью. Остальное время он перемещается с меньшей скоростью или обеспечивает меньшую глубину захвата, или передвигается в режиме холостого хода при зачистки.

Таким образом, производственные потери можно подразделить на потери времени в результате снижения скорости подачи и потери, связанные с уменьшением глубины захвата.

Для оптимизации производственного процесса добычи угля в очистном забое и выявления ограничений, препятствующих повышению его эффективности предлагается использовать показатель ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness – общая эффективность оборудования), который объединяет производственные аспекты эффективности, производительность и качество одним общим показателем.

Суть подхода системы ОЕЕ, применительно к очистному забою угольной шахты, заключается в совокупном анализе метрик, характеризующих различные аспекты работы горного оборудования, включающие простои, снижение скорости и потери качества.

На основе данных ОЕЕ можно сделать вывод, возможно ли улучшение производительности на существующем оборудовании или же его возможности фактически исчерпаны и для увеличения производительности необходимо новое, или необходимо изменение параметров очистного забоя.

По существу, показатель ОЕЕ представляет собой отношение полностью продуктивного времени работы (идеального времени производства) к плановому времени работы [3]. С учетом потерь производительности и качества этот коэффициент может быть рассчитан по формуле:

$$ОЕЕ = А \cdot Р \cdot Q, \quad (1)$$

где  $A$  – доступность,  $A = \text{Рабочее время} / \text{Плановое время}$ ;  $P$  – производительность,  $P = \text{Произведенная продукция} / (\text{Идеальная скорость} \times \text{Рабочее время})$ ;  $Q$  – качество,  $Q = \text{Качественная продукция} / \text{Произведенная продукция}$ .

Его также можно определить как отношение объема произведенной качественной продукции к идеальному объему, который мог быть произведен, если бы оборудование работало на протяжении запланированного времени на максимальной (номинальной) скорости [3]. Применительно к очистному механизированному комплексу производство качественной продукции соответствует работе очистного комбайна с номинальной глубиной захвата.

Анализируя значения каждого из трех коэффициентов и сравнивая их, например, со значениями за предыдущие периоды, возможно постепенно локализовать причину потери эффективности.

Одной из главных целей ОЕЕ является снижение шести наиболее значительных причин потери эффективности работы очистного забоя (таблица 1). Для анализа эффективности работы оборудования используется система KPI (Key Performance Indicators – ключевых показателей производительности). Управление простоями (DTM – Downtime Management) заключается в более глубоком анализе причин остановки работы оборудования. Фактически задача управления простоями сводится к нахождению промежутков времени, когда оборудование не работало или работало с пониженной скоростью или качеством, и классификации этих промежутков согласно модели времени и дерева причин. После классификации промежутки времени агрегируются для каждой категории. В результате получаются статистические показатели, которые используются при расчете KPI [3]. ОЕЕ и управление простоями являются близкими задачами и дополняют друг друга.

Таблица 1. Причины потери эффективности

Причина	Категория	Примечание
Поломка оборудования	Потери из-за простоев	Существенная остановка на большое время, требующая вмешательства специалистов
Настройка	Потери из-за простоев	Замена и настройка рабочего инструмента (например, резцов)
Мини-остановка	Потеря скорости	Остановки на меньшее время, до 5 минут
Снижение скорости	Потеря скорости	Все, что не позволяет работать на максимально возможной скорости
Уменьшение ширины захвата при зарубке	Потеря качества	Потеря в добычи из-за уменьшения ширины захвата (зарубка комбайна в угольный пласт)
Зачистка лавы	Потеря качества	Потеря в добычи из-за необходимости зачистки лавы

Таким образом, метод ОЕЕ дает возможность систематизировать большое количество факторов, которые снижают эффективность работы горного оборудования, оценить степень их воздействия и оказать эффективное влияние на результат. При наличии существующих систем контроля, из которых можно

получать оперативные данные о работе оборудования, система ОЕЕ/DTM может быть достаточно быстро внедрена на горном предприятии.

#### **Список литературы:**

1. Стебнев А.В., Мухортиков С.Г., Задков Д.А. Анализ работы очистных механизированных комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» // Сборник трудов научно-практической конференции "Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017". – СПб: СПГУ, 2017.– С. 84-89.
2. Михаэль Мышковский, Ули Пашедаг. Разработка длинными очистными забоями угольных пластов средней мощности. Сравнение эффективности струговой и комбайновой выемки в сопоставимых условиях эксплуатации. – Caterpillar, Inc, 2015. – 51с.
3. Шопин А.Г., Занин И.В. ОЕЕ и управление простоями: от теории к реализации в SIMATIC IT// Автоматизация в промышленности, 2006, с.24-29.

### **ОЦЕНКА НДС МОДЕЛИ КАНАТНОГО ДЕМПФЕРА ОТ ДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

*А.А. Вакуров, студент гр. 2БМ74*

*Научный руководитель, доцент К.К. Манабаев,*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

В статье производился расчет напряженно-деформированного состояния геометрической модели демпфера, созданной на основе данных о существующем насосном агрегате, от действия статических нагрузок с целью проверки прочностных характеристик методом конечных элементов. В результате была получена картина распределения полей эквивалентных напряжений по критерию Мизеса. За основу был взят патент №2478845.

**Ключевые слова:** канатный демпфер, гашение вибраций, виброзащита, напряженно-деформированное состояние (НДС), метод конечных элементов (МКЭ).

#### **Введение**

В настоящее время совершенствование методов защиты оборудования от вибраций позволяет снизить ее негативное влияние на подвижные части оборудования, что приводит к повышению ресурса оборудования, а также понижению затрат на ремонт.

Существующие типы демпферов обладают рядом недостатков: возможность установки только на резцы токарных станков для демпферов ударного типа, возможность гашения вибраций одной частоты для пружинных, сложная конструкция у магнитных демпферов. Из-за недостатков применение этих демпферов на насосном агрегате нецелесообразно. В качестве аналога предлагается использовать канатный демпфер. Его основными достоинствами являются: возможность гашения аperiodических колебаний, простота конструкции и низкая стоимость, возможность регулирования жесткости конструкции путем изменения сечения

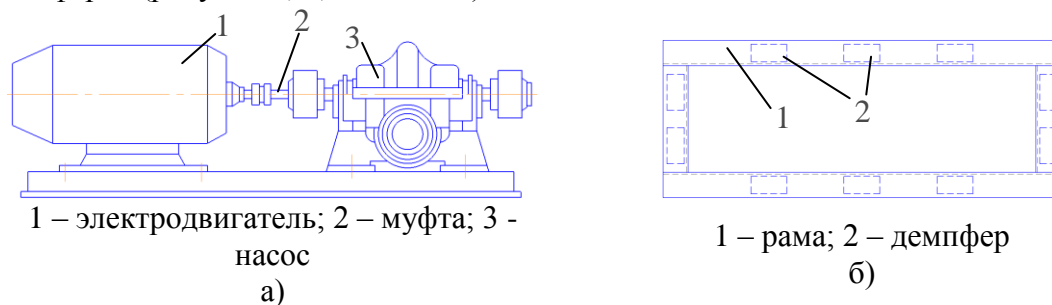


каната. Гашение вибраций канатным демпфером достигается за счет трения, возникающего между проволоками каната в процессе вибраций, из-за чего энергия вибраций переходит в тепловую энергию.

### Постановка задачи

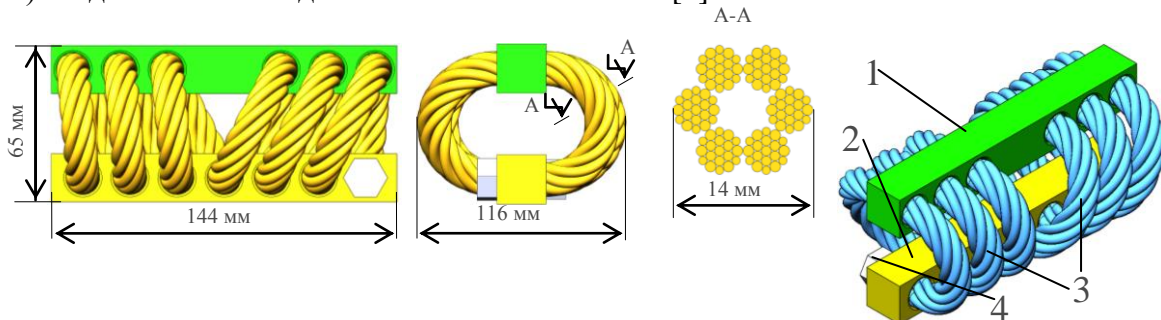
Рассмотрим задачу подбора количества канатных демпферов и проверки их статической прочности от действия нагрузок, возникающих от веса рамы и насосного агрегата.

Для нефтяного насосного агрегата 10НД-6х1 (рисунок 1, а) и рамы для него (рисунок 1, б, позиция 1) предполагается использование десяти канатных демпферов (рисунок 1, б, позиция 2).



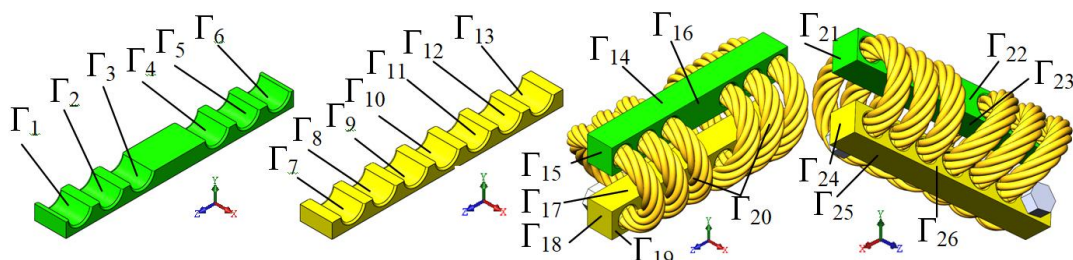
**Рисунок 1.** а) Насосный агрегат 10НД-6х1; б) Схема расположения демпферов

Для проверки прочности одного демпфера был выбран метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе ANSYS. Для расчета данным создавалась геометрическая 3D (пространственная) модель канатного демпфера. Данная геометрия демпфера состоит из следующих деталей: верхней пластины 1, которая контактирует с рамой насосного агрегата; нижней пластины 2, которая закрепляется на фундаменте; стального каната 3; двух обжимных втулок 4, в которых крепятся концы каната (рисунок 2). Модель каната создавалась по ГОСТ 2688-80 [2].



**Рисунок 2.** Геометрическая модель канатного демпфера

Математическая постановка задачи требовала обозначение граничных контуров модели и записи граничных условий.



**Рисунок 3.** Граничные контуры модели демпфера

Записи граничных условий представлены в (1), (2) и (3).

На гранях  $\Gamma_1$ - $\Gamma_{13}$ ,  $\Gamma_{15}$ - $\Gamma_{25}$ :

$$\sigma_{ij}(x) = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad x \in \Gamma_1 - \Gamma_{13}, \Gamma_{15} - \Gamma_{25}, \quad (1)$$

где  $x = (x, y, z)$  – координаты точки поверхности или ее некоторой части.

На грани  $\Gamma_{14}$ :

$$\begin{cases} \sigma_{22}(x) = P, \\ \sigma_{11}(x) = \sigma_{33}(x) = \sigma_{12}(x) = \sigma_{21}(x) = \sigma_{13}(x) = \sigma_{31}(x) = \sigma_{23}(x) = \sigma_{32}(x) = 0, \end{cases} \quad x \in \Gamma_{14}. \quad (2)$$

На грани  $\Gamma_{26}$ :

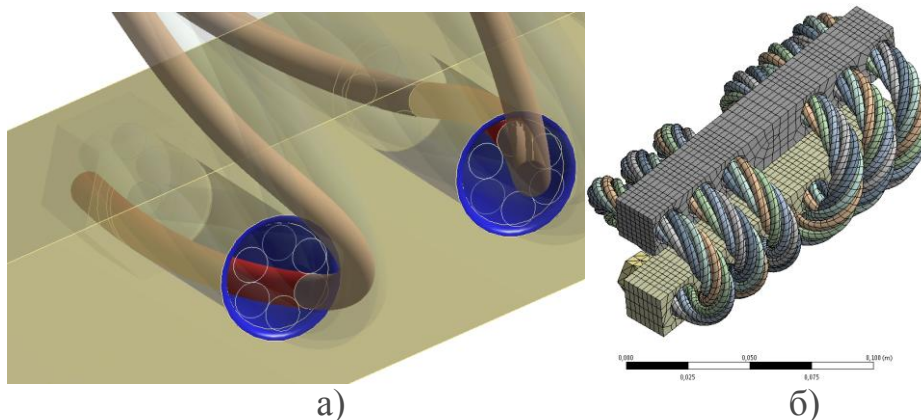
$$\begin{cases} \sigma_{ij}(x) = 0, \\ u_i(x) = 0, \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \quad x \in \Gamma_{26}. \quad (3)$$

### Расчет в среде ANSYS

Для расчета в ANSYS задавались материальные константы: для каната – модуль Юнга  $2.05 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона 0.3 (Сталь 12X18Н9); для пластин – модуль Юнга  $2.14 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона 0.29 (Сталь 40Х).

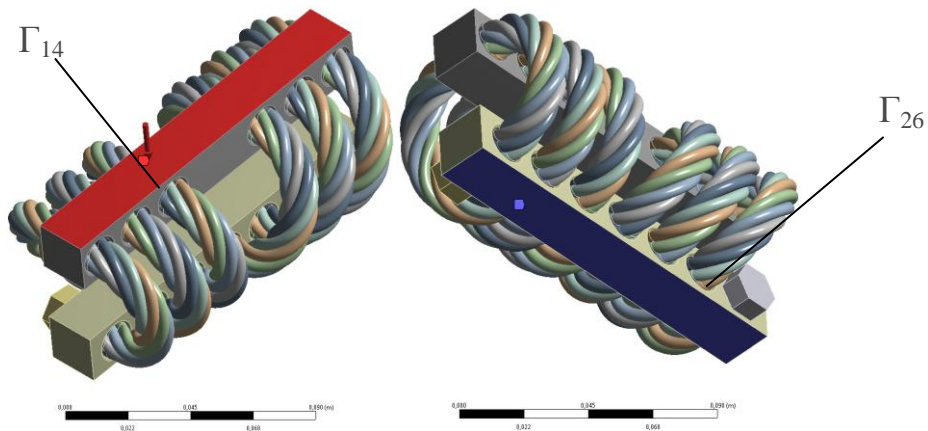
Общая площадь контакта пластин и рамы –  $0.144 \text{ м}^2$ . Диаметр каната равен 14 мм. Масса насосного агрегата составляет 2580 кг, а размеры рамы для него 2555x730 мм.

В местах контакта каната и пластин задавался тип контакта – жесткая заделка (рисунок 4, а). Геометрическая модель разбивалась на конечные элементы (рисунок 4, б) в программном комплексе метода конечных элементов ANSYS (ПК МКЭ ANSYS). Величина грани КЭ каната назначалась равной 3 мм. Количество элементов на пластинах составляет 2272.



**Рисунок 4.** а) пример контактной пары «виток-пластина»; б) конечно-элементная модель канатного демпфера

Согласно граничным условиям (2), (3) в ПК МКЭ ANSYS задавались следующие нагрузки: на поверхность  $\Gamma_{14}$  прикладывалось давление  $P = 879 \text{ кПа}$ , а на поверхность  $\Gamma_{26}$  – условие жесткой заделки.



**Рисунок 5.** Нагрузки, прикладываемые к модели

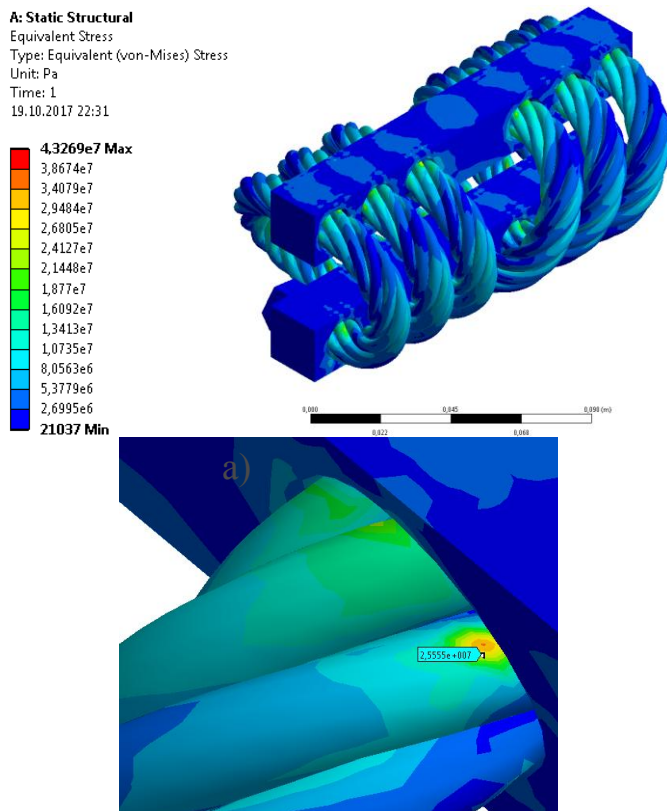
Расчет производился со следующими условиями:

1. Температура выбиралась равной  $22^\circ \text{C}$  и ее изменение не задавалось;
2. Нелинейность материалов не учитывалась;
3. Расчет происходил в статической постановке.

#### **Анализ результатов**

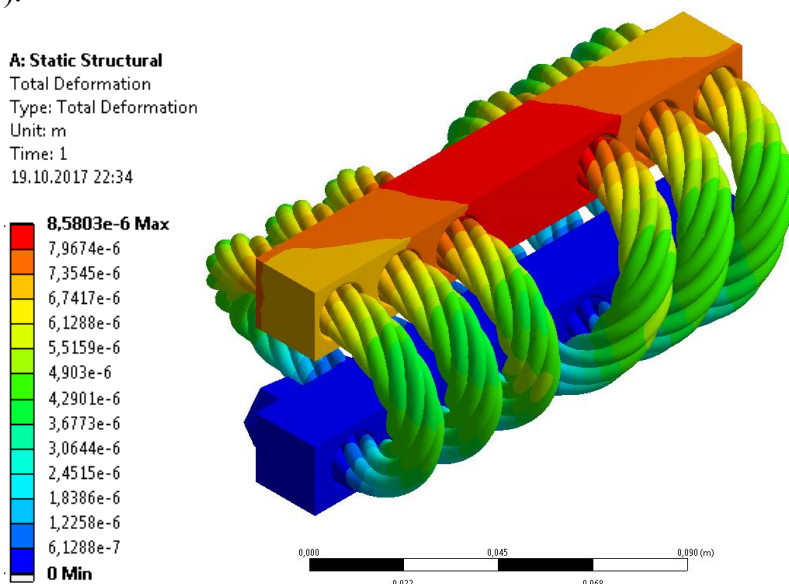
Возникающие в процессе работы насоса вибрации являются динамическими нагрузками, допустимые напряжения в этом случае будут  $\sigma_T = 230 \text{ МПа}$ , расчет же осуществлялся в статической постановке задачи, и для перехода от динамической постановки задачи к статической применялись методы, описанные в [3]. С учетом коэффициента перевода  $n = 3$  допустимые напряжения при статическом анализе  $[\sigma] = \sigma_T / n = 76.7 \text{ МПа}$ .

Исходя из картины распределения полей эквивалентных напряжений (рисунок 6, а), видно, что среднее значение напряжений примерно  $20 \text{ МПа}$ , а напряжения, возникающие вблизи контакта каната и пластины (рисунок 7, б), около  $25 \text{ МПа}$ .



**Рисунок 6.** Картина распределения полей эквивалентных напряжений по критерию Мизеса: а) на полной модели; б) вблизи контакта каната и пластины

Максимальное значение общих перемещений получилась  $u_{\max} = 8.6$  мкм (рисунок 7).



**Рисунок 7.** Картина распределения полей общих перемещений

**Выводы**

1) Исходя из полученных при расчете модели данных, можно увидеть, что возникающие напряжения находятся в пределах допустимого значения напряжений, и конструкция не разрушится под весом агрегата.

2) Так как данные демпферы предлагается применять в нефтегазовой отрасли, то есть возможны утечки газа и нефти, возникновение искр при работе демпферов могут привести к пожару, другими словами конструкция демпфера требует доработки для уменьшения пожароопасности.

**Список литературы:**

1. Пат. 2478845 Российская Федерация, МПК F16F 7/14. Канатный виброизолятор / Минасян А.М., Минасян М.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный морской технический университет – 3 с.
2. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6х19(1+6+6/6)+1. – Москва: Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.
3. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Том 2. Динамика (2-е издание). М.: Наука, 1979.
4. А.Г. Гумеров, Виброизолирующая компенсирующая система насосно – энергетических агрегатов. – Уфа, 2008. – 328 с.
5. Официальный сайт ОАО «ВИНИИАЭН» [Электронный ресурс] <http://www.vniiaen.sumy.ua>
6. РД 153 – 39ТН – 008 – 96 Руководство по организации эксплуатации и технологии и технического обслуживания и ремонта оборудования и сооружение нефтеперекачивающих станций
7. РД 153 – 39ТН – 009 – 96 Положение о системе технического обслуживания и ремонта электроустановок магистральных нефтепроводов. Часть II
8. Рудаченко А.В., Рудаченко В.А., Техническая диагностика оборудования нефтегазопроводов. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» - Томск: Изд-во. ТПУ, 2007 – 104 с.
9. Панкратов А.В., Сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ. Методические указания по выполнению практических работ для студентов очного обучения направления 130500. Томск: Изд-во. ТПУ, 2005 – 41 с.
10. Официальный сайт ГУП «ИПТЭР», [Электронный ресурс] [www.ipter.bashedu.ru](http://www.ipter.bashedu.ru)
11. Каталог электродвигателей, ОАО «Электротехническая корпорация»
12. Айрапетов Э.Л., Биргер И.А., Вейц В.Л., Колебания машин, конструкций и их элементов. Том 3. Справочник в 6 томах. Вибрации в технике
13. Балыгин В.В., Крыжановский А.Н. НАСОСЫ: Каталог-справочник. - Новосибирск: НГАСУ, 1999. – 97 с.
14. Корж В.В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций [Текст]: учеб.пособие / В.В. Корж, А.В. Сальников. - Ухта : УГТУ, 2010. - 184 с.

15. Дейнеко С. В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. — М.: Издательство «Техника», ТУМА ГРУПП, 2011. — 176 с.

16. Насосное оборудование для трубопроводного транспорта нефти нефтепродуктов, ОАО «Группа ГМС»

17. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

18. Насос магистральный НМ. [<http://www.hms.ru/pumps>].

Научное издание

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Сборник научных трудов  
XI Международной научно-технической конференции  
«Современные проблемы машиностроения»  
СПМ - 2017

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка  
*Н.В. Мартюшев*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 30.11.2017 Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 54,44. Уч.-изд.л. 49,23.  
Заказ 200. Тираж 200 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru