
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 1(25)

2022

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2022

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2022 г. №1 (25)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Редакционная коллегия

*Абдулгизис У.А. д. т. н., проф. (г. Симферополь), Глезер А. М. д. ф-м. н, проф. (г. Москва),
Бохонский А.И. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Дуюн Т.А. д. т. н., доц. (г. Белгород),
Козлов А.М. д. т. н., проф. (г. Липецк),
Копп В.Я. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Малышева Г.В. д. т. н., проф. (г. Москва),
Носенко В.А. д. т. н., проф. (г. Волжский), Обжерин Ю.Е. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Новоселов Ю.К. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Пашиков Е.В. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Суслов А.Г. д. т. н., проф. (г. Москва), Федонин О.Н. д. т. н., проф. (г. Брянск),
Ярошенко А.А. д. т. н., проф. (г. Севастополь)*

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 14.12.2022 г.

Тираж: 100 экз. Заказ №206.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;
Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru
Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.
Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.
Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Рыбаков, 7 оф. 107.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Землякова Н. В., Рогачев С. О. Структура и форма субзерен после холодной вытяжки и интенсивной пластической деформации медного прутка.....	4
Покинтелица Н.И., Братан М.И. Исследование влияния параметров режима резания на температуру в зоне контактного взаимодействия инструмента и заготовки при термофрикционной обработке сталей.....	10
Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Пятых А.С., Ушаков В.А. Технологические аспекты применения точения фрезерованием при изготовлении режущих инструментов.....	16
Дмитриева В.В., Андреев И.А., Сизин П.Е. Методики расчета и моделирования асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для прецизионных металлорежущих станков: анализ и сравнение.....	23
Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Анализ, моделирование и синтез управления многодвигательной электромеханической системой технологической установки подачи воды теплоэлектростанции.....	33
Тиманков С.И., Французова Ю.В., Демидова А.В. Разработка алгоритма выбора приоритетной задачи для системы интеллектуального управления автономной транспортной платформы при планировании ее перемещения.....	39

УДК 621.789:539.25:539.26

СТРУКТУРА И ФОРМА СУБЗЕРЕН ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ВЫТЯЖКИ И ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДНОГО ПРУТКА

Н. В. Землякова¹,
С. О. Рогачев²

¹Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе комплексными методами просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, удельного электрического сопротивления изучали преобразование структуры медного стержня диаметром 20 мм после жесткой холодной ($T = 20^{\circ}\text{C}$) деформации, состоящей из волочения, четырех и восьми проходов интенсивной пластической деформации (ИПД) методом РКУП. Показано, что после волочения и 4 проходов РКУП может быть получена оптимальная микроструктура, состоящая из субзерен в форме правильных многогранников размером 300 нм. Уменьшение параметра решетки, увеличение микротвердости и повышение удельного электросопротивления, а также большие внутренние напряжения в виде контуров экстинкции, полученные при увеличении проходов РКУП, не дают основания утверждать о возможности прохождения динамической рекристаллизации.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, чистая медь, форма субзерен, электрическое сопротивление, параметр решетки

STRUCTURE AND FORM SUBGRAINS AFTER COLD DRAWING AND SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF COPPER BAR

N.V. Zemlyakova¹,
S.O. Rogachev²

¹Mechanical Engineering Research Institute of RAS - Branch of the "Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the RAS", Russia

²The National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia, csaap@mail.ru

ABSTRACT

The complex methods of transmission electron microscopy, X-ray structural analysis, electrical resistivity were studied the transformation of structure copper rod with a diameter of 20 mm after hard cold ($T = 20^{\circ}\text{C}$) deformation, consisting of drawing, four and eight passes of severe plastic deformation by method ECAP. It was shown, that after drawing and 4 passes of ECAP an optimal structure can be obtained, consisting of subgrains in the form of polyhedrals with a size of 300 nm. Subgrains in the form of polyhedral are the result of stabilizing polygonization during SPD. A decrease in the lattice parameter, an increase in microhardness and an increase in electrical resistivity, as well as large internal stresses in the form of extinction contours with an increase in the degree of strain, do not give grounds to assert the possibility of dynamic recrystallization.

Keywords: severe plastic deformation, pure copper, subgrain form, electrical conductivity, lattice parameter.

Введение

Благодаря сочетанию методов классической деформации (волочение, прокатка, ковка) и методов интенсивной пластической деформации (кручение и равноканальное угловое прессование) получают нано и субмикроструктурные материалы с размером структурных составляющих до 100 нм и до 500 нм [1 – 12]. Известно, что после ИПД повышается прочность, но часто снижается пластичность, повышается теплоемкость и удельное электрическое сопротивление. Для увеличения пластичности меди необходимо получение бимодальной структуры или формирование наноразмерных двойников [5]. В настоящее время структура, полученная после ИПД, оценивается процентной долей высокоугловых границ зерен, полученных в процессе динамической рекристаллизации (ДР) [дегтярев]. А если ДР не было, так как температура начала рекристаллизации меди составляет 180°C, а образец при интенсивной пластической деформации не получил нагрева до этой температуры [1]. Понятно, что после холодной интенсивной пластической деформации образованы дефектные границы субзерен, которые имеют разную природу (наклонные, скрученные) и разный набор дефектов. Поэтому после холодной интенсивной пластической деформации необходима релаксация, иначе в материале появятся трещины. Возможность динамической рекристаллизации меди при комнатной температуре отмечена в работе [1], но если деформация проведена при отрицательных температурах (криогенная обработка) [4]. В случае прохождения динамической рекристаллизации субзерна меди должны будут представлять равноосные двойники отжига, но этого не наблюдается. Также, хорошо известно, что в металлах с низкой энергией дефектов упаковки, например, меди – поперечное скольжение и переползание дислокаций, а, соответственно, и динамическая полигонизация, затруднены [7]. В этом случае для релаксации возможен только отдых, в результате которого снижается количество вакансий и, соответственно, повышается удельное электрическое сопротивление. Известно, что если плотность дислокаций при отдыхе не меняется, то отдых не сопровождается изменением механических свойств (медь, латунь, никель). После стадии множественного скольжения наступает стадия динамического отдыха, с термически активируемым переползанием дислокаций в другие плоскости с последующей аннигиляцией дефектов противоположного знака [8]. Таким образом, термически активированные процессы релаксации в меди при комнатной температуре не работают. Другим способом релаксации меди может служить переход малоугловой границы субзерен в высокоугловую, двойниковую.

В настоящей работе проведем анализ механизма релаксации технической чистой меди после волочения и 4 и 8 проходов интенсивной пластической деформации методом РКУП при комнатной температуре.

Материалы и методика

Для исследования был получен пруток чистой меди (99,97 %) диаметром 20 мм и длиной 150 мм в исходном состоянии после волочения при $T = 20^\circ\text{C}$. ИПД методом РКУП проводили на вертикальном гидравлическом прессе марки RHP 250 с максимальным усилием 40 т в течение 4 и 8 проходов по маршруту Вс при комнатной температуре. Структуру и физические свойства меди изучали в поперечном сечении образцов. В работе использовали комплексные методы исследования: электронной и оптической микроскопии на

просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM–2100 (JEOL) в светлом и темном поле. Рентгеновский структурный анализ (РСА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3М с использованием излучения $\text{CoK}\alpha$ в интервале углов 2θ от 40 до 115°. Микротвердость измеряли на ПМТ- 3 по стандартной методике. Удельную электрическую проводимость определяли по формуле: $\Omega = \frac{1}{\rho}$, где ρ – удельное электрическое сопротивление, которое измеряли вихретоковым методом на многофункциональном переносном приборе МВП – 2М, который состоит из электронного блока и измерительного преобразователя (в дальнейшем датчика), соединенных между собой гибким кабелем.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 - 2 представлена ПЭМ микроструктура меди после 4 и 8 проходов РКУП.

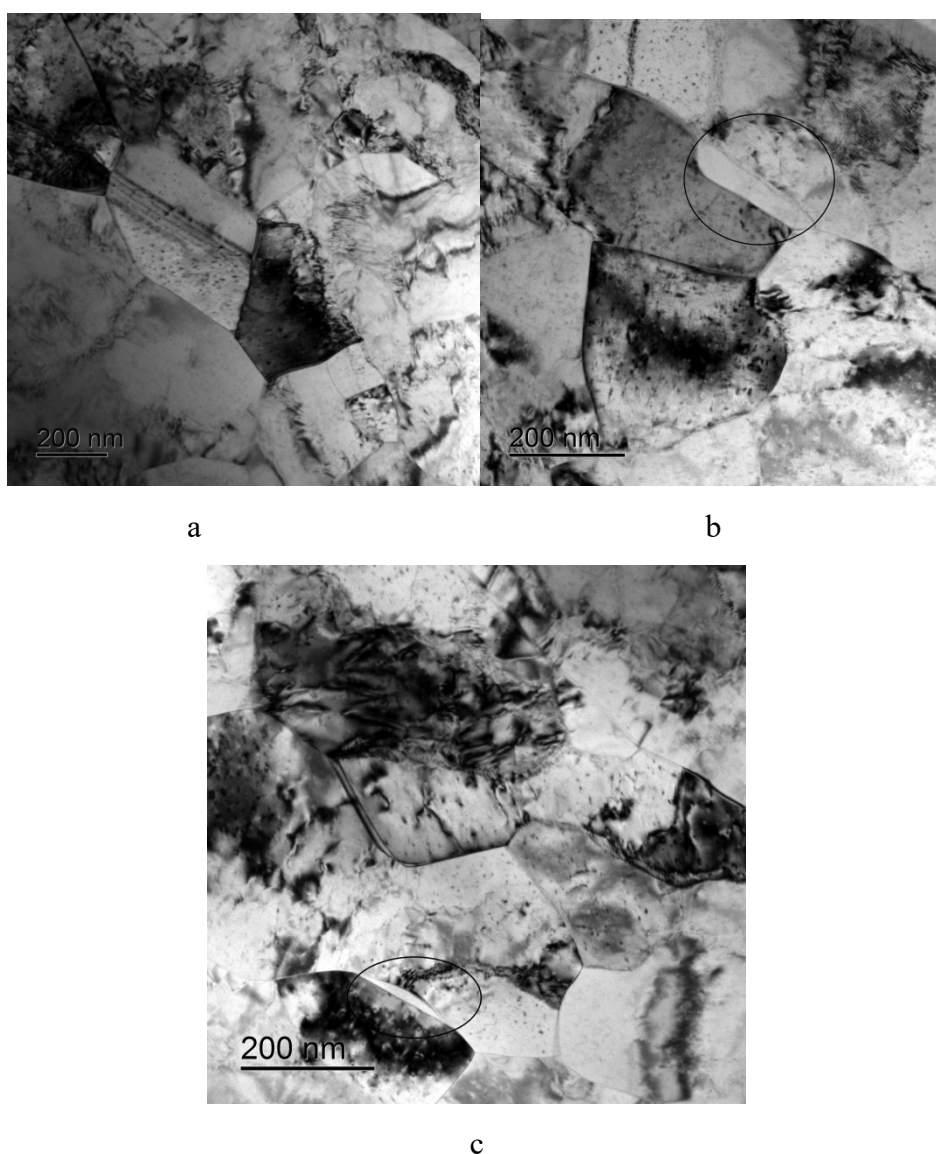


Рисунок 1. ПЭМ микроструктура меди после 4 проходов РКУП

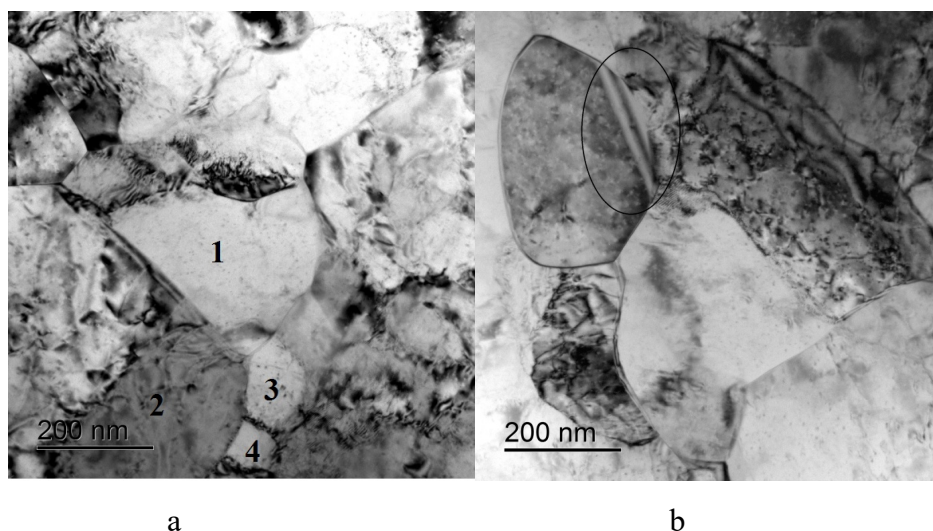


Рисунок 2. ПЭМ микроструктура меди после 8 проходов РКУП

После волочения субзерна имеют ширину 1000 нм [6]. При сравнении ПЭМ микроструктуры после 4 и 8 проходов РКУП образована фрагментированная полосовая субструктура. Рассмотрим подробнее размер и форму субзерен меди после 8 проходов РКУП, которая представлена на рис.2, а. Она состоит из субзерен, которые имеют форму правильных многогранников №1 и фрагменты неправильной формы №2 размерами 300 - 500 нм. Условный средний размер субзерна составил 200 нм, так как есть бездефектные кристаллы размером 100 нм №4 и кристаллы с выходом дислокаций №3 размером 150 нм, которые разделены сильно дефектными границами. Как известно, материалы с таким размером субзерен относят к субмикроструктурным материалам. Субзерна, рассмотренные выше, полученные в результате множественного скольжения плоскостей деформации занимают основную площадь в сечении [1]. Меньшая площадь занята субзернами, полученными в результате двойникования. На ПЭМ структуре после 4 проходов РКУП в месте субзеренной границы виден двойник длиной 220 нм и шириной 43 нм и длиной 200 нм и шириной 20 нм соответственно (рис.1а,б в кружочке). Появление зародышей двойников отжига в форме стамески происходит в результате релаксации внутренних деформационных напряжений при замене малоугловой субграницы на высокоугловую, двойниковую [11]. На ПЭМ структуре после 8 проходов РКУП (рис. 2,а в круге) вблизи тройного стыка образовался двойник длиной 220 нм и шириной 30 нм. Это происходит также в результате релаксации деформационных напряжений. Проведем сравнение полученных микроструктур. Для простоты изложения назовем 4 прохода РКУП за 1 цикл и 8 проходов РКУП – 2 цикл. На Рис.1 и.2 видно, что каждое субзерно имеет свой набор дефектов. Субзерна содержат дефекты структуры в виде субграниц разной ширины, контуры экстинкции и дислокационные контуры шириной 50 нм, которые сами являются малоугловой границей субзерна [1], точечные выходы дислокаций, двойники деформации [6]. Вышеперечисленный набор дефектов характерен для меди в напряженном состоянии, что хорошо подтверждается изменением значений физико – механических характеристик: увеличению микротвердости, уменьшению параметра решетки и увеличению удельного сопротивления после 4 проходов РКУП, приведенных в таблице 1. После 8 проходов РКУП полученные характеристики практически не изменились. Для справки приводятся физико – механические характеристики после отжига при температуре 450°C.

Таблица 1. Экспериментальные данные: микротвердости, параметра решетки и электропроводности (удельного электросопротивления) меди после волочения и числа проходов РКУП

Состояние меди	Микротвердость. Н, (МПа)	Параметр решетки a, (Å)	Удельное электрическое сопротивление, ρ, Ом.мм ² /м
Исходное (волочение)	1240	3,6105	0,0228
4 прохода РКУП	1440	3,6095	0,0241
8 проходов РКУП	1445	3,6088	0,0215
Отжиг	750	3,615	0,0175

В таблице 1 приведены экспериментальные данные, полученные следующими методами: микротвердости, рентгеноструктурного анализа (параметр решетки), токовихревой метод (удельное электрическое сопротивление). Методы относятся к структурно чувствительным. По данным таблицы 1 можно проследить изменение физико – механических характеристик меди на разных этапах деформационной обработки в сравнении с состоянием меди после отжига. Из данных таблицы 1 видно, что основные изменения происходят после четырех проходов РКУП: увеличение микротвердости на 200 МПа, значительное уменьшение параметра решетки во втором знаке после запятой и увеличение удельного электросопротивления по сравнению с исходным состоянием после волочения. Изменение данных параметров характерно для деформационного упрочнения материала при холодной пластической деформации. После 8 проходов РКУП микротвердость и параметр решетки практически не изменяются, а удельное электросопротивление незначительно снижается, что возможно происходит из-за аннигиляции вакансий. Высокие значения физико – механических параметров подтверждают отсутствие динамической рекристаллизации меди за 8 проходов РКУП. Таким образом, в течение 4 и 8 проходов РКУП меди получена микроструктура, состоящая из субзерен в форме правильных многогранников с различным набором дефектов, расположенным внутри и по их границам и субзерен с двойниками. А изменение физико-механических свойств и появление высокоугловых двойниковых границ субзерен соответствует отдыху. Релаксационные процессы в меди частично можно связать с переходом малоугловых границ субзерен в высокоугловые двойниковые границы.

Заключение

В результате деформационной обработки чистой меди, включающей волочение и 4 и 8 проходов РКУП получена достаточно однородная на микроуровне структура в сечении 1 мкм², состоящая из субзерен полученных после множественного скольжения размерами 300 – 500 нм и двойников отжига в форме пластин длиной 200 нм, полученных после двойникования.

Физико-механические свойства меди от волочения до 8 прохода РКУП монотонно изменяются до максимума микротвердости и минимума параметра решетки, при этом

немонотонно изменяется удельное электросопротивление: увеличивается к 4 проходам и снижается к 8 проходу, которое можно объяснить понижением количества вакансий. Полученные при ИПД характеристики структуры меди характерно для начала стадии стабильной полигонизации. Оптимальной для использования структуру и физико-механическим свойства можно получить после волочения и первого цикла РКУП.

Релаксационные процессы при деформировании связаны с заменой малоугловых границ на высокоугловые двойниковые.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

Список литературы

1. Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А. / Э.В. Козлов – М.: Физматлит, 2016. – 360 с.
2. Перевезенцев, В.Н., Рыбин, В.В. / Изд. – во. Нижегородского университета, 2012. – 307с.
3. Рыбин В.В. / В.В. Рыбин – М.: Металлургия. 1986. – 224с.
4. Конькова, Т.Н., Миронов, С.Ю., Корзников, А.В. Криогенная деформация меди. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки*. 2009. Т. 2 (19). С. 280 – 283.
5. Wang, J., & Zhang, X. (2016). Влияние двойникового на прочность и пластичность металлических материалов. *MRS Bulletin*. 2016. Vol. 41. № 4. P. 274-281. DOI:10.1557/mrs.
6. Землякова Н.В., Рогачев С.О. Аккомодация структуры и механических свойств чистой меди в процессе интенсивной пластической деформации. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16. №1. С. 131 – 136. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.01.019.
7. Rogachev S.O., Zemlyakova N.V. Structural transformation of copper during severe plastic deformation. 2020. *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* 709. 033001.
8. Гаркунов, Д.Н., Поляков, А.А., Рыбакова Л.М. / Д.Н. Гаркунов – М.: Машиностроение, 1977. – 214 с.
9. Федоров В.А., Тялин Ю.И., Тялина В.А. / В.А. Федоров – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 336с.
10. Бродова И.Г., Зельдович В.И., Хомская И.В. Фазово – структурные превращения и свойства цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях. *Физика металлов и материаловедение*. 2020. Т.121. №7. С. 696 – 730. DOI: 10.31857/S0015323020070025
11. Рыбин В.В., Ушанова Э.А., Золоторевский Н.Ю. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь – медь, полученной сваркой взрывом. *ЖТФ*. 2013.Т.83. №9. С. 63 – 72.
12. Землякова Н.В., Рогачев С.О. Форма и размеры фрагментированных полос после холодных вытяжки и интенсивной пластической деформации медного прутка. *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т.83. №2. С. 220 – 225. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-220-226.

УДК 621.923:621.90.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ
НА ТЕМПЕРАТУРУ В ЗОНЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ
ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ**

***Н. И. Покинтелица¹,
М.И. Братан¹***

¹ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию влияния параметров режима резания на температуру в зоне контактного взаимодействия инструмента и заготовки при термофрикционной обработке сталей. В ходе исследований установлено, что максимальная температура в зоне контакта с ростом удельных нагрузок при постоянной скорости резания возрастает, не обнаруживая заметной стабилизации. При увеличении скорости скольжения (при постоянных удельных нагрузках) максимальная температура вначале возрастает, однако по достижении некоторой скорости начинается ее снижение. Это снижение связано с увеличивающейся теплоотдачей в окружающую среду и материал заготовки. Влияние нормальной удельной нагрузки и скорости на максимальную температуру скользящего контакта, обуславливающую фрикционные свойства материалов, в исследуемом диапазоне изменения нормальной нагрузки и скорости скольжения не равнозначно. Причем основное различие обусловлено изменением теплоотдачи в окружающую среду и обрабатываемый материал с ростом скорости относительного скольжения РД и заготовки.

Ключевые слова: режимы резания, температура, термофрикционная обработка, теплоотдача.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CUTTING MODE PARAMETERS
ON THE TEMPERATURE IN THE CONTACT AREA
TOOLS AND WORKPIECES WITH THERMAL FRICTION
PROCESSING OF STEELS**

***N.I. Pokintelitsa¹,
M.I. Bratan¹***

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the influence of the parameters of the cutting mode on the temperature in the zone of contact interaction of the tool and the workpiece during the thermal friction treatment of steels. In the course of research, it was found that the maximum temperature in the contact zone increases with an increase in specific loads at a constant cutting speed, without revealing noticeable stabilization. With an increase in the sliding speed (at constant specific loads), the maximum temperature initially increases, but after reaching a certain speed, its decrease begins. This

decrease is due to the increasing heat transfer to the environment and the workpiece material. The influence of the normal specific load and velocity on the maximum temperature of the sliding contact, which determines the frictional properties of materials, is not equivalent in the studied range of changes in the normal load and sliding velocity. Moreover, the main difference is due to the change in heat transfer to the environment and the processed material with an increase in the relative sliding speed of the RD and the workpiece.

Keywords: cutting modes, temperature, thermal friction treatment, heat transfer.

Постановка проблемы

Внешне простой процесс термофрикционной обработки (ТФО) в действительности весьма сложен и представляет собой целый комплекс взаимосвязанных явлений. К числу таких явлений относятся: интенсивное локализованное тепловыделение на поверхностях трения; непрерывное образование металлических связей между этими поверхностями и немедленное их разрушение вследствие продолжающегося относительного движения поверхностей; почти мгновенный нагрев и столь же быстрое охлаждение малых объемов металла в условиях больших местных давлений; упруго-пластическая деформация в микрообъемах шероховатых поверхностей и в приповерхностных слоях металла; наклеп и рекристаллизация; взаимная диффузия, а также взаимное механическое внедрение частиц материала инструмента и заготовки; разрушение окисных пленок и удаление их из зоны контакта вместе с пластифицированным металлом; интенсивное перемещение дислокаций и активация поверхностей контакта. Вязкое течение металла в условиях одновременного сжатия и сдвига интенсифицирует активацию поверхностей трения [1]. В результате взаимного наложения ряда названных выше явлений получается сложная картина течения процесса ТФО.

Решение проблемы определения температуры в зоне контакта инструмента, выполненного в виде режущего диска (РД) при ТФО сталей, отражено в работах ряда авторов [2, 3], где рассмотрены источники теплообразования, специфика пластической деформации и геометрическая форма зоны стружкообразования. Однако большое число совмещенных во времени и взаимосвязанных закономерностей, которым подчинен процесс термофрикционного резания (ТФР), не позволило до настоящего времени получить достоверные данные об особенностях контактного взаимодействия РД и материала заготовки, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель статьи. Определение влияния параметров режима резания и свойств обрабатываемого материала на температуру в зоне контакта инструмента и заготовки при ТФО сталей.

Изложение основного материала

Весь процесс ТФР удобно рассматривать состоящим из нескольких фаз.

В первой фазе происходит начальный контакт поверхностей трения РД и заготовки. По мере увеличения скорости вращения РД наблюдается процесс граничного трения в присутствии быстро разрушающихся жировых пленок; в контакт вступают отдельные микровыступы; начинается их деформация и обнажение ювенильных участков поверхностей трения; появляются первые очаги схватывания; граничное трение уступает место сухому.

Вторая фаза характеризуется лавинообразным увеличением числа взаимодействующих микровыступов поверхностей РД и материала обрабатываемой заготовки, ростом фактической площади контакта и температуры. С ростом температуры наблюдается быстрое снижение

предела текучести металла заготовки и его сопротивления деформации. Момент трения сначала быстро нарастает, затем замедляется и к концу второй фазы его значение достигает максимального; трение распространяется на всю поверхность контакта РД и заготовки; появляется тонкий слой пластифицированного обрабатываемого металла, выполняющего роль смазочного материала; трение из сухого становится как бы граничным.

Третья фаза отличается постепенным подъемом температуры металла срезаемого слоя и, как следствие, спадом момента трения; начинается вытеснение из зоны контакта пластифицированного металла. К концу третьей фазы температура достигает максимального значения, а момент трения, мощность тепловыделения стабилизируются; наступает состояние, близкое к «квазистационарному».

Четвертая фаза – фаза квазистационарного процесса контактного взаимодействия, которая характерна установившимся состоянием многих параметров процесса: момента трения, мощности тепловыделения, температуры в зоне контакта. К концу этой фазы металл в зоне контакта пластифицирован, поверхности трения активированы, обломки пленок окислов и инородные включения удалены, образуется жидкая фаза прослойки между рабочими поверхностями РД и обрабатываемым металлом.

Механическая энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения, рассеивается в форме тепла на площадках фактического контакта (место действия молекулярных сил внешнего трения), а также в объемах деформируемых микровыступов. Источник тепла, таким образом, представляется в виде активного теплогенерирующего приповерхностного слоя некоторой небольшой толщины.

Тепловыделение в зоне контакта при ТФР может проявляться кратковременными, но мощными импульсами и, следовательно, на поверхностях микровыступов контактных поверхностей инструмента и заготовки и в их объемах могут возникать температурные всплески с быстрым нарастанием температуры и столь же быстрым ее спадом. Однако благодаря теплопроводности температура приповерхностных слоев в целом и более глубоких слоев металла в процессе обработки постепенно нарастает. Здесь важно отметить, что в результате локального тепловыделения в сопряженных поверхностях инструмента и заготовки при трении градиент температур по нормали к поверхности трения отрицателен, т.е. по мере удаления от поверхности трения температура уменьшается. Вместе с изменением температуры изменяются и механические свойства материала: по мере удаления от поверхности трения его прочность возрастает. Установлено, что при внешнем трении толщина активного теплогенерирующего слоя обычно составляет несколько десятков микрон, причем она уменьшается с увеличением относительной скорости движения поверхностей инструмента и заготовки, а это, в свою очередь, влечет за собой уменьшение деформационной составляющей силы трения и, соответственно, рассеиваемой на поверхности мощности.

Температура, развивающаяся на фрикционном контакте, является функцией параметров режима трения и собственно свойств контактирующих материалов.

Представляет значительный теоретический и практический интерес исследование взаимосвязи температуры поверхности трения с параметрами режима обработки для различных сочетаний материалов инструмента и заготовки в условиях высокоскоростного трения скольжения, характеризующегося интенсивным тепловыделением на фрикционном контакте.

В настоящей работе исследовалось влияние скорости скольжения и удельной нагрузки на величину поверхностной температуры при ТФО заготовок из сталей 45 и 12Х18Н12Т. Диаметр режущего диска $D = 500$ мм. Материал диска – сталь 50Г. Ширина обрабатываемой поверхности $B = 90$ мм. Площадь контакта диска с заготовкой – 270 мм^2 . Схема контактирования и нагружения предусматривала обеспечение равномерно распределенного

контакта. Обработка проводилась на скоростях скольжения $V = 42, 52, 65, 82$ м/с и удельных нагрузках $p = 21, 17, 13, 11$ МПа. Замеры температуры в зоне контакта осуществлялись с помощью хромель-алюмелевых термопар, установленных в заготовках.

В каждой заготовке устанавливались три термопары – две поверхностные для измерения средней температуры поверхности трения (головка термопары непосредственно выводилась на поверхности трения) и одна объемная на глубине ~ 1 мм от поверхности трения. Записи температур, момента трения (коэффициента трения), нагрузки и скорости по времени процесса производились одновременно, что позволяло проводить объективную оценку взаимозависимости фрикционных и температурных характеристик с учетом скорости и нагрузки.

Испытания проводились в зоне нестационарного теплового режима, т.е. до выхода на стационарный температурный режим (в зоне нарастания температуры). Это позволяло получать ряд мгновенных значений коэффициента трения и соответствующие им значения температуры трения при постоянных для данного режима трения скорости скольжения и удельного давления.

Согласно [1, 4] максимальная температура поверхности трения $\Theta_{\max}$, определяемая на основе использования гипотезы суммирования температур на фрикционном контакте, является однозначной функцией средней поверхностной температуры Θ^* (для данного сочетания материалов инструмента и заготовки, а также режима трения)

$$\Theta_{\max} = \Theta^* + B \exp(-C\Theta^*),$$

где B и C – постоянные коэффициенты, зависящие от материалов и режима трения пары инструмент-заготовка.

Средняя поверхностная температура Θ^* – это температура, которая равномерно или по какому-либо закону распределена по номинальной площади контакта инструмента и заготовки. Приближенное значение средней поверхностной температуры можно получить экспериментальным (с помощью замера) или расчетным путем.

В связи с изложенным представляется возможным рассмотреть вначале влияние скорости скольжения и нормальной удельной нагрузки на среднюю поверхностную температуру, определение которой выполнялось экспериментально с помощью термопар. Термопара фиксирует некое усредненное значение поверхностной температуры, распределенной по номинальной площади. Исключения могут составить случаи, когда головка термопары попадает в так называемую «горячую зону», образование которой является результатом нарушения равномерности распределения пятен контакта по номинальной поверхности трения и сосредоточения их в отдельных участках вследствие термоупругих явлений в материалах в процессе трения. Для схемы контакта РД и заготовки, реализуемой в эксперименте, возможность возникновения таких случаев невелика. Поэтому можно считать температуру, которую фиксирует термопара, некоторой усредненной температурой поверхности.

Характер изменения средней поверхностной температуры Θ^* в зависимости от скорости скольжения и удельной нагрузки для исследуемых материалов представлен в виде графиков на рис. 1. Как можно видеть из приведенных данных, наиболее высокая температура Θ^* (1180 °С) в исследуемом диапазоне скоростей и удельных нагрузок была зафиксирована для контактируемой пары «Сталь 50Г (РД) – сталь 12Х18Н12Т (заготовка)» (рис. 1, а). Максимальная температура при контактировании РД из стали 50Г и заготовки из стали 45 составляла 1070 °С (рис. 1, б).

Анализ полученных данных показывает, что для исследованных материалов при постоянной скорости скольжения наблюдается увеличение Θ^* с ростом удельной нагрузки, причем величина Θ^* тем выше, чем выше скорость скольжения. При постоянной удельной нагрузке увеличение скорости вращения РД приводит к росту средней поверхностной температуры в зоне контакта. Наиболее интенсивное увеличение Θ^* происходит при относительно невысоких скоростях скольжения (40 – 60 м/с), в то время как при более высоких скоростях наблюдается тенденция к стабилизации величины Θ^* и даже к некоторому снижению ее по мере нарастания скорости при фиксированной удельной нагрузке.

Положение максимума на кривых зависимости температуры от скорости не постоянно; оно зависит для данной пары трения от величины удельной нагрузки p . Например, для пары сталь 50Г – сталь 45 при небольших удельных нагрузках ($p = 11 - 13$ МПа) максимум средней поверхностной температуры Θ^* фиксируется при скорости скольжения 70 – 80 м/с, а при возрастании его положение несколько смещается в сторону больших скоростей. Максимум замеренной средней поверхностной температуры для стали 12Х18Н12Т в отличие от стали 45 отмечается при меньших скоростях скольжения, однако сохраняется тенденция к смещению его в сторону больших скоростей при увеличении p . Следует отметить, что наличие максимума на кривых $\Theta^* = \Theta(V)$, отмечаемое для исследованных материалов, наиболее четко выражено для пары трения сталь 50Г (инструмент) – сталь 12Х18Н12Т (заготовка).

В процессе обработки при удельных нагрузках 13 – 17 МПа и скоростях скольжения 42 – 82 м/с наблюдалось наволакивание частиц обрабатываемого материала на рабочие поверхности РД, причем наиболее интенсивное наволакивание происходило при скоростях 42 – 65 м/с, а далее ослабевало.

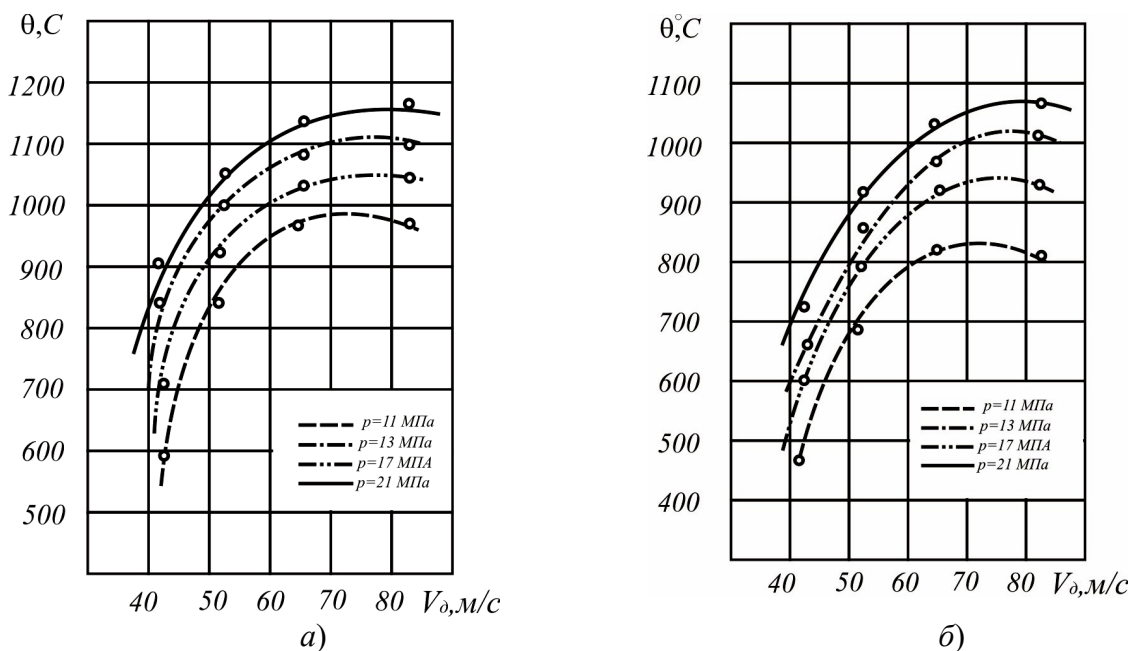


Рисунок 1. Зависимость средней поверхностной температуры Θ^* от скорости РД V_δ и удельного давления p при обработке стали 12Х18Н12Т (а) и стали 45 (б)

Исследование микроструктуры образца из стали 12Х18Н12Т, выполненное на поперечном шлифе, вырезанном из образца после испытания на скорости 65 м/с, показало, что в поверхностном слое происходят существенные изменения (рис. 2), заключающиеся в образовании диспергированного слоя с повышенной по сравнению с исходным состоянием микротвердостью. По мере удаления от поверхности трения можно видеть образование мелких равноосных зерен с двойниками (отожженная структура). При этой скорости наиболее четко видны также следы пластического течения локальных объемов металла в слоях, прилегающих к поверхности. Увеличение удельной нагрузки при постоянной скорости ведет к увеличению общей толщины и сплошности зоны с измененной структурой.



Рисунок 2. Микроструктура обработанной поверхности заготовки из стали 12Х18Н12Т (увеличение $\times 200$)

Анализ данных, представленных на рис. 1, показывает, что, несмотря на снижение некоторых параметров, средняя поверхностная температура Θ^* будет возрастать с увеличением нормального давления. На изменение средней поверхностной температуры будет оказывать значительное влияние коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, который практически не влияет на величину Θ^* в случае изменения нормальной нагрузки при постоянной скорости вращения РД. Влияние коэффициента теплопроводности на среднюю поверхностную температуру Θ^* с ростом скорости скольжения будет осуществляться следующим образом: вначале это влияние в сторону уменьшения Θ^* незначительно, с увеличением же скорости скольжения оно возрастает и при определенном значении становится настолько существенным, что средняя поверхностная температура начинает падать. Таким образом, увеличение коэффициента теплопроводности с ростом скорости скольжения может вызывать падение средней поверхностной температуры.

Выводы

Максимальная температура в зоне контакта с ростом p при $V = \text{const}$ возрастает, не обнаруживая заметной стабилизации. При увеличении скорости скольжения (при $p = \text{const}$) максимальная температура вначале возрастает, однако по достижении некоторой скорости начинается ее снижение. Это снижение связано с увеличивающейся теплоотдачей в окружающую среду и материал заготовки.

Влияние нормальной удельной нагрузки и скорости на максимальную температуру скользящего контакта, обуславливающую фрикционные свойства материалов, в исследуемом диапазоне изменения нормальной нагрузки и скорости скольжения не равнозначно. Причем

основное различие обусловлено изменением теплоотдачи в окружающую среду и обрабатываемый материал с ростом скорости относительного скольжения РД и заготовки.

Список литературы

1. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения.—М.: Машиностроение, 1980.— 136 с.
2. Зарубицкий Е.У. Температура снимаемого припуска при термофрикционном резании // Оптимизация процессов резания жаропрочных и особо прочных материалов.—Уфа: Изд-во УАИ, 1986.—С. 106–110.
3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента.—М.: Машиностроение, 1992.— 240 с.
4. Мамхегов М.А. Расчет максимальной температуры скользящего контакта машин при малых значениях коэффициента взаимного перекрытия // Вестник машиностроения, 1975. – № 3. – С. 32–34.
5. Волков О.А. Исследование теплodeформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой // ВЕЖПТ. 2016. №5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoy>.
6. Покинтелица Николай Иванович, Левченко Елена Александровна, Кравченко Ольга Сергеевна Теплообразование и температура в зоне резания при высокоскоростной обработке сталей режущим диском // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №8-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teploobrazovanie-i-temperatura-v-zone-rezaniya-pri-vysokoskrostonoy-obrabotke-staley-rezhushchim-diskom>.
7. Ю. К. Новоселов, С. М. Братан, Н. И. Покинтелица Динамическая модель процесса обработки вращающимися дисковыми инструментами // Вісник двигунобудування. 2008. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-model-protsesta-obrabotki-vraschayuschimisya-diskovymi-instrumentami>.

УДК 621.914

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОЧЕНИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

**Г.В. Матлыгин¹,
А.В. Савилов¹,
А.С. Пятых¹,
В.А. Ушаков¹**

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Представлен анализ технологических операций процесса механообработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали на многоцелевом станке. Приведены требования к качеству обработанных поверхностей фрезы. Показано, что некоторые операции,

выполняемые классическим продольным точением, могут быть заменены на более прогрессивные операции точения-фрезерованием, что позволит увеличить производительность обработки. Полученные в работе результаты позволяют определить технологические операции, используемые при механообработке осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали, в которых точение-фрезерованием может дать наибольший технико-экономический эффект. Даны рекомендации по продолжению исследований с учетом дополнительных факторов.

Ключевые слова: точение фрезерованием; фреза; быстрорежущая сталь; режущий инструмент; качество поверхности.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF TURN-MILLING USING FOR CUTTERS MANUFACTURING

*G. V. Matlygin¹,
A. V. Savilov¹,
A. S. Pyatykh¹,
V. A. Ushakov¹*

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

ABSTRACT

The analysis of machining process of high speed steel rotating cutting tools on multitask machine tool is presented. Quality requirements for machined surfaces of the mill are given. It is shown that some processes, which are performed by classical turning, can be changed for advanced turn-milling ones, which can increase a productivity of machining. The results obtained in the work allow determining processes, which are used for machining of high speed steel rotating tools, where turn-milling can give maximal economical effect. Recommendations were given to continue the study taking into account other factors.

Keywords: turn-milling; mill; high speed steel; cutters; surface quality.

Производство режущего инструмента относится к одной из наиболее высокотехнологичных отраслей промышленности [1]. Можно выделить производство сборных инструментов, включая производство корпусов и сменных пластин для них, и производство монолитных инструментов. Современный технологический процесс изготовления монолитных инструментов, в свою очередь, зависит от инструментального материала. Если изготовление инструментов из твердого сплава выполняется на пяти координатном шлифовально-заточном станке с ЧПУ за один установ, то для изготовления инструментов из быстрорежущей стали применяется более сложная технология [2]. Основная часть операций при этом выполняется на многоцелевом станке. Данный тип оборудования, являясь одним из наиболее сложных в освоении, предоставляет широкие возможности для оптимизации процесса механообработки различными методами. К таким методам относится точение-фрезерованием [3, 4, 5]. Точение-фрезерованием — это перспективная технология обработки, которая выполняется для обработки симметричных или несимметричных вращающихся деталей, где и заготовке, и инструменту одновременно придается вращательное движение (рис. 1).

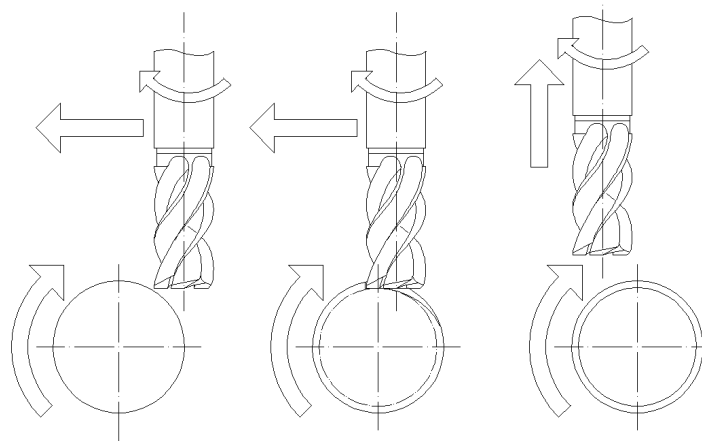


Рисунок 1. Принципиальная схема точения фрезерованием

Данный тип лезвийной механообработки позволяет достичь следующих преимуществ перед классическим продольным точением: повысить производительность, улучшить качество обработанной поверхности, снизить температуру в зоне резания [7, 8, 9]. Однако, указанные результаты достигаются при правильном применении метода точения-фрезерованием, основанном на технологическом анализе и научных исследованиях. Также важным фактором является учёт особенностей обрабатываемого материала. В настоящее время прогрессивные монолитные режущие инструменты изготавливаются из быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии. Данный инструментальный материал повышает технико-экономические показатели инструментов, но требуются дополнительные исследования его обрабатываемости резанием.

Следует заметить, что реализация метода точением-фрезерованием возможна также на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом [10]. Несмотря на то, что указанное оборудование не обладает такими функциональными возможностями как многоцелевой станок, в некоторых случаях применение более простого и дешевого оборудования может дать значительный экономический эффект. Очевидно, что выбор станка для реализации технологии точения-фрезерованием следует делать на основе как технико-экономического анализа, так и анализа изделия на технологичность.

Целью данной работы является определение операций технологического процесса механообработки режущих инструментов из быстрорежущей стали, где применение точения фрезерованием наиболее эффективно.

В качестве примера рассмотрим концевую фрезу из быстрорежущей стали для черновой обработки титановых сплавов (рис. 2). Технологический процесс изготовления данного инструмента, без учёта нанесения защитного покрытия, можно разделить на три основных этапа:

- 1) предварительная и окончательная обработка перед термообработкой;
- 2) термообработка;
- 3) формирование геометрии режущей части.

Первый этап в современном инструментальном производстве выполняется на многоцелевом станке. На данном этапе осуществляется обработка таких фрагментов фрезы как

хвостовик, режущая часть и шейка (при наличии) (рис. 3). Рассмотрим подробнее технологические переходы, которые выполняются классическими токарными инструментами, например, проходными резцами.

С помощью продольного точения производится предварительная и окончательная обработка хвостовика, шейки и предварительная обработка режущей части, предваряющая разгрузку стружечных канавок. Анализируя указанные переходы, следует иметь в виду, что возможны различные соотношения между диаметрами хвостовика и режущей части. Диаметр режущей части может быть как равен диаметру хвостовика, так и быть меньше его или больше. От данного соотношения зависит объем материала, удаляемого с фрагментов фрезы при предварительной обработке. Также указанное соотношение определяет величину радиуса сопряжения между двумя поверхностями.

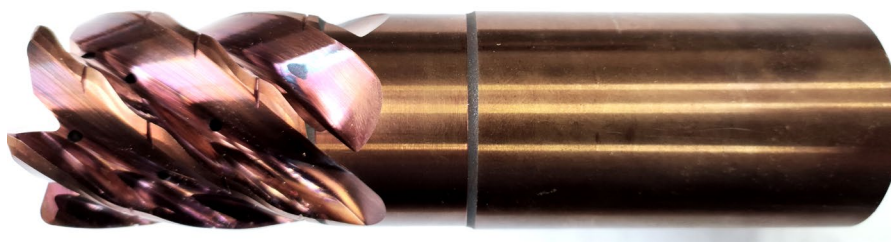


Рисунок 2. Концевая фреза из быстрорежущей стали

Все вышеперечисленные технологические переходы могут быть выполнены с применением точения фрезерованием. Дополнительный эффект точение-фрезерованием даёт, если инструмент имеет хвостовик типа Weldon, который представляет собой цилиндр с опорными площадками для надежной фиксации инструмента винтами. Так как опорные площадки обрабатываются фрезами, то появляется возможность их обработки и обработки цилиндрической части хвостовика одним инструментом, что повышает производительность процесса и сокращает количество применяемых инструментов. Также повышается точность обработки за счет отсутствия погрешности, возникающей при смене инструмента.

Выбор инструмента для реализации точения-фрезерованием зависит от геометрических параметров обрабатываемых фрагментов, обрабатываемого материала и применяемого станка. Как правило, используются либо монолитные твердосплавные фрезы, либо фрезы со сменными многогранными пластинами. Каждый тип инструмента имеет свои преимущества и недостатки. Однако выбор инструмента значительно шире, чем при классическом точении.

В качестве заготовки для изготовления фрез применяется прутки быстрорежущей стали стандартного диаметра, выбираемого таким образом, чтобы минимизировать объем материала, удаляемого в стружку.

Требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей при выполнении рассматриваемых операций приведены в таблице 1.

Как говорилось ранее, предварительная обработка режущей части формирует цилиндрическую поверхность заданного диаметра, которая затем обрабатывается фрезой со сферическим концом с целью сформировать стружечные канавки. Окончательно режущую

часть с заданными геометрическими параметрами получают на шлифовально-заточном станке с ЧПУ после термообработки. Указанные операции в данной работе не рассматриваются.

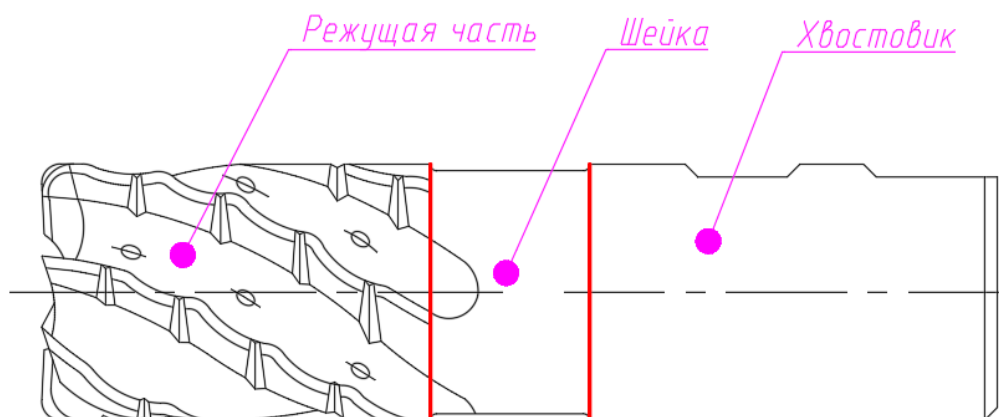


Рисунок 3. Концевая фреза из порошковой быстрорежущей стали

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения

Технологический переход	Параметры качества поверхности	
	точность, мм (IT)	шероховатость Ra, мкм
предварительная обработка хвостовика	$\pm 0,05$	3,2
окончательная обработка хвостовика	h6	0,4
предварительная обработка шейки	$\pm 0,05$	3,2
окончательная обработка шейки	h12	1,6
предварительная обработка режущей части	$\pm 0,05$	3,2
окончательная обработка режущей части	h10	0,4

Согласно опубликованным результатам исследований метода точения-фрезерованием, достигается шероховатость поверхности $Ra=1,6$ мкм без потери производительности [11]. При этом увеличение производительности обработки по сравнению с классическим продольным точением может достигать от 2 до 5 раз.

Наряду с преимуществами рассматриваемый метод имеет и недостатки. Например, токарно-фрезерная операция не дает идеального круга. Поскольку в токарном фрезеровании инструмент и обрабатываемая деталь вращаются одновременно, результирующее поперечное сечение обрабатываемой детали представляет собой многоугольник (рис. 4). Величина данной погрешности формы определяется геометрическими параметрами инструмента и режимами резания [12]. Снижение погрешности формы за счет снижения режимов резания может сократить эффект от применения точения-фрезерованием. Следовательно, необходима

предварительная оценка отклонения размера и отклонения от круглости, заданных конструкторской документацией.

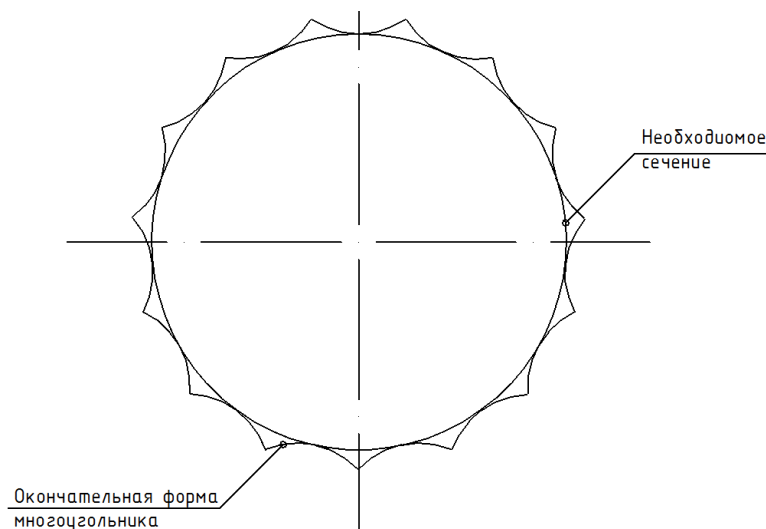


Рисунок 4. Поперечное сечение заготовки, получаемой при точении-фрезерованием

Исходя из технологических требований, приведенных в таблице 1, можно определить технологические операции обработки осевых инструментов из быстрорежущей стали, где точение-фрезерованием наиболее эффективно. К ним относятся предварительная обработка хвостовика, шейки, режущей части и окончательная обработка шейки.

В результате проведенного анализа показано влияние заданных параметров качества обработки фрагментов осевых режущих инструментов на эффективность применения прогрессивного метода точения-фрезерованием. Определены операции, где точение фрезерованием дает наибольший эффект. Возможно повышение производительности обработки от двух до пяти раз при достижении заданного качества поверхности. Полученные результаты могут быть использованы в инструментальной промышленности при разработке технологических процессов изготовления осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали.

Рекомендуется продолжение исследований в направлении анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки при использовании, как классического продольного точения, так и точения фрезерованием [13, 14]. Также наряду с отклонением диаметральных размеров и отклонением от круглости следует принимать во внимание и другие отклонения формы и взаимного расположения поверхностей, заданные конструкторской документацией.

Список литературы

1. Богданов К.В., Никулин Д.С., Савилов А.В., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Производство высокопроизводительного режущего инструмента в условиях ИАЗ // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 91-95.

2. Савилов А.В., Никулин Д.С., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковой быстрорежущей сталей и твердых сплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 6. С. 26–33.
3. Schulz H, Lehmann T. Krafte und Antriebsleistungen beim Ortagonalen Drehfrasen (Forces and Drive Powers in Orthogonal Turn-Milling). 1990, Werkstatt und Betrieb, 123, p. 921-924.
4. Savas V., Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 186. Issue 1-3. P. 279–283. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040>.
5. An overview of turn-milling technology / Zhu L., Jiang Z., Shi J., Jin C. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81(1–4). – P. 493–505.
6. Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Зарак Т.В. Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. № 6 (24). С. 1190-1198.
7. Uncut chip geometry determination for cutting forces prediction in orthogonal turn-milling operations considering the tool profile and eccentricity / Harry Otalora-Ortega, Patxi Aristimuño Osoro, Pedro Arrazola Arriola // International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – Vol. 198. – Art. 106351. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106351>.
8. Study on the relationship between material removal rate and tool flank temperature in orthogonal turn-milling / Koji SHIMANUKI, Akira HOSOKAWA, Tomohiro KOYANO [et al.] // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2021. –Vol. 15(4). <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2021jamdsm0043>.
9. Cutting Forces during Inconel 718 Orthogonal Turn-Milling / A. Felusiak-Czyryca, M. Madajewski, P. Twardowski [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P.6152. <https://doi.org/10.3390/ma14206152>.
10. Матлыгин Г.В. Технологическое обеспечение качества изготовления концевых фрез из быстрорежущей стали на многооперационном станке // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник статей Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации). Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутский национальный исследовательский технический университет; 2021. С. 153-157.
11. Zhu Lida, Li Haonan, Wang Wansan. Research on rotary surface topography by or-thogonal turn-milling // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 69. P. 2279–2292. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5202-8>
12. А. Пятых. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 67-81.
13. Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A. Heat generation and temperature pre-diction in metal cutting: A review and implications for high speed machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. Vol. 46. Issue 7-8. P. 782–800. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024>
14. Stephenson D.A., Ali A. Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1992. Vol. 114. Issue 2. P. 127–136. <https://doi.org/10.1115/1.2899765>.

УДК 621.914

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ: АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ

*В.В. Дмитриева¹,
И.А. Андреев¹,
П.Е. Сизин²*

¹Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия

²НИТУ МИСИС, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье обосновывается необходимость моделирования основного элемента оборудования технологических процессов - двигателя. Выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АКЗ), поскольку он является наиболее распространенным в современной горной и нефтедобывающей промышленности. Приведен принцип выбора двигателя для главного насоса нефтеперекачивающей станции. Приведены две методики расчета схемы замещения по паспортным данным. Выбрана наиболее адекватная методика, критерием выбора авторы приняли меру близости модельных характеристик к реальным, полученным экспериментально. Приведены также два способа моделирования асинхронного двигателя - с использованием блоков специализированной библиотеки *SimPowerSystem* пакета *Matlab*, и при помощи структурной схемы, построенной по внутренней модели двигателя. Для каждого способа моделирования приведены его достоинства и недостатки. В качестве выводов авторами предложены рекомендации по использованию методик расчета и способов моделирования в зависимости от задач, которые необходимо решать.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, схема замещения, паспортные данные двигателя, методика расчета схемы замещения, схема моделирования, способ моделирования, оценка адекватности методики расчета, механическая характеристика двигателя.

ANALYSIS AND COMPARISON OF VARIOUS METHODS OF CALCULATION AND MODELING OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR FOR PRECISION METAL-CUTTING MACHINES

*V.V. Dmitrieva¹,
I.A. Andreev¹,
P.E. Sizin²*

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NIU), Moscow, Russia

²NUST MISIS, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article substantiates the necessity of modeling the main element of the equipment of technological processes - the engine. An asynchronous motor with a short-circuited rotor is chosen as an example, since it is the most common in the modern mining and oil industry. The principle of choosing an engine for the main pump of an oil pumping station is given. Two methods of calculating the replacement scheme based on passport data are given. The most adequate method was chosen, the authors took the measure of the proximity of the model characteristics to the real ones obtained experimentally as the criterion of choice. There are also two ways of modeling an asynchronous motor - using blocks of the specialized library *SimPowerSystem* application software package *Matlab*, and using a block diagram built on the internal model of the engine. For each modeling method, its advantages and disadvantages are given. As conclusions, the authors offer recommendations on the use of calculation methods and modeling methods, depending on the tasks that need to be solved.

Keywords: Asynchronous motor with a short-circuited rotor, replacement circuit, engine passport data, method of calculating the replacement circuit, simulation scheme, modeling method, assessment of the adequacy of the calculation method, mechanical characteristics of the engine.

Наибольшее распространение в современной горной и нефтяной промышленности получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (далее - АКЗ). Их главным преимуществом перед остальными является дешевизна и простота конструкции, что сильно упрощает реализацию. Однако то, что является достоинством, является и недостатком. Из-за особенности выполнения короткозамкнутого ротора такой двигатель имеет специфичный пусковой режим: отсутствие обмотки ротора означает отсутствие наводимой в момент включения обмоток статора противо-ЭДС индукции и возникновение высоких пусковых токов. Это является причиной трудностей при использовании асинхронных двигателей в технологических процессах с инерционными приводимыми механизмами. Предварительное исследование различных режимов его работы, таких как пуск, торможение, самозапуск, наброс нагрузки и т.д. поможет правильно оценить возможность использования АКЗ, но решение такого рода задач требует большого объема экспериментальных исследований на работающих установках для настройки регуляторов, подбора параметров и коэффициентов, получения статистической информации. Часто такие исследования проводить невозможно в силу ряда факторов – отсутствия оборудования для экспериментов, невозможности прервать действующий технологический процесс, риска вывода оборудования из строя. Поэтому целесообразно использовать математическое и компьютерное моделирование [1-3].

В качестве приводимого механизма выберем главный насос нефтеперекачивающей станции (НПС) магистрального трубопровода [4]. В качестве главных насосов на НПС используются насосы серии НМ. Для анализа выберем насос НМ-7000-210, паспортные данные которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Паспортные данные насоса НМ 7000-210

Типоразмер насоса	Подача, м ³ /ч	Напор, м	КПД, %
НМ 7000-210	7000	210	89

Для выбора электродвигателя, нужно определить мощность насоса по формуле:

$$P_{\text{нас}} = \frac{Q \cdot H \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

где Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напор, м ; $\eta_{\text{нас}}$ – КПД насоса; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность перекачиваемой жидкости; $g = 9.81 \text{ кз} / \text{м}^2$ – ускорение свободного падения.

Для рассчитываемого оборудования и для перекачиваемой отечественной нефти *Urals*, плотность которой варьируется от 887 до 898 $\text{кг}/\text{м}^3$ мощность насоса $P_{\text{нас}} = 4042 \text{ кВт}$. Поскольку двигатель должен обладать запасом мощности $P_{\text{дв}} > P_{\text{нас}}$, то выбираем двигатель АЗМВ-5000/6000У4, паспортные данные которого приведены в таблице 2.

Таблица 2. Паспортные данные двигателя 4АЗМВ-5000/6000У4

Мощность, $P_{\text{ном}}$, кВт	5000
Напряжение, $U_{\text{ном}}$, В	6000
Скорость вращения, $n_{\text{ном}}$, об/мин	2982
Скольжение, $s_{\text{ном}}$ %	0.6
КПД, $\eta_{\text{ном}}$ %	97.5
Коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$	0.9
Кратность максимального момента $k_{\text{max}} = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$	2.2
Кратность пускового момента $k_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$	0.9
Кратность минимального момента	0.7
Кратность пускового тока $k_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$	5.7
Момент инерции J , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	56

Справочных данных по асинхронным двигателям, как правило, достаточно для выбора двигателя под конкретные нужды заказчика, но недостаточно для построения моделей. Поэтому первой задачей моделирования является определение параметров схемы замещения двигателя.

Схема замещения АД [5, 6] – это электрическая цепь, которая определяется той же системой уравнения, что и обмотки электродвигателя. Удобство использование схемы замещения заключается в том, что элементы первичной и вторичной обмотки соединены в одну электрическую цепь. Обязательным условием описание АД схемой замещения является приведение обмотки ротора к обмотке статора. Асинхронный двигатель можно представить в виде Т-образной и Г-образной схемы замещения. Преимущество Г-образной схемы замещения заключается в том, что зависимость ЭДС и токов статора и ротора от нагрузки и скольжения двигателя устраняются, а ветвь намагничивания переносится на входные зажимы, и ток в ней не будет зависеть от нагрузки двигателя.

Существуют две методики расчета параметров схемы замещения.

Методика №1

Проведем расчет схемы замещения по первой методике, предлагаемой в [7].

По известным формулам найдем критическое и номинальное скольжение АД, угловую скорость переведем их оборотов в радианы, и рассчитаем номинальный момент двигателя. Критический и пусковой момент АД можно найти, используя соотношения, приведенные в таблице 2.

Активное приведенное сопротивление ротора АД и активное сопротивление статора найдем по формулам:

$$R'_r = \frac{P_{ном} + \frac{P_{мех}}{s_{ном}}}{3 I_{ном}^2}, R_s = \frac{U_{лн ном} \cos \varphi_{ном} (1 - \eta)}{\sqrt{3} I_{ном}} - C^2 \cdot R'_r - \frac{P_{ном}}{3 I_{ном}^2}, \quad (1)$$

где значение механических потерь $P_{мех}$ возьмем согласно выражению $P_{мех} = 0.01 \div 0.05 P_{ном}$, где наименьшее значение соответствует машинам большей мощности, C – коэффициент приведения, берущийся из диапазона от 1.02 до 1.05 для предварительного расчета параметров схемы замещения.

Приведенную индуктивность рассеяния ротора АД и статора:

$$L'_{lr} = \frac{\frac{U_{лн ном}}{\sqrt{3}}}{4 \pi f (1 + C^2) k_{i \text{пуск}} I_{ном}}, \quad L_{ls} \approx L'_{lr}. \quad (2)$$

Индуктивность первой ветви схемы замещения:

$$L_1 = \frac{\frac{U_{лн ном}}{\sqrt{3}}}{2 \pi f I_{ном} \sqrt{\frac{1 - s_{ном}}{s_{ном}}}}. \quad (3)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_m = L_1 - L_{ls}. \quad (4)$$

Коэффициент приведения:

$$C = 1 + \frac{L_{ls}}{L_m}. \quad (5)$$

Если расчётное значение C отличается от выбранного из диапазона от 1.02 до 1.05 ранее более чем на заданную точность ε , то нужно провести расчет заново с данным значением C . Как правило за 2-3 итерации значения совпадают с высокой точностью.

Коэффициент вязкого трения:

$$B_m = \frac{P_{мех}}{\left(\frac{2 \pi n_{ном}}{60} \right)^2}. \quad (6)$$

Расчёт схемы замещения двигателя 4А3МВ-5000/6000У4 и параметров по методу №1 выполнен в ППП Matlab, полученные результаты сведены в таблицу 3, первый столбец.

Методика №2

Теперь используем вторую методику [8]. Порядок расчета параметров двигателя, нужных для его моделирования в пакете *SimPowerSystem* следующий:

Находим номинальное и критическое скольжение.

Принимаем конструктивный коэффициент $C_1=1.02-1.05$ для предварительного расчета параметров схемы замещения.

Находим коэффициент вязкого трения $Bm = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{(2\pi n_n / 60)^2}$, где $\Delta P_{\text{мех}}$ - механические потери.

Находим величину механических потерь. Если предположить, что полные потери состоят из постоянных и переменных потерь, и постоянные примерно равны 1/3 полных потерь, а механические потери составляют половину постоянных потерь, то механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ определяются из уравнения:

$$\Delta P_{\text{мех}} = P_n \left(\frac{1}{\eta_n - 1} \right) \frac{1}{6}, \quad (6)$$

Сумму потерь можно определить как

$$P_n + \Delta P_{\text{мех}} = P_n \left(1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{1}{6} \right). \quad (7)$$

Теперь рассчитаем параметры схемы замещения:

$$1. \text{ Сопротивление статора } R_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_n^2 (1 - s_{\text{ном}})}{C_1 \left(1 + \frac{C_1}{s_k} \right) m_k (P_n + \Delta P_{\text{мех}})}. \quad (8)$$

$$2. \text{ Сопротивление ротора } R_R = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_n + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot m_k}{(1 - s_{\text{ном}}) \cdot k_i^2 \cdot I_n}. \quad (9)$$

3. Индуктивность статора и ротора:

$$L_S = L_R = \frac{1}{2\pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_n / \sqrt{3}}{I_n \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_n)^2} - \cos \varphi_n \cdot \frac{S_n}{S_k} \right)}. \quad (10)$$

4. Индуктивность рассеяния статора и ротора:

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{1}{4\pi \cdot f_n} \sqrt{\left[\frac{U_n / \sqrt{3}}{i_k \cdot I_n} \right]^2 - (R_S + R_R)^2}. \quad (11)$$

Взаимная индукция: $L_m = L_S - L_{ls}$.

Сведем полученные результаты в таблицу 3., столбец 2.

Мы видим, что параметры, полученные по двум методикам, существенно отличаются.

Пакет MATLAB позволяет выполнять моделирование множеством методов. Для моделирования АКЗ мы будем рассматривать рассмотрим два способа: с помощью встроенной библиотеки *SimPowerSystems* и с помощью функциональных блоков, решающих дифференциальные уравнения, описывающие асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Построим модель АД в программе MATLAB *Simulink*, используя специальные блоки программы *SimPowerSystems*, такие как трехфазный источник питания *Three-Phase Programmable Voltage Source* и асинхронную электрическую машину *Asynchronous Machine*. [9, 10, 11]. Схема моделирования приведена на рис. 1.

Далее введем в блок параметры АКЗ, рассчитанные по двум методикам, приведенным выше. Первый опыт проведем для АКЗ, рассчитанного по первой методике.

При моделировании можно получить графики тока статора, момента на валу, скорости вращения ротора и механической характеристики. Все эти графики использовались авторами для анализа модели, но из-за ограниченного объема статьи приведем только механическую характеристику (рис.2а). Аналогично проведем моделирование для асинхронного двигателя, параметры которого рассчитаны по методике №2. Очевидно, что схема моделирования остается прежней (рис.1), окна ввода параметров - тоже. Результаты моделирования представлены на рис. 2б.

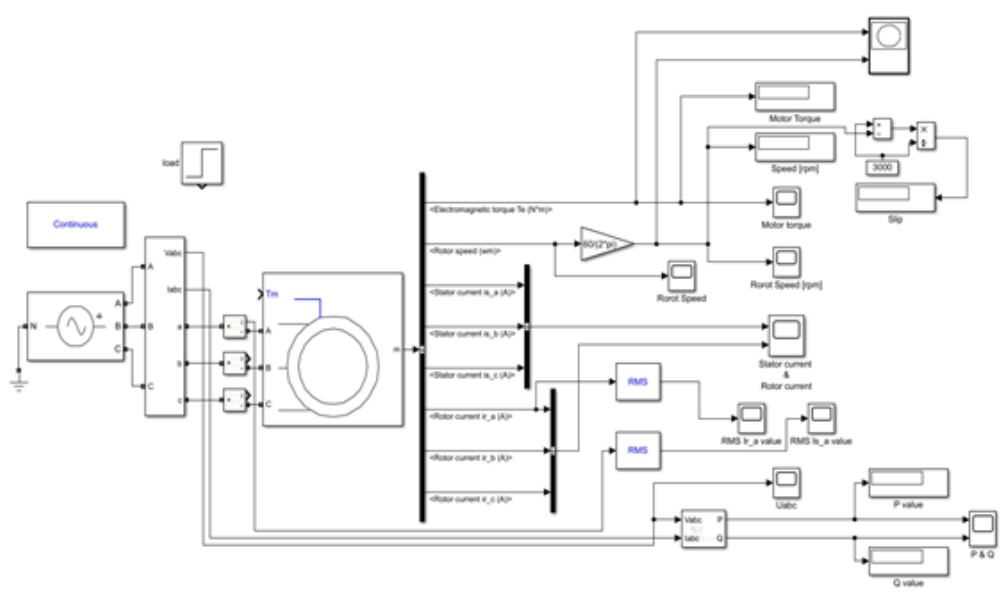


Рисунок 1. Моделирование АКЗ в Simulink с помощью библиотеки SimPowerSystems

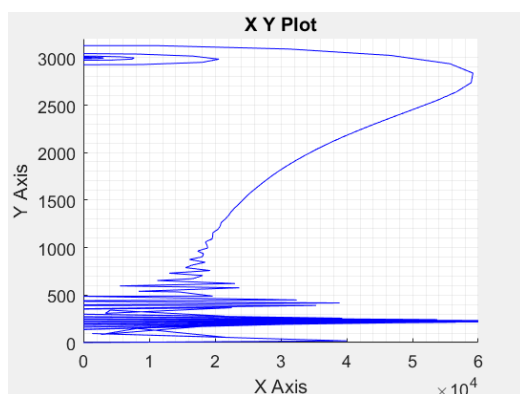


Рисунок 2.а. Механическая характеристика, построенная для модели №1

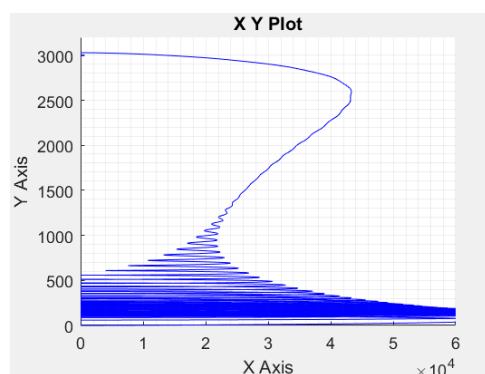


Рисунок 2.б. Механическая характеристики модели №2

Предварительное сравнение результатов моделирования показывает существенное различие полученных переходных процессов. Несмотря на сходство формы переходных процессов, время регулирования и колебательность отличаются почти в 2 раза.

Таблица 3. Параметры двигателя 4АЗМВ-5000/6000У4, полученные по методу №1 и методу 2

Параметры, рассчитанные по паспортным данным		
	Метод №1	Метод №2
$S_{ном}$	5555.6 кВА	5555.6 кВА
$n_{ном}$	2982 об / мин	2982 об / мин
$S_{кр}$	0.025 о.е.	0.025 о.е.
$\omega_{ном}$	312.27 с^{-1}	312.27 с^{-1}
$I_{ном}$	316.6 А	316.6 А
$I_{пуск}$	1804.4 А	1804.4 А
$M_{ном}$	16012 Н·м	16012 Н·м
$M_{кр}$	35225 Н·м	35225 Н·м
$M_{пуск}$	14410 Н·м	14410 Н·м
Параметры, рассчитанные по методике		
R'_r	0.1014 Ом	0.4655 Ом
R_s	0.1549 Ом	0.1140 Ом
$P_{мех}$	50 кВт	21.368 кВт
L'_{lr}	0.0026 Гн	0.0052 Гн
L_{ls}	0.0026 Гн	0.0052 Гн
L_1	0.1394 Гн	0.2748 Гн
L_m	0.1368 Гн	0.2191
B_m	0.5127	0.2191

Обобщенный асинхронный двигатель с трехфазной обмоткой на статоре и трехфазной обмоткой можно описать согласно методу, приведенному в работах [5, 6, 12], используя законы Ленца, Кирхгофа, равновесия ЭДС. После математических преобразований, таких как применение метода пространственного вектора, использования вращающейся системы координат, нормирование параметров и сигналов, система уравнений для АД КЗ в операторном виде [12] будет выглядеть как формула 12.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{Sa} = r(1+T's)i_{Sa} - \frac{k_R}{T_R}\psi_{Ra} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ u_{S\beta} = r(1+T's)i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R}\psi_{R\beta} - k_R p \omega_m \psi_{Ra}; \\ 0 = -k_R R_R i_{Sa} + \frac{1}{T_R}(1+T_R s)\psi_{Ra} + p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ 0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R}(1+T_R s)\psi_{R\beta} + p \omega_m \psi_{Ra}; \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{Ra} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{Sa}); \\ Js \omega_m = M - M_c. \end{array} \right. \quad (12)$$

где параметры модели находятся по формулам:

$$T'_S = \frac{L'_S}{r}, \quad r = (R_S + k_R^2 R_R), \quad L'_S = \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right), \quad k_R = \frac{L_m}{L_R}, \quad T_R = \frac{L_R}{R_R}. \quad (13)$$

Построим модель по (12), схема модели приведена на рис. 4.

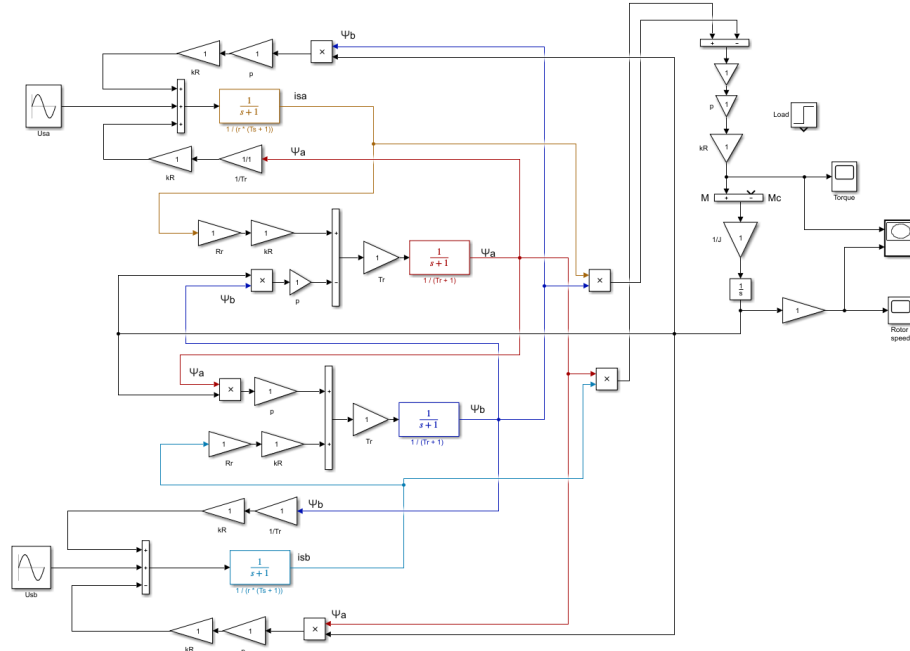


Рисунок 4. Модель АКЗ в Simulink, построенная на функциональных блоках

Рассчитаем параметры для решения дифференциальных уравнений АД КЗ в операторном виде с помощью (12)-(13) для обеих методик, коэффициенты внесем в схему моделирования (рис.4) и представим в таблице 4. Напомним, что из-за применения нормированных величин, коэффициенты мы получаем безразмерные.

Таблица 4. Коэффициенты модели (17), полученные по методике №1 и методике №2

T'_S	0.0204	0.0184
r	0.2525	0.5623
L'_S	0.0051	0.0103
k_R	0.9814	0.9814
T_R	1.3744	0.6016
R'_r	0.1014	0.4655
J	56	56

Снимем показания с данной модели. Графики момента и скорости более гладкие, за счет этого и механическая характеристика двигателя (рис.4) более близка к реальной. Она не содержит таких "рывков" в пусковой момент, какие можно видеть на рис.2.

Выводы. Сравнение методик расчета параметров и способов моделирования

Сравнивая результаты моделирования АД КЗ двумя способами, сделаем вывод о том, что результаты модели, построенной по математическому описанию и модели, выполненной из готовых блоков библиотеки *SimPowerSystems* практически идентичные. Метод моделирования с помощью функциональных блоков позволяет провести более детализированное моделирование, в дальнейшем синтезировать систему управления для АКЗ. Область применения таких моделей - это системы управляемых приводов или сложных технологических процессов, где двигатель является исполнительным механизмом. Недостатком же этого способа моделирования является невозможность получения необходимых показаний, т.к. в системе дифференциальных уравнений нет, например, токов и напряжений фаз. Еще один существенный недостаток - невозможность задания несимметричных режимов и подключения к какой-либо внешней сети без существенных изменений в модели. Таким образом, использовать эту модель для исследования режимов работы систем электроснабжения затруднительно. Кроме того, эта модель более сложна и требует больше предварительных вычислений.

Теперь выполним сравнение двух методик расчета параметров модели АКЗ. Сравним полученные результаты с паспортными данными двигателя и выберем ту, у которой менее выраженные отклонения от паспортных параметров.

Оценочное значение пускового момента модели будем находить с помощью метода подбора: подавать на двигатель максимально возможный момент сопротивления в момент времени $t = 0$ с, при котором возможен его разгон. Значению пускового тока модели дадим оценку по графику среднеквадратичного тока от времени. Критический момент модели найдем по снятой механической характеристике. Результаты занесем в таблицу 5. Построим механические характеристики на одном графике и сравним их. На рис. 5 под цифрой 1 - механическая характеристика, полученная по методике №1; под цифрой 2 - механическая характеристика, полученная по методике №2; под цифрой 3 - эталонная механическая характеристика, соответствующая паспортным данным.

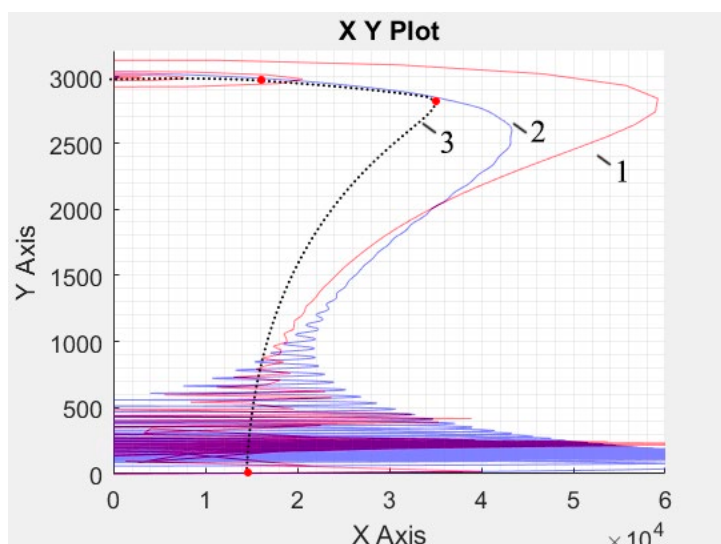


Рисунок 4. Сравнение механических характеристик моделей, построенным с использованием различных методик

Таблица 5. Сравнение методик расчета параметров моделей

	Паспортные данные	Модель №1	Модель №2
$I_{пуск}$	1804.4 А	3700 А	1800 А
$n_{ном}$	2982 об / мин	2985 об / мин	2930 об / мин
$M_{кр}$	35225 Н м	59000 Н м	43500 Н м
$M_{пуск}$	14410 Н м	12425 Н м	14175 Н м

Проведя анализ данных и графиков механических характеристик, приведенных на рис.13, можно сделать вывод, что для дальнейшего моделирования лучше использовать методику №2, так как ее механическая характеристика и значение пускового тока существенно ближе к паспортным данным, чем эти показатели у методики №1. Важно еще отметить, что у методики №2 жесткость механической характеристики ниже, чем у оценочной механической характеристики по паспортным данным (рис.5, кривая 3).

Список литературы

1. Xiayi Hao, Genghuang Yang, Xin Su, Xiaotian Xu Simulation and Research on the Rotor Flux Linkage Model of Asynchronous Motor. Conference report, Conference: International Conference on Intelligent and Interactive Systems and Applications – 2018, DOI:10.1007/978-3-319-69096-4_121
2. Dorjsuren Yandasuren, Tumenbayar Lkhagvatseren, Tsevegmid Jamyankhorlo Dynamic modeling of three phase asynchronous motor, November 2019, Conference report, Conference: Recent research in electrical and computer engineering, Salerno, Italy, Project: Electrical drive and machines
3. Vasilija Sarac. Comparative Analysis of Line-start Synchronous Motor and Asynchronous Motor, Article, – 2021, February, DOI:10.46904/eea.21.69.1.1108002
4. Белоусенко И.В., Ершов М.С., Шварц Г.Р., Великий С.Н., Яризов А.Д. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности. – М.: Недра, 2007. – 478 с.
5. Беспалов В. Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. Учебное пособие. – М.: Академия, 2006. – 315с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
7. Забоин В.Н., Суханов В.В. Расчет параметров схем замещения, рабочих и механических характеристик асинхронных двигателей с фазным ротором: Учеб. пособие. – СПб.: Нестор, 2005. – 39с.
8. Пантель О.В. «Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в Matlab/Simulink» – Academy. 2015. – № 2 (2), с. 7–11.
9. Терехин, В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. – М.: Юрайт, 2018. – 306 с.
10. V.V. Dmitrieva, P.E. Sizin and A.A. Sobyenin "Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor" Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 942, XXI Conference of PhD Students and Young Scientists (CPSYS 2021) 23rd-25th June 2021 (virtual), Wroclaw, Poland 12 pages

11. Дмитриева В. В., Собянин А. А., Сизин П. Е. Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6, с. 77–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.

12. Греман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink, Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб, Корона. Век, 2011. – 368 с.

УДК 621.3.078

АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОДАЧИ ВОДЫ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

***В.В. Дмитриева¹,
Д.В. Дзюин¹***

¹ *Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

В данной работе разработана система управления многодвигательной электромеханической системой технологической установки подачи воды теплоэлектростанции с частотно-регулируемым приводом центробежных насосов в целях минимизации потерь воды и электроэнергии. В среде Simulink программы MATLAB синтезирована компьютерная модель схемы с многоинверторным преобразователем частоты, промоделирован процесс автоматического регулирования расхода воды, обеспечены синусоидальная форма напряжения и единичный коэффициент мощности сети электроснабжения.

Ключевые слова: теплоэлектростанция, многодвигательная электромеханическая система, частотно-регулируемый электропривод, центробежный насос, технологическая установка подачи воды, система автоматического управления, MATLAB/Simulink.

ANALYSIS, MODELING AND SYNTHESIS OF CONTROL OF A MULTI-ENGINE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF A TECHNOLOGICAL WATER SUPPLY UNIT FOR A THERMAL POWER PLANT

***V.V. Dmitrieva¹,
D.V. Dzyuin¹***

¹ *National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia*

ABSTRACT

In this paper, a control system for a multi-engine electromechanical system of a technological water supply unit for a thermal power plant with frequency-controlled centrifugal pump drives is developed in order to minimize the loss of water and electricity. In MATLAB/Simulink a computer model of the multi-inverter frequency converter circuit has been synthesized, the process of automatic regulation of water flow has been simulated, a sinusoidal voltage waveform and unity power factor of the power supply network have been provided.

Keywords: thermal power plant, multi-engine electromechanical system, frequency-controlled electric drive, centrifugal pump, technological water supply unit, automatic control system, MATLAB/Simulink.

На тепловой электростанции (ТЭЦ) для обеспечения конечных потребителей теплоносителем в требуемом объеме группа сетевых насосов поддерживает требуемый расход воды и давление в тепловой сети и сети горячего водоснабжения. В случае изменения состава работающих агрегатов, из-за недостаточного быстродействия регуляторов, взаимного влияния их друг на друга не удается достичь достаточной точности и надежности поддержания гидравлических параметров. Соответственно, в каждый момент времени возникает проблема включения и поддержания работы нужного числа сетевых насосов с определенной подачей, чтобы качественно и эффективно обеспечить теплоносителем потребителей. Для решения этой проблемы возможно применение автоматизированного регулируемого многодвигательного электропривода насосных установок [1].

Цель данной работы – разработать систему автоматического управления (САУ) многодвигательной электромеханической системой (МЭС) технологической установки подачи воды на ТЭЦ, чтобы минимизировать потери воды и электроэнергии в технологическом процессе тепло- и горячего водоснабжения потребителей. Задачи работы включают анализ процесса регулирования подачи насосов; синтез САУ частотно-регулируемым электроприводом, САУ активным выпрямителем напряжения и САУ расхода воды; моделирование МЭС в среде Simulink программы MATLAB, оценку качества её работы.

При постоянной частоте вращения рабочего колеса центробежного насоса регулирование подачи изменением поперечного сечения трубопровода (дросселированием) приводит к избыточному напору, гидравлическим ударам, разрывам труб и т.д. В современных насосных установках наибольшее распространение получил частотно-регулируемый привод (ЧРП), обеспечивающий плавное изменение подачи и напора насоса путём изменения частоты вращения рабочего колеса, при этом электроэнергия используется рационально и отсутствует избыточное потребление воды [2, 3].

Схема МЭС с одним групповым преобразователем частоты (ПЧ) способна обеспечить только одновременное и одинаковое управление всеми параллельно работающими агрегатами. В этом случае предпочтительным является вариант создания многодвигательной системы ЧРП с количеством ПЧ равным количеству нагнетателей, что увеличивает первоначальные затраты на 30% по сравнению с групповым регулированием [1, 3, 4].

Индивидуальное управление каждым асинхронным двигателем можно обеспечить применением многоинверторного ПЧ. За счет использования активного выпрямителя появляется возможность питания нескольких автономных инверторов от одного выпрямительного устройства. Каждый инвертор имеет автономную систему управления,

задающую формирование на обмотках статора соответствующего приводного двигателя напряжения требуемой амплитуды и частоты, обеспечивая индивидуальное регулирование электромеханических координат каждого двигателя МЭС. Все инверторы подключены к общему активному выпрямителю напряжения (АВН), система управления которым обуславливает поддержание стабильного напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ) и требуемый коэффициент мощности сети электроснабжения, даже в случаях колебания напряжения питания [4].

Для технологической САУ МЭС входным управляющим воздействием выступает задание на расход воды $Q_{зад}$, который ТЭЦ поддерживает на входе потребителя. Технологическая САУ в соответствии с заданием на расход формирует индивидуальное задание на частоту вращения каждого приводного электродвигателя насоса [4].

В технологической установке подачи воды ТЭЦ используются три центробежных насоса К-100-65-250 и три асинхронных двигателя АИР200L2 [4].

В среде Simulink синтезирована компьютерная модель многодвигательной электромеханической системы технологической установки подачи воды (рисунок 1). Силовая часть включает источник напряжения 0,4 кВ, активный выпрямитель и три автономных инвертора на IGBT, звено постоянного тока с С-фильтром, три асинхронных двигателя с насосами. Система управления состоит из системы автоматического управления расходом воды (САУР), трёх систем управления электроприводами (СУЭП) и замкнутой системы управления АВН с обратной связью по напряжению звена постоянного тока.

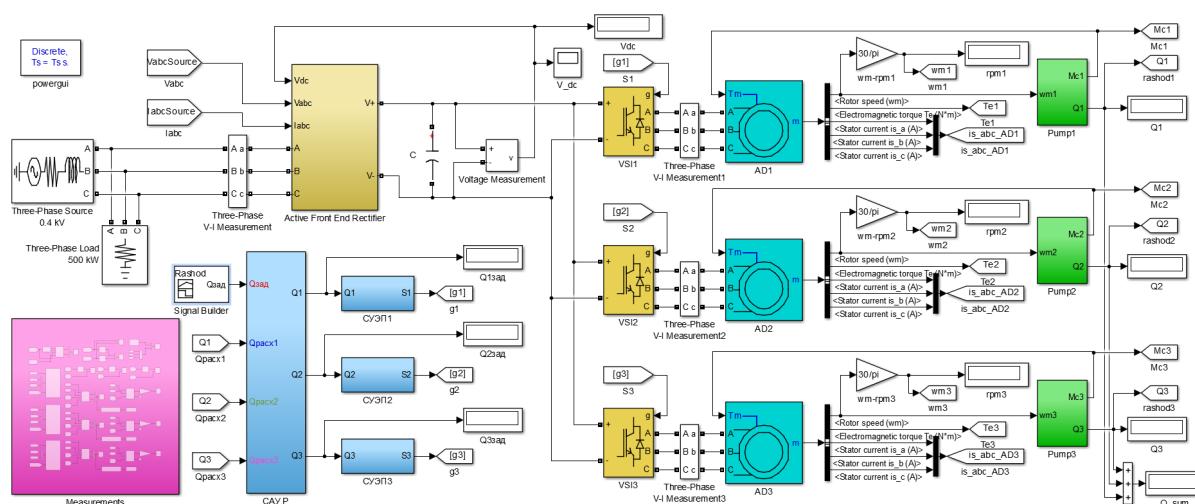


Рисунок 1. Компьютерная модель многодвигательной электромеханической системы технологической установки подачи воды в Simulink

Математическая модель центробежного насоса и трубопроводной системы строится по основным уравнениям из [2]. Вычисляемое значение момента сопротивления подаётся на вход механической части модели асинхронного двигателя (обратная связь по моменту). В системе требуется высокая точность регулирования по расходу, а не по скорости, поэтому применяется скалярное управление ЧРП по квадратичному закону регулирования при вентиляторной нагрузке [3]. Напряжение на обмотках статора формируется по алгоритму широтно-

импульсной модуляции (ШИМ) с использованием метода пространственно-векторной модуляции (Space Vector Pulse Width Modulation) [5, 6].

В Simulink синтезирована двухконтурная система подчиненного регулирования активного выпрямителя напряжения с ПИ-регуляторами. С помощью преобразования координат АВН управляется раздельно по проекциям I_d и I_q обобщенного вектора сетевого тока во внутреннем контуре тока. Положительным значениям I_d соответствует режим потребления энергии из сети, отрицательным – режим рекуперации. Для потребления из сети чисто активной мощности задаётся значение $I_q = 0$. Внешний контур стабилизирует напряжение конденсатора звена постоянного тока [7, 8].

Система автоматического регулирования расхода воды представляет собой программируемый микроконтроллер, получающий сигналы с датчиков-расходомеров. Задание на частоту вращения каждого двигателя представлено алгоритмом с несколькими условиями, зависящими от требуемой величины расхода:

1) Если $0 < Q_{\text{зад}} \leq 130$, то первый электродвигатель АД1 включается на переменную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}$, изменяющуюся в пределах $0,5 \cdot \omega_{\text{ном}} \leq \omega_{1\text{зад}} \leq 1,3 \cdot \omega_{\text{ном}}$; второй и третий двигатели АД2 и АД3 будут остановлены, т. е. $\omega_{2\text{зад}} = \omega_{3\text{зад}} = 0$.

2) Если $130 < Q_{\text{зад}} \leq 180$, то первый и второй электродвигатели АД1 и АД2 включаются на переменную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{2\text{зад}}$, изменяющуюся в пределах $0,8 \cdot \omega_{\text{ном}} \leq \omega_{1\text{зад}} \leq 0,9 \cdot \omega_{\text{ном}}$, при которой каждый из двух насосов выдаёт одинаковый расход воды $Q_1 = Q_2 = Q_{\text{зад}}/2$; третий двигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3\text{зад}} = 0$.

3) Если $180 < Q_{\text{зад}} \leq 230$, то АД1 включается на номинальную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$, обеспечивая номинальный расход воды $Q_{\text{ном}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$; второй двигатель АД2 включается на переменную частоту вращения $0,8 \cdot \omega_{\text{ном}} \leq \omega_{2\text{зад}} \leq 1,3 \cdot \omega_{\text{ном}}$ для обеспечения расхода воды $Q_{2\text{зад}} = Q_{\text{зад}} - Q_{\text{ном}}$; третий двигатель АД3 будет остановлен, т. е. $\omega_{3\text{зад}} = 0$.

4) Если $230 < Q_{\text{зад}} \leq 280$, то АД1 включается на номинальную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$, обеспечивая номинальный расход воды; второй и третий двигатели АД2 и АД3 включаются на переменную частоту вращения $\omega_{2\text{зад}} = \omega_{3\text{зад}}$, изменяющуюся в пределах $0,8 \cdot \omega_{\text{ном}} \leq \omega_{2\text{зад}} \leq 0,9 \cdot \omega_{\text{ном}}$, при которой два насоса выдают одинаковый расход воды $Q_2 = Q_3 = (Q_{\text{зад}} - 100)/2$.

5) Если $280 < Q_{\text{зад}} \leq 330$, то АД1 и АД2 включаются на номинальную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{2\text{зад}} = \omega_{\text{ном}}$, обеспечивая номинальный расход воды $2 \cdot Q_{\text{ном}} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$; третий двигатель АД3 включается на переменную частоту вращения $0,8 \cdot \omega_{\text{ном}} \leq \omega_{3\text{зад}} \leq 1,3 \cdot \omega_{\text{ном}}$ для обеспечения расхода воды $Q_3 = Q_{\text{зад}} - 2 \cdot Q_{\text{ном}}$.

6) Если $330 < Q_{\text{зад}} \leq 390$, то все электродвигатели включаются на одинаковую переменную частоту вращения $\omega_{1\text{зад}} = \omega_{2\text{зад}} = \omega_{3\text{зад}} = \omega_{\text{зад}}/3$, варьирующуюся в пределах $\omega_{\text{ном}} < \omega_{3\text{зад}} \leq 1,3 \cdot \omega_{\text{ном}}$.

САУР может изменять параметры в режиме реального времени в соответствии с изменениями в системе управления электроприводом насоса, что повышает её устойчивость и надежность. Адаптивное ПИД-регулирование может эффективно адаптировать центробежные насосы к различным сложным условиям эксплуатации и повысить эффективность их работы [9].

Результаты моделирования работы системы регулирования расхода воды представлены на рисунке 2. Максимальное отклонение от заданного расхода (ошибка регулирования) составляет $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, время регулирования $0,7 \text{ с}$, перерегулирование 0% .

Результаты работы системы управления активным выпрямителем напряжения (рисунок 3) иллюстрируют стабильное поддержание заданного постоянного напряжения. Синусоиды напряжения и тока на входе дросселя совпадают по фазе, что означает работу системы с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 1$. Управление инвертором обеспечивает эффективную работу асинхронного двигателя с синусоидальными токами фаз как на номинальной, так и на пониженной частоте.

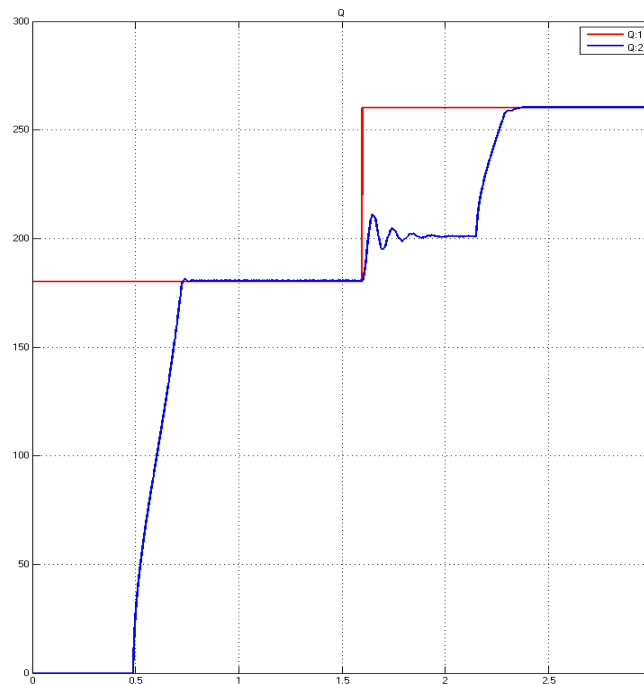


Рисунок 2. Переходный процесс по расходу воды

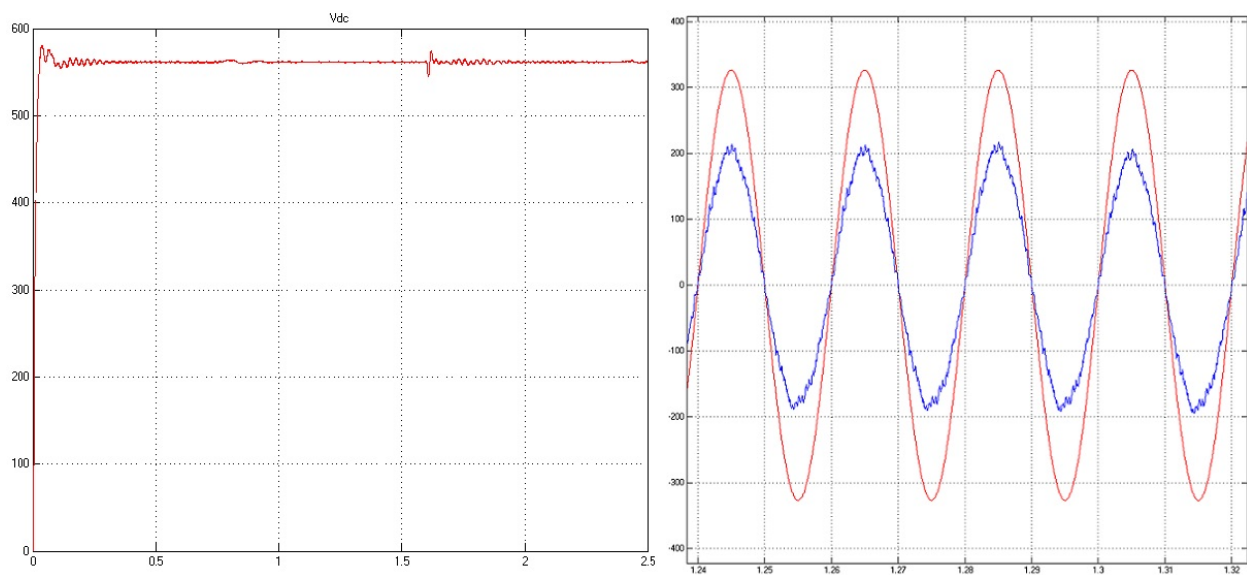


Рисунок 3. Напряжение ЗПТ и синусоиды напряжения и тока фазы А источника

Технико-экономическое обоснование применения ЧРП, выполненное по методике из [2], показывает, что внедрение ЧРП обеспечивает экономию 11% электроэнергии, расходуемой на перекачку воды; снижение расхода чистой воды на 5,6% вследствие стабилизации давления в водопроводной сети и соответственно уменьшения утечек и нерациональных расходов воды; сокращение сброса сточных вод в канализацию на 5%. Регулируемый электропривод многоагрегатных насосных установок способствует уменьшению строительных объемов зданий насосных станций на 15–20% в результате укрупнения единичной мощности насосных агрегатов и соответственно уменьшения их количества. Снижается износ электродвигателей, насосов и трубопроводов, вероятность аварий.

Рассчитано, что предлагаемая энергосберегающая многодвигательная система частотно-регулируемого привода насосов в ценах на начало 2022 г. на 1 кВт·ч электроэнергии, 1 м³ подаваемой воды, электрооборудование компании «Schneider Electric» серии Altivar ATV990 MultiDrive окупается за 1 год.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ вариантов построения многодвигательных электромеханических систем асинхронного электропривода насосов показывает, что наибольшими преимуществами обладает схема с индивидуальным регулированием частоты вращения каждого двигателя.
2. Питание нескольких автономных инверторов многоинверторного преобразователя частоты от одного активного выпрямителя позволяет обеспечить регламентированное качество электроэнергии: синусоидальную форму напряжения сети электроснабжения и потребление чисто активной мощности.
3. Разработанная система регулирования расхода воды изменяет параметры на входе скалярной системы управления электроприводами в режиме реального времени, гарантируя устойчивую и надежную работу центробежных насосов без перерегулирования, со временем регулирования 0,7 с и максимальной ошибкой регулирования расхода воды 0,6 м³/ч.
4. Предлагаемое решение по внедрению частотно-регулируемого привода технологической установки подачи воды на теплоэлектростанции технологически и экономически оправдано, так как данная система ежегодно экономит 11% электроэнергии, 5,6% чистой воды, сокращает объем сточных вод на 5%.

Список литературы

1. Сербин, Ю. В., Прокопов, А. А., Бугров, В. П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования. – Информационный бюллетень ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР "АРТ". – 2007. – №2. – С. 57-65. URL: <http://www.ic-art.ru/Pdf/1.1.%20Параллельная%20работа%20насосных%20агрегатов.pdf> (дата обращения: 13.12.2021).
2. Лезнов, Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с., ил.
3. Иванова, В. Р., Киселев, И. Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. – ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2019. – Т. 21. – №5. – С. 59-70. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
4. Поликашов, С. А., Васильев, Б. Ю. Преобразователь частоты многодвигательного электропривода с активной коррекцией коэффициента мощности и энергосберегающей

системой управления // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – №4 (65). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preobrazovatel-chastoty-mnogodvigatel'nogo-elektroprivoda-s-aktivnoy-korrektsey-koeffitsienta-moschnosti-i-energoberegayushey> (дата обращения: 03.11.2021).

5. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование): Учебное пособие / Б.Ю. Васильев; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – СПб, 2014. – 139 с.

6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

7. Поляков, В. Н. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления: учеб. пособие / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер; под общ. ред. Р. Т. Шрейнера. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 256 с.

8. Козлов, М. Д. Векторное управление активным выпрямителем напряжения / М. Д. Козлов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 9 (113). – С. 184-189. – URL: <https://moluch.ru/archive/113/29440/> (дата обращения: 03.11.2021).

9. Wang Y.; Zhang H.; Han Z.; Ni X. Optimization Design of Centrifugal Pump Flow Control System Based on Adaptive Control // Processes. – 2021. – Т. 9. – № 9. – С. 1538. doi: 10.3390/pr9091538

УДК 621.923

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ЕЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

*С.И. Тимаков¹,
Ю.В. Французова¹,
А.В. Демидова¹*

¹ *Тульский государственный университет, г.Тула, Россия*

АННОТАЦИЯ

В данной статье раскрывается актуальность изучаемой области, определяются преимущества и недостатки автономных транспортных платформ, выделяется наиболее уязвимое место таких платформ - эффективность и безопасность алгоритмов, по которым они работают. Рассматривается создание альтернативного алгоритма выбора приоритетной задачи при перемещении автономной транспортной платформы. Этот алгоритм должен обеспечить эффективный выбор системы для оптимизации производительности компонентов платформы и рационального распределения критических ресурсов, таких как время и энергия. В статье анализируются существующие концепции создания таких систем. В статье представлена общая схема разработанного алгоритма выбора приоритетной задачи и схема взаимодействия подсистем платформы. Также представлена базовая конфигурация автономной транспортной платформы, вербальный алгоритм ее перемещения в заданную точку и описана работа контроллера приоритетного перехода между подсистемами.

Ключевые слова: автономная транспортная платформа; АТП; алгоритмы и методы; подсистемы; задачи; приоритет; планирование пути.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SELECTING A PRIORITY TASK FOR THE INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS TRANSPORT PLATFORM WHEN PLANNING ITS MOVEMENT

*S.I. Timakov¹,
Yu.V. Frantzuzova¹,
A.V. Demidova¹*

¹ *Tula State University, Tula, Russia*

ABSTRACT

This article reveals the relevance of the area under study, determines the advantages and disadvantages of autonomous transport platforms, highlights the most vulnerable place of such platforms - the efficiency and safety of the algorithms under which they operate. Considers the creation of an alternative algorithm choosing a priority task when moving an autonomous transport platform. This algorithm should provide efficient system selection to optimize the performance of platform components and rationally allocate critical resources such as time and energy. The paper analyzes the existing concepts for the creation of such systems. The article presents a general scheme of the developed algorithm for selecting a priority task and a scheme for the interaction of platform subsystems. It also presents the basic configuration of an autonomous transport platform, a verbal algorithm for moving it to a given point, and describes the operation of a priority transition controller between subsystems.

Keywords: autonomous transport platform; ATP; algorithms and methods; subsystems; tasks; a priority; path planning.

I. Введение

Планирование пути — важнейшая задача в области навигации беспилотных машин. Она включает в себя основному три аспекта. Во-первых, спланированный путь должен пролегать от заданной начальной точки к заданной конечной точке. Во-вторых, этот путь должен обеспечивать движение объекта с обходом возможных препятствий. В-третьих, путь должен среди всех возможных путей, удовлетворяющих первым двум требованиям, быть в определенном смысле оптимальным. [1]

Высокая степень автономности определяет необходимость адаптации машин к динамически изменяемой среде функционирования. Они должны самостоятельно принимать решения в сложной и заранее неопределенной обстановке. Поэтому автономные машины должны обладать интеллектуальной системой управления и выполнять поставленные им задачи. [2]

АТП — автономная транспортная платформа, оборудованная системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия человека. Автопилот — устройство или программно-аппаратный комплекс, ведущий транспортное средство по определённой, заданной ему траектории. Наиболее часто автопилоты применяются для управления летательными аппаратами (в связи с тем, что полёт чаще всего происходит в пространстве, не

содержащем большого количества препятствий), а также для управления транспортными средствами, движущимися по рельсовым путям. Современный автопилот позволяет автоматизировать все этапы полёта или движения и другого транспортного средства. [3]

II. Актуальность

Актуальность данной темы обуславливается непрерывным техническим прогрессом, охватывающим все сферы человеческой деятельности. Он подталкивает к созданию объектов, не требующие управления человеком, которые могут выполнять не только повседневные бытовые задания, но и задания с повышенным риском, таких как космические и глубоководные исследования, обслуживания атомных станций, ликвидации последствий техногенных аварий и катастроф. [1]

Если проецироваться на автомобильной индустрии, то она претерпевает существенную трансформацию: крупнейшие производители машин совместно с ИТ специалистами и разработчиками идут к созданию транспортных средств с возможностью полностью автономного вождения. В будущем беспилотный транспорт станет массовым явлением, но на пути к эпохе полностью автономных автомобилей еще предстоит решить массу задач. [3]

III. Преимущества и недостатки

Преимуществами автономных транспортных платформ является:

- перевозка грузов в опасных зонах, во время природных и техногенных катастроф или военных действий - безопасность;
- снижение стоимости транспортировки грузов и людей за счёт экономии на заработной плате водителей;
- более экономичное потребление энергии, топлива и использование дорог за счёт централизованного управления транспортным потоком;
- экономия времени, затрачиваемого на управление транспортной платформой;
- минимизация чрезвычайных ситуаций, дорожно-транспортных происшествий, несущих человеческие жертвы.

Также у автономии имеется ряд недостатков, которые постепенно устраняются, но на данный момент являются еще актуальными:

- надёжность программного обеспечения и эффективность его алгоритмов;
- надёжность технической составляющей платформы;
- пресечение несанкционированного доступа к платформе;
- более дорогое производство транспортной платформы, нежели классической платформы под управлением человека.

Некоторые системы полагаются на инфраструктурные системы (например, встроенные в дорогу или около неё), но более продвинутые технологии позволяют симулировать присутствие человека на уровне принятия решений о рулении и скорости, благодаря набору камер, сенсоров, радаров и систем спутниковой навигации. [3]

IV. Цели и задачи работы

Целью данной работы является повышение эффективности алгоритма перемещения АТП в динамическом пространстве путем разработки новых принципов его построения. Для достижения поставленной цели были обозначены первоочередные задачи:

- 1) выполнить анализ существующих алгоритмов планирования траектории и методов поиска пути в динамически изменяющемся пространстве;

- 2) разработать алгоритм выбора приоритетной задачи при планировании перемещения АТП;
- 3) выбрать принципы организации и функциональную структуру интеллектуальной системы управления перемещением АТП в динамически изменяющемся пространстве;
- 4) утвердить алгоритм маршрутизации и управления перемещением АТП в режиме реального времени в динамически изменяющемся пространстве;
- 5) разработать имитационную компьютерную модель и провести экспериментальные исследования функционирования системы управления перемещением АТП с целью проверки работоспособности алгоритмов планирования и управления в динамически изменяющихся условиях окружающей среды.

В одной из моих статей был реализован патентный поиск по существующим разработкам АТП, а также рассмотрены методы и алгоритмы, на которых основывается их поведение. На данный момент данная статья еще не опубликована. В данной статье происходит разбор 2го и 3го пунктов (по этому материалу написана еще одна статья для Региональной магистерской конференции XVII, которая так же не опубликована на данный момент).

V. Существующие системы навигации автономных объектов

В статье А. Гурьева от 19 декабря 2019 года «Модель сильного искусственного интеллекта» дано описание концепции представления и обработки информации, которая называется «Динамическая семантическая сеть, основанная на действиях». В ней дается определение процесса выбора необходимых действий для достижения целей, основанных на потребностях.

В процессе жизни системы, алгоритм, заложенный в действие, может изменяться, совершенствоваться, но представляется то, что он должен обладать как минимум следующими свойствами:

- выбор следующего действия не должен быть случайным, а должен быть целенаправленным;
- выполненное действия должно получать оценку – успех/неуспех. Неуспех действия должен учитываться при следующем выборе;
- при выборе действия должны учитываться подсказывающие сигналы с уровня ассоциаций (связи типа 2 предыдущего раздела).

Для реализации первого свойства в системе должна иметься информация, о целях, потребностях системы в данный момент времени, об ожидаемых результатах каждого известного системе действия, и об условиях успешного выполнения действия.

Большим плюсом предлагаемого подхода является то, что все три типа информации (цели, ожидаемые результаты действия и необходимые условия для действия) могут быть представлены одной сущностью – понятием-характеристикой. Например, характеристика «что-то рядом» может присутствовать в ожидаемых результатах действия «Подойти к чему-то», в необходимых условиях действия «Взять что-то», а также быть целью в какой-то момент времени.

В системе присутствует перечень целей, состоящий из указателей на понятия-характеристики (также хранится и значимость данной цели). С данным списком, а также со списком действий с активными ассоциативными связями («подсказки») и работает действие «Выбор действия». Также каждое известное системе действие включает два списка указателей – один на обязательные условия для выполнения действия, а другой на характеристики

результата. Основываясь на этой информации алгоритм действия «Выбор действия» и определяет какое действие выбрать, при необходимости конструируя новое составное действие из отдельных известных действий.

В целом, становится видно, как понятие действия, которое берет начало от элементарного эффектора, обрастает вспомогательными структурами (рецепторами, понятиями-характеристиками). Эти структуры формируют некую модель действия, которая позволяет оценивать результат действия до реального выполнения, что дает возможность планировать действия для достижения необходимого результата.

Например, при наличии цели «Голод/Потеря заряда», из модели действия «Съесть еду/Пополнить ресурсы» (в необходимых условиях которого присутствует понятие-характеристика «Еда рядом/Электростанция рядом») будет добавлена цель «Еда рядом/Электростанция рядом», а для ее выполнения создано действие «Подойти к еде/Добраться до станции». [4]

Часть концепция А. Гурьева была использована при разработке алгоритма выбора приоритетной задачи при перемещении АТП.

Так же известно о более старых концепциях, лежащих в базе адаптивного поведения автономных объектов, а именно о двух тесно связанных между собой направлениях исследований: "Искусственная жизнь" и "Адаптивное поведение". "Адаптивное поведение" - подразумевало исследование архитектуры и принципов функционирования, которые позволяют животным или роботам жить и действовать в переменной внешней среде, а также осуществление анализа эволюции когнитивных способностей животных и эволюционное происхождение человеческого интеллекта [5,6,7].

В "Адаптивном поведении", как и в "Искусственной жизни", в основном используется феноменологический подход к исследованиям систем управления адаптивным поведением, то есть предполагается, что существуют формальные правила адаптивного поведения, и эти правила не обязательно связаны с конкретными микроскопическими нейронными или молекулярными структурами, которые есть у живых организмов.

Исследования по адаптивному поведению ведутся в ряде университетов и лабораторий. Кратко охарактеризуем работы одной из ведущих лабораторий – лаборатории AnimatLab, которой руководит один из инициаторов этого направления Жан-Аркадий Мейер.

Общий подход этой лаборатории можно охарактеризовать следующим образом. Анимат, представленный на рисунке 1, существует в реальной или модельной среде. У него есть сенсоры, которые воспринимают информацию из внешней и внутренней среды анимата, и эффекторы, посредством которых он взаимодействует со средой, а также система управления, которая координирует восприятие и действия анимата. Поведение анимата считается адаптивным, если система управления поддерживает жизненно важные переменные анимата (например, V1 и V2 на рисунке 1) в допустимых пределах. На рисунке 1 штриховая стрелка показывает возможную траекторию, выходящую за пределы допустимой области (серый фон – недопустимая область переменных). Сплошная стрелка показывает "исправленную" траекторию, откорректированную с помощью системы управления, обеспечивающей поддержание переменных в допустимой (светлой) области.

Приведенная схема имеет общий характер и не раскрывает внутреннего устройства механизма самоуправления.

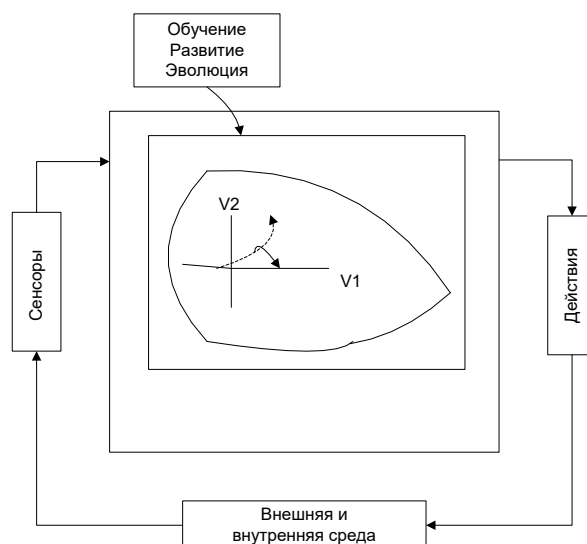


Рисунок 1. Общая схема поведения анимата. Подход AnimatLab

Быстрое развитие получила концепция мультиагентных систем при решении проблем распределенного искусственного интеллекта, которая ориентирована на интеллектуальную сферу [8,9,10,11,12].

Подобный подход представлен в работе Рассела [13]. В данной концепции рассматривается целостный «организм», названный агентом. Агентом является все, что может рассматриваться как воспринимающее свою среду с помощью датчиков и воздействующее на эту среду с помощью исполнительных механизмов. Последовательность актов восприятия агента называется полной историей всего, что было когда-либо воспринято агентом. Выбор агентом действий в любой конкретный момент времени может зависеть от всей последовательности актов восприятия, наблюдавших до этого момента времени.

Предполагается, что интеллектуальные агенты способны максимизировать свои показатели производительности. Реализация указанного свойства упрощается, если агент способен принять на себя обязанность достичь цели и стремиться к её удовлетворению. Цели позволяют организовать поведение, ограничивая выбор промежуточных этапов, которые пытается осуществить агент. Недостатком данного подхода является то, что агент может ограничивать выбор промежуточных этапов, тогда как в реальной жизни это не всегда возможно.

О. Ю. Яковенко [14]. для решения данной задачи декомпозирует процесс принятия решений на несколько этапов: распознавание ситуации; выработка цели; построение плана достижения цели, причем множество согласованных последовательностей состояний, которые гарантированно переводят объект в целевое состояние и есть план. При построении плана минимизируется (или максимизируется) некоторый параметр, который называется стоимость плана. Это необходимо для того, чтобы из всего множества возможных планов выбрать некоторое наиболее предпочтительное подмножество. Основным минусом данного подхода является его неспособность планировать действия в реальном времени.

В работе же Г.С. Осипова [15] по искусственному интеллекту для решения задач моделирования в планировании поведения над дискретными множествами действий применяются конструкции, эквивалентные системам правил. Среди правил выделяются такие,

которые не соответствуют никаким действиям, а лишь пополняют множество факторов состояния, и правила, являющиеся некоторыми действиями. На основе этих правил и осуществляется принятие решения. Минусом данного подхода является не способность к обучению. Для разработки моего алгоритма так же была использована часть концепции Г.С. Осипова.

VI. Конфигурация АТП

Объектом исследования являются автономные транспортные платформы. При выборе принципа организации внутренней структуры, которых основным критерием было - возможность реализации поставленных задач для платформ гражданского назначения, например таких как роботы-доставщики.

Так же были обозначены основные структурные элементы Автономно-транспортной платформы:

- механическая часть (база, 4 колеса с моторами);
- энергетический элемент (1 солнечная батарея);
- сенсоры (2 инфракрасных датчика, для предотвращения столкновений);
- навигация (GPS-модуль);
- контроллер (система, которая обеспечивает взаимодействие и управление узлами).

Предполагается, что автономный объект является самоуправляемым и в его структуре существует несколько подсистем, каждая из них отвечает за конкретную работу и все они взаимосвязаны. Причем подсистемы приходят в активность в зависимости от поставленной задачи, цели к которой происходит движение. Или, можно сказать, при определенной потребности автономного объекта.

На рисунке 2 представлена схема взаимодействия подсистем. В подсистему самоуправления входит подсистема самосохранения. Механическая часть – это эффекторная подсистема, остальные подсистемы соответственно: источник энергии – АКБ, сенсоры – подсистема ИК - элементы, GPS-модуль.



Рисунок 2. Схема взаимодействия подсистем

Каждая из представленных подсистем отвечает за конкретную работу и все они взаимосвязаны. Причем переход управления от одной подсистемы к другой осуществляется исходя из оценки первоочередной потребности автономного объекта.

Подсистема самоуправления. Данная подсистема отвечает за перемещения объекта. Для своей работы подсистема управления использует сигналы от других подсистем, в качестве которых выступают значения потребностей этих подсистем. Подсистема самоуправления производит оценку этих потребностей, а также расчет собственной потребности во времени и формирует вектор цели АТП. В соответствии с выбранной стратегией подсистема самоуправления активизирует определенную подсистему АТП на отрезок времени. Выступает как контроллер.

Подсистема самосохранения. Возможная реакция системы самосохранения весьма разнообразна: сигнал тревоги, изменение безопасного расстояния, изменение параметров движения, силовое воздействие, нейтрализация внешнего источника угрозы в рамках имеющихся ресурсов. Разрабатываемый автономный объект в перспективе будет обладать следующими возможностями: сигнал тревоги типа низкого заряда АКБ (переключение на зарядку АКБ), изменение параметров движения. [16,17,18]

Подсистема сенсорных элементов. Предполагаемый автономный объект обладает системой ИК-зрения, что позволяет избежать столкновения с объектами и GPS-модуль для ориентирования на местности и построения вектора направления движения до цели.

Центральный источник энергии. Предполагается, что источник энергии обеспечивает удовлетворение всех потребностей по реализации необходимых функций в течении длительного времени. При чем данный источник энергии в каждом конкретном случае позволяет достичь указанной мощности. Восполняется он с помощью солнечной энергии при полной остановке движения объекта.

Подсистема эффекторных элементов. Благодаря их наличию происходит силовое изменение параметров движения автономного объекта. В нашем случае объект обладает возможностью движения по поверхности. [19]

VII. Движение платформы в заданную точку

Планирование поведения, или ИИ - планирование – это способность интеллектуальной системы синтезировать последовательность действий для достижения желаемого целевого состояния [10,11].

Транспортная платформа имеет начальные координаты, далее ей передаются координаты точки, в которую требуется попасть. По результатам вычислений строится вектор направления движения. Путь представляет собой прямую. Происходит оценка затрачиваемых энергоресурсов и в случае их достаточности, платформа начинает движение по прямой в сторону финишной точки.

Если по пути возникают препятствия, то об этом систему оповещают инфракрасные датчики и приоритет получает система самосохранения, которая принимает решение поворачивать с сопутствующем продвижением в перед в сторону, до исчезновения препятствия из видимости датчиков. Как только препятствие пропало, приоритет получает подсистема самоуправления, в которой осуществляется перерасчёт пути. Далее платформа делает поворот в сторону точки финиша до получения прямого вектора движения. [20]

В процессе достижения конечной точки происходит расчёт запаса хода и, если запас хода составляет меньше, чем расстояние до цели, то приоритет отдается подсистеме источника

энергии, которая предпримет немедленную остановку и зарядку до необходимого объема энергии с небольшим запасом, чтобы дойти до финиша. Модель общего поведения платформы и выбора приоритетной системы представлена на рисунке 3. [21]

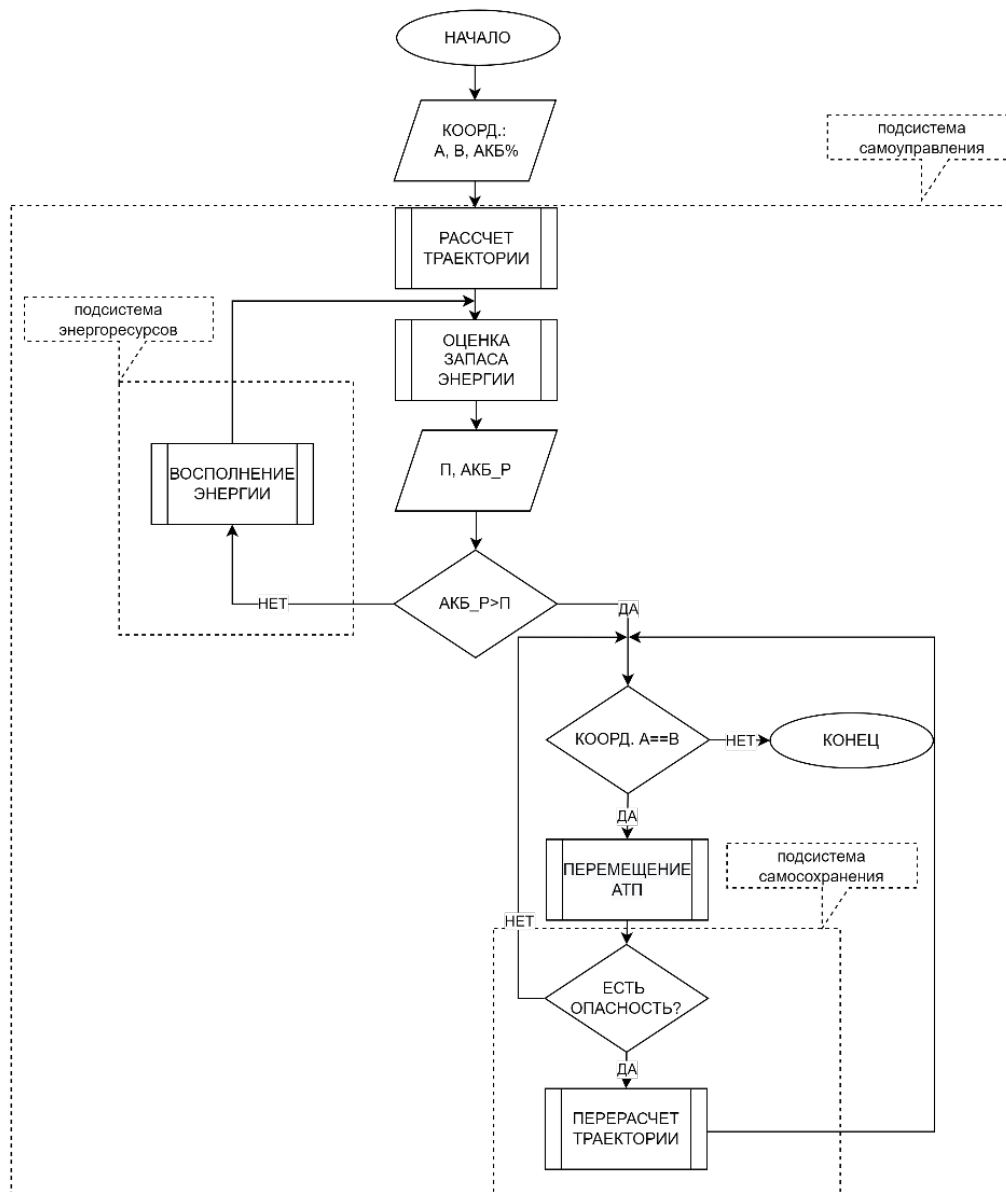


Рисунок 3. Схема поведения платформы

Описание работы алгоритма:

1. На вход подаются все необходимые данные, такие как: координаты АТП, финиша уровень АКБ;
2. Производится расчет траектории движения, получение расстояний и оценка запаса энергии;
3. Следующим шагом идет сравнение возможного прохождения пути на оставшимся заряде и расчетном пути до «финиша»;
4. Если заряда не хватает, то производим подзарядку батареи;

5. Иначе, если энергии хватает, то сравниваем текущие координаты и координаты финиша. Если они равны, то конец. Если нет, то приступаем к перемещению;

6. Если на пути сенсор обнаруживает опасность, то осуществляем перерасчет траектории (действие происходит до тех пор, пока препятствие не исчезнет из поля видимости сенсоров);

7. Далее алгоритм проходит заново, до момента пока текущие координаты не будут равны координатам «финиша». [20]

VIII. Контроллеры перехода приоритета

Для каждой из подсистем предполагается, что существует определённый сигнал для перехода приоритета к ней.

Для передачи управления системе самосохранения существует определенный критерий: это расстояние, ближе которого объекты могут вызывать опасную ситуацию, причинить ущерб себе и платформе. В зависимости от того, с какой скоростью движется платформа, пересчитывается безопасное расстояние. Следовательно, чем быстрее движение АТП, тем меньше времени у платформы есть для того, чтобы изменить траекторию перед препятствием. Безопасное расстояние пересчитывается динамически с учетом окружающих обстоятельств.

Для передачи управления подсистеме самообеспечения, критерием является остаточный запас хода, который тоже динамически рассчитывается из потребления энергии платформой от внешних потребителей. Если данный запас хода +15% (условно) меньше чем требуется до финиша, то приоритет переходит к системе самообеспечения, которая в свою очередь обеспечивает подзарядку аккумуляторов. [22]

IX. Заключение

На основе анализа работ по созданию автопилотируемых автономных интеллектуальных объектов были выявлены основные проблемы их создания. Несмотря на интенсивное развитие таких направлений как робототехника, искусственный интеллект и т.д. подходы к созданию универсального алгоритма не были предложены. Все ранее созданные работы в большинстве своем были узко специализированы под конкретную ситуацию либо под конкретный объект, но главное все они содержат сложные математические расчеты, снижающие быстродействие АТП. [23]

Как известно, быстродействие является одной из важнейших характеристик для автономных платформ, так как от нее зависит безопасность окружающих и самой АТП.

В данной работе сделаны первые шаги по решению этой проблемы, благодаря разработке простого алгоритма, который распределяет приоритет подсистем, что облегчает работу АТП так как в нужный момент времени задействованы только необходимые подсистемы.

Список литературы

1. Тимаков С.И. (научный руководитель: к.т.н., доц. Французова Ю.В.) Обзор автономных транспортных платформ и их поведения в 3D пространстве ИНТЕЛЛЕКТ - 2021. Сборник трудов конференции. Интеллектуальные и информационные системы. - Издательство ТулГУ, 2021, с. 306-309

2. Евстигнеев Д.В. Программно-алгоритмическое обеспечение интеллектуальных систем управления автономными мобильными роботами: диссертация кандидата технических наук: 05.13.01.- Москва, 2003.- 218 с.: ил. РГБ ОД, 61 03-5/3351-7
3. TADVISER. «Автопилот. Беспилотный автомобиль.» // TADVISER. Государство. Бизнес. Технологии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Автопилот_\(беспилотный_автомобиль\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Автопилот_(беспилотный_автомобиль)) (Дата обращения 23.06.2022)
4. Гурьев А. «Модель сильного искусственного интеллекта.» // Хабр. Искусственный интеллект. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/481172/> (Дата обращения 23.06.2022)
5. Анохин К.В., Судаков К.В. Системная организация поведения: Новизна как ведущий фактор экспрессии ранних генов в мозге при обучении //Успехи Физиологических Наук. 1993. Т. 24. N.3. С. 53-70
6. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональных систем, М. - Наука, 1980. - 198 с.
7. Бродский Ю.И., Лебедев В.Ю., Огарышев В.Ф., Павловский Ю.Н., Савин Г.И. Общие проблемы моделирования сложных организационно-технических систем. В кн. "Вопросы кибернетики" М.: АН СССР, 1990, с.42-48
8. Городецкий В. И. Многоагентные системы: основные свойства и модели координации поведения // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – № 1
9. Перевезенцев А.А. Многоагентная модель обработки информации // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. девятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва, МЭИ, 2003. – С. 302–303
10. Пospelов Д.А.. редактор. Справочник. Искусственный интеллект. В 3-х книгах. Книга 2. Модели и методы. - М.: Наука, 1990. - 287 с.
11. Пospelов Д. А. Многоагентные системы - настоящее и будущее// Информационные технологии и вычислительные системы. -1998. -№ 1.
12. Тарасов В.Б. От искусственного интеллекта к искусственной жизни: новые направления в науках об искусственном // Новости искусственного интеллекта. - 1995. - No4. - С.93-117
13. Рассел, Стюарт, Норвиг, Питер. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.: ил. – Парал.тит.англ
14. Моделирование управления движением человека. - М.: СпортАкадемПресс, 2003. 360 с., сборник научных трудов под ред. О. Ю. Яковенко, Шестакова М. П., Аверкина А.Н.
15. Осипов Г.С. Методы искусственного интеллекта и задача управления. - М.: Наука, 1990. С.161-169
16. Белоконь Н.Н., Галаган М.В., Семенчев Е.А. Функциональная организация механизмов самообеспечения и самосохранения активных самоорганизующихся объектов имитационных систем. Известия ТулГУ. Серия. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып.4. Информационные системы. – Тула.: Изд-во ТулГУ, 2005. – 58-65с.
17. Белоконь Н.Н. Функциональная организация механизма самосохранения активных самоорганизующихся объектов имитационных систем // Международная молодежная научная конференция «XXX Гагаринские чтения». – М.: МАТИ – РГТУ им. К.Э.Циолковского, 2006
18. Белоконь Н.Н. Принцип действия механизма самосохранения активного объекта интеллектуальной системы моделирования // I научно – практическая магистерская конференция, ТулГУ, 2006. – С.173
19. Демидова А.В., Семенчев Е.А. Имитационное исследование универсального алгоритма перемещения интеллектуальных беспилотных объектов в динамически изменяющемся

трехмерном пространстве. Вестник ТулГУ. Серия. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып.6 Информационные системы. Изд-во ТулГУ, 2012, с.77-86

20. Демидова А.В., Семенчев Е.А. Исследование универсального алгоритма перемещения интеллектуальных беспилотных объектов в динамически изменяющемся пространстве//Сб. научн. трудов студентов, аспирантов и молодых ученых «Научное творчество XXI века". Белгород, ноябрь, 2012 г. - с. 82-86

21. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006

22. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю., Коберси И.С., Соловьев В.В., Шаповалов И.О. Интеллектуальное управление движением автономных подвижных объектов на основе поведенческого подхода. Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», №3 (2015). Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3077

23. Демидова А.В. Семенчев Е.А., Имитационная модель перемещения интеллектуальных автономных объектов в пространстве с препятствиями на основе универсального алгоритма. // Технические науки. Известия ТулГУ. Вып. 12 Ч. 2, 2009г. – с.284-291

