

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

УДК 622.323

На правах рукописи

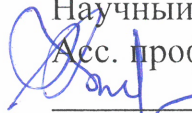
Тулешов Султан Асылбекулы

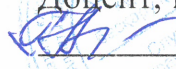
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

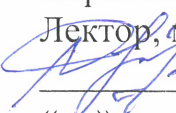
На соискание академической степени магистра

Название диссертации Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы

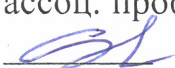
Направление подготовки 7M07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

Научный руководитель
Асс. профессор, канд.техн.наук
 Калиев Б.З.
« » 2022 г.

Рецензент
Доцент, канд.техн.наук,
 Граф А.Ю.
« » 2022 г.

Нормоконтроль
Лектор, магистр техн. наук,
 Балгаев Д.Е.
« » 2022 г.



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ТМиТ,
канд.техн.наук,
ассоц. профессор
 Бортэбаев С.А.
«08» 06 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

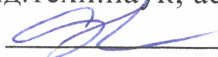
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра технологических машин и транспорта

7М07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ТМиТ,
канд.техн.наук, ассоц. профессор
 Бортебаев С.А.

«17» 12 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Тулешову Султану Асылбекулы

Тема: Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы

Утверждена приказом руководителя университета

Срок сдачи законченной работы «8» июня 2022 г.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Анализ существующих систем управления электроприводом;

б) Анализ систем электроснабжения электроприводных КС;

в) Выбор структуры построения преобразователя частоты;

г) Анализ результатов моделирования;

Рекомендуемая основная литература:

1. Садиков Д.Г. Исследование электроприводного газоперекачивающего агрегата на базе каскадного многоуровневого преобразователя частоты // Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 183с.
2. Маклаков А.С. Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности // Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск: НИУ ЮУГУ, 2017. – 129с.
3. Amarendra Matsa Optimized Space Vector Pulse-width Modulation Technique for a Five-level Cascaded H-Bridge Inverter / Amarendra Matsa, Irfan Ahmed, Madhuri A. Chaudhari // Journal of Power Electronics. – Vol. 14. – No. 5. – pp. 937-945. – September 2014. ISSN(Print): 1598-2092 / ISSN(Online): 2093-4718.
4. Колесников С.М. Разработка и исследование энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов: автореферат: 05.09.03 / Воронеж, 2005. 2016, 29 с.

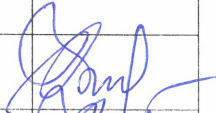
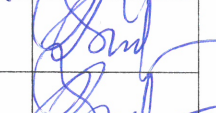
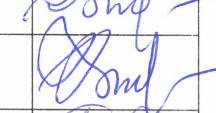
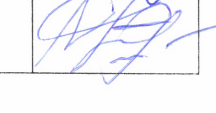
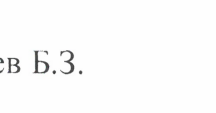
ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

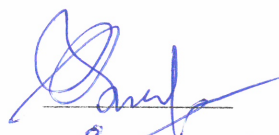
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ существующих систем управления электроприводом	12.11.2021	
Анализ систем электроснабжения электроприводных КС	15.02.2022	
Выбор структуры построения преобразователя частоты	15.03.2022	
Анализ результатов моделирования	15.04.2022	

Подписи

консультантов и нормконтролеров на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов работы

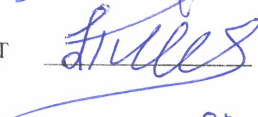
Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ существующих систем управления электроприводом	Калиев Б.З. асс. профессор, канд.техн.наук		
Анализ систем электроснабжения электроприводных КС	Калиев Б.З. асс. профессор, канд.техн.наук		
Выбор структуры построения преобразователя частоты	Калиев Б.З. асс. профессор, канд.техн.наук		
Анализ результатов моделирования	Калиев Б.З. асс. профессор, канд.техн.наук		
Нормоконтролер	Магистр техн. наук, лектор Балгаев Д.Е.		

Научный руководитель



Калиев Б.З.

Задание принял к исполнению магистрант



Тулешов С.А.

Дата

« 08 » 06 2022 г.

АНДАТПА

Заманауи деректерге сүйенсек, «ҚазМұнайГаз» ҰК АҚ-да өз қажеттіліктеріне пайдаланылатын табиғи газдың жалпы тұтынуының 80%-ға дейіні газ тасымалдау жүйесінің нысандарына келеді.

Қазіргі уақытта газ тасымалдау объектілерінде қолданылатын электрмен басқарылатын газ компрессорлық қондырғылар негізінен физикалық және технологиялық тұрғыдан ескірген және энергия тиімділігінің заманауи талаптарына сәйкес келмейді.

Реконструкцияланған және жаңадан салынған компрессорлық станциялардағы ЭГАҚ жұмысының тиімділігі мен сенімділігін арттырудың ұтымды шешімі жиілікпен басқарылатын электр жетегін пайдалану болуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

По современным данным до 80% всего потребления природного газа, используемого на собственные нужды в АО НК «КазМунайГаз», приходится на объекты газотранспортной системы.

Электроприводные газоперекачивающие агрегаты, используемые в настоящее время на объектах транспорта газа, в большинстве своем физически и технологически устарели и не отвечают современным требованиям энергоэффективности.

Рациональным решением повышения эффективности и надежности работы ЭГПА на реконструируемых и вновь сооружаемых компрессорных станциях может стать использование частотно-регулируемого электропривода.

ANNOTATION

According to modern data, up to 80% of the total consumption of natural gas used for own needs in JSC NC "KazMunayGas" falls on the facilities of the gas transmission system.

Electrically driven gas compressor units currently used at gas transportation facilities are mostly physically and technologically obsolete and do not meet modern energy efficiency requirements.

A rational solution to improve the efficiency and reliability of EGPU operation at reconstructed and newly constructed compressor stations can be the use of a frequency-controlled electric drive.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Особенности применения ЭГПА на объектах транспорта газа	9
1.1 Современные технологии, применяемые в ЭГПА	9
1.2 Практика применения современных ЭГПА	13
1.3 Особенности учета влияний режимов работы и внешних факторов при построении систем управления ЭГПА	13
1.4 Анализ существующих систем управления электроприводом	15
1.5 Анализ систем электроснабжения электроприводных КС	17
2 Разработка инвариантной системы автоматического регулирования и алгоритмов управления	20
2.1 Формализация описания возмущений, действующих на электроприводной газоперекачивающий агрегат	20
2.2 Построение замкнутой системы автоматического регулирования ЭГПА со стабилизацией давления газа на выходе при стохастических возмущениях	21
2.3 Получение и анализ многофакторного регрессионного уравнения управления ЧРП ЭГПА на примере реального объекта	28
3 Экспериментальное обоснование применимости разработанных инвариантной системы автоматического регулирования и алгоритмов управления электроприводом ГПА	32
3.1 Выбор структуры построения преобразователя частоты	32
3.2 Разработка алгоритма управления ПЧ на базе векторной широтно-импульсной модуляции	35
3.3 Компьютерное моделирование ЭГПА с системой автоматического регулирования скорости вращения	37
3.4 Анализ результатов моделирования	43
4 Техничко-экономические аспекты практического применения систем автоматического регулирования ЭГПА	51
4.1 Применения систем автоматического регулирования для управления группой ЭГПА на КС	51
4.2 Варианты построения схем электроснабжения ЭГПА при различном количестве ЧРП	54
4.3 Методические подходы к технико-экономическому сравнению вариантов	57
Заключение	61
Список литературы	64

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-регулируемый электропривод уже давно широко используется во многих областях промышленности и многократно доказал свою технико-экономическую целесообразность. В настоящее время высоковольтные преобразователи частоты начинают применяться и в транспорте газа. Современные электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) используют частотное регулирование скорости вращения двигателя для повышения надежности и эффективности работы при его пусках и изменениях режимов [1, 31, 32, 39].

Расширение распространения ЭГПА с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) требует создания систем автоматического регулирования (САР) скорости вращения электродвигателя, учитывающих все технологические и внешние факторы, влияющие на режимы работы газоперекачивающего агрегата (производительность, давление на входе и выходе, температура газа, температура окружающей среды). Для достижения инвариантности САР к действующим факторам, как правило, применяется комбинированная структура их построения.

Процесс компримирования газа в ЭГПА зависит от множества факторов: технологических, конструктивных, климатических и т.д. Учесть все эти параметры аналитическими выражениями практически невозможно. Актуальным является разработка алгоритмов управления электроприводом, способных адекватно учесть все действующие на работу ЭГПА факторы.

На электроприводных компрессорных станциях, как правило, в работе находятся одновременно несколько ЭГПА. Их совместная работа может осуществляться в различных режимах, что влияет на выбор схемы электроснабжения. Различные варианты построения схемы электроснабжения электроприводной компрессорной станции (КС) с учетом применения частотно-регулируемого привода могут существенно влиять как на капитальные затраты при сооружении объекта, так и на эксплуатационные расходы в виде платы за потребленную электроэнергию. Необходимо определение принципов построения схем электроснабжения электроприводных компрессорных станций, с учетом применения частотно-регулируемого привода.

Объектом исследования является электротехнический комплекс в составе электроприводного газоперекачивающего агрегата, включающий в себя асинхронный электродвигатель, высоковольтный частотно-регулируемый преобразователь с системой управления, нагнетатель природного газа в виде нагрузки.

Предметом исследования является система управления высоковольтным частотно-регулируемым преобразователем и алгоритм, позволяющий задать оптимальную скорость вращения привода газоперекачивающего агрегата, с учетом действия на объект исследования технологических и внешних влияющих факторов.

Целью диссертационной работы является исследование возможности повышения энергоэффективности трубопроводного транспорта газа путем обоснования целесообразности использования ЭГПА с предложенной структурой и алгоритмами управления частотно-регулируемым приводом центробежного нагнетателя.

Задачи, решаемые в работе:

1) Анализ современных технологий повышения энергоэффективности, применяемых в ЭГПА. Анализ основных вариантов построения систем автоматического регулирования электропривода. Исследование учета влияния технологических и внешних факторов при построении систем управления.

2) Синтез структуры комбинированной системы регулирования скорости вращения электропривода ГПА со стабилизацией давления газа на выходе, инвариантной к изменению внешних и технологических параметров.

3) Разработка алгоритма задания оптимальной скорости вращения электропривода ГПА, позволяющего учесть стохастический характер процессов в магистральных газопроводах.

4) Создание имитационной компьютерной модели в составе центробежного нагнетателя, высокоскоростного асинхронного двигателя, высоковольтного преобразователя частоты с системой управления для исследования работы предлагаемой системы автоматического регулирования и алгоритмов управления.

5) Разработка алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции для трехфазного трехуровневого инвертора напряжения, в том числе с целью использования в составе компьютерной имитационной модели.

6) Разработка методики выбора оптимальной схемы электроснабжения группы ЭГПА, управляемых по предлагаемым алгоритмам.

Методы исследования:

При исследовании использовались методы линейной алгебры, методы регрессионного анализа, подходы теории оптимизации, элементы Булевой алгебры, методики технико-экономического сравнения инвестиционных проектов.

Научная новизна:

1) Структура замкнутой комбинированной САР скорости ЭГПА, инвариантная воздействию основных внешних и технологических стохастических возмущений, влияющих на работу агрегата, отличающаяся введением подсистемы стабилизации давления газа на выходе.

2) Алгоритм отбора параметров и получения регрессионных уравнений для задания скорости вращения привода ЭГПА с учетом влияния внешних возмущений и изменения технологических параметров.

3) Предложена математическая модель трехуровневого автономного инвертора напряжения, входящего во вновь разработанную имитационную модель ЭГПА с частотно-регулируемым электроприводом с системой управления.

4) Алгоритм векторной ШИМ для трехфазного трехуровневого инвертора напряжения, реализующего минимальное число переключений силовых ключей за период.

5) Впервые разработана методика выбора оптимального варианта схемы электроснабжения группы ЭГПА с частотно-регулируемым приводом.

Практическая ценность работы:

1) Предложенная структура замкнутой комбинированной САР скорости ЭГПА может применяться как при построении современных систем управления высоковольтными приводами газоперекачивающих агрегатов, так и в других отраслях промышленности.

2) Разработанный алгоритм получения регрессионных уравнений для задания скорости вращения привода ЭГПА может быть использован при построении логики систем управления электроприводом.

3) Разработанная имитационная модель высоковольтного частотно-регулируемого электропривода ГПА с системой управления позволяет на этапе проектирования оценить эффективность применения различных алгоритмов и схем управления и их соответствие технологическому процессу.

4) Разработанный программный код для алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции для трехфазного трехуровневого инвертора напряжения может быть использован при проектировании систем управления преобразователями частоты.

5) Разработанная методика выбора оптимального варианта схемы электроснабжения группы ЭГПА с частотно-регулируемым приводом может применяться при проектировании объектов транспорта и хранения газа.

1 Особенности применения ЭГПА на объектах транспорта газа

1.1 Современные технологии, применяемые в ЭГПА

Парк электроприводных газоперекачивающих агрегатов АО НК «КазМунайГаз», введенный в эксплуатацию в 80-90-х годах прошлого века на 98% оснащен синхронными двигателями мощностью от 4 до 25 МВт.

Действующие ЭГПА обладают рядом существенных недостатков:

- необходимость ступенчатого запуска электродвигателя;
- ограниченное число пусков агрегатов с «нуля»;
- отсутствие регулирования скорости вращения электродвигателя;
- необходимость в масляном хозяйстве и установок воздушного охлаждения масла (АВО масла).

Применение нерегулируемого синхронного электропривода и слабая приспособленность к переменным режимам газопроводов является основным недостатком большинства действующих ЭГПА [12]. Использование электропривода с регулируемым числом оборотов может дать до 25% сокращения энергетических затрат в объеме компрессорной станции магистрального газопровода. Это является результатом того, что ЭГПА в любой момент времени функционирует в оптимальном режиме, с максимальным или близким к максимальному коэффициентом полезного действия. Изменение числа оборотов позволяет не только экономично регулировать работу нагнетателя, но и защищать его, в комбинации с другими средствами, от попадания в зону неустойчивой работы при изменении параметров на входе (недопустимое снижение скорости). Плавное регулирование скорости используется при пуске и останове агрегата для исключения недопустимых бросков пускового тока и момента электродвигателя.

Современные электроприводные ГПА обеспечивают высокий уровень энергетических показателей, качественные пускорегулировочные характеристики, высокую надежность, безаварийность и живучесть основного оборудования [3,10]. Упрощенная структурная схема ЭГПА показана на рисунке 1.1.

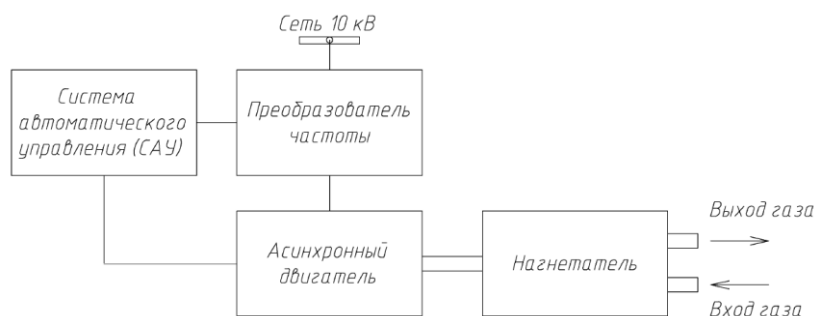


Рисунок 1.1 – Упрощенная структурная схема ЭГПА
Приводной двигатель

Центробежные нагнетатели газоперекачивающих агрегатов как правило работают при скоростях вращения более 6000 об./мин. В качестве привода в современных ЭГПА используются высокоскоростные асинхронные электродвигатели (Рисунок 1.2). Это позволяет исключить из состава агрегата редуктор и повысить КПД и надежность ЭГПА [13].



Рисунок 1.2 – Высокоскоростной асинхронный электродвигатель Siemens

Конструкция ротора асинхронного двигателя позволяет работать с большими частотами вращения. Использование асинхронного электродвигателя в составе ЭГПА дает следующие преимущества:

- легкость и компактность конструкции агрегата - асинхронный двигатель конструктивно проще синхронного, что делает его проще в эксплуатации;
- возможность плавного быстрого и многократного пуска агрегата;
- не требуется система возбуждения, что позволяет снизить стоимость ЭГПА;
- отсутствие высоконапорных уплотнений;
- взрывобезопасное исполнение, что делает возможным установку двигателя и нагнетателя в одном помещении;
- низкие инвестиционные затраты;
- низкие расходы на эксплуатацию и на техническое обслуживание и ремонты (ТОиР).

Высоковольтный преобразователь частоты

Наиболее экономичным способом регулирования частоты вращения и, как следствие, производительности ЭГПА является использование

преобразователей частоты (ПЧ) [6,9]. При помощи преобразователя частоты обеспечивается автоматическое плавное регулирование скорости электропривода. Вследствие этого обеспечивается:

- энергоэффективные режимы, в связи с тем, что агрегат получает от сети только необходимое количество энергии для его оптимальной работы с необходимым КПД;
- повышение надежности эксплуатации агрегатов и увеличение их ресурса при снижении затрат на ТОиР.

Как правило, на существующих электроприводных компрессорных станциях регулирование потока газа осуществляется при помощи дросселирования. Применение преобразователей частоты позволяет достичь существенной экономии электроэнергии (см. Рисунок 1.3) [72,73,75].

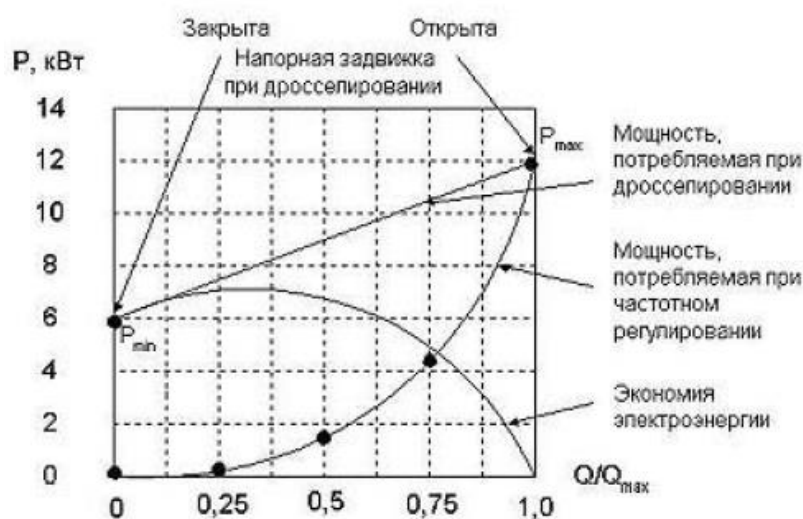


Рисунок 1.3 – Диаграмма потребляемой мощности при использовании ПЧ

Для работы высокооборотного асинхронного электродвигателя необходим преобразователь частоты с выходной частотой не менее 100-150 Гц.

Наиболее широкое применение для регулирования частоты вращения двигателей получили ПЧ, состоящие из двух звеньев. Они преобразуют электроэнергию, поступающую из питающей сети в электроэнергию с необходимыми значениями тока, напряжения и частоты в два этапа. На первом этапе с помощью выпрямителя производится выпрямление переменного напряжения. На втором этапе происходит преобразование постоянных напряжения и тока в переменные с новыми параметрами. Такое преобразование осуществляется устройствами, называемыми автономными инверторами.

КПД современных двухзвенных преобразователей является достаточно высоким и находится в пределах 96,5-98,5%.

На рисунке 1.4 показана упрощенная схема регулирования скорости вращения электродвигателя от преобразователя частоты на базе автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

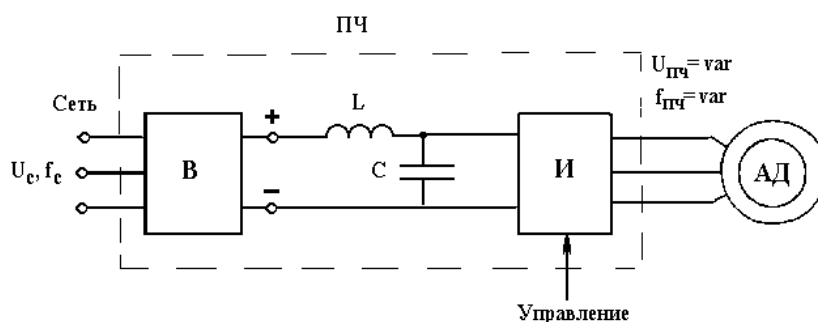


Рисунок 1.4 – Схема преобразователя частоты с АИН и ШИМ

Основным фактором, ограничивающим применение высоковольтных преобразователей частоты, является их высокая стоимость. Таким образом, необходимо для каждого конкретного случая выполнять оценку экономической целесообразности установки ПЧ.

Система магнитного подвеса ротора двигателя и центробежного нагнетателя

Все современные ЭГПА, как правило, оснащаются системами магнитного подвеса ротора двигателя и центробежного нагнетателя [29]. Используются сухие уплотнения, что позволяет отказаться от масляного хозяйства. Такое решение существенно упрощает конструкцию агрегата и делает его более простым в обслуживании [15,16].

Ряд производителей (Alstom и др.) соединяют в едином моноблоке одну или несколько ступеней центробежного нагнетателя (ЦБН), которые располагаются на роторе электродвигателя и непосредственно сам электродвигатель. Данная система также оснащается магнитным подвесом.

Применение электромагнитного подвеса ротора позволяет:

- повысить КПД агрегата;
- исключить систему масляного хозяйства;
- использовать компрессоры с частотой вращения до 20000 об/мин.;
- повысить готовность агрегата к пуску, сократить время пуска;
- повысить показатели надежности и ресурс ЭГПА, уменьшить затраты на ТОиР;
- уменьшить расход электроэнергии.

В настоящее время внедрение электродвигателей с активным электромагнитным подвесом ротора еще только начинается, незначительная статистика по использованию данной технологии и ее высокая стоимость ограничивают их применение [68].

1.2 Практика применения современных ЭГПА

В практике рекомендуемый мощностной ряд комплектных ЭГПА имеет вид: 4,0-6,3-8-10-12,5-16-25-32 МВт. В настоящее время производятся ЭГПА с мощностями 4-6,3-8-12,5 МВт.

ЭГПА мощностью 16, 25 и 32 МВт в настоящее время также разрабатываются предприятием «РЭП Холдинг» [35].

Рабочий диапазон регулирования частоты вращения двигателя выбирается из ряда 1:2; 1:5; 1:10; 1:20; 1:30; 1:50; 1:100.

Обзор основных производителей ЭГПА

Основные отечественные производители ЭГПА представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Типы ЭГПА

Тип ЭГПА	Ном. мощность, кВт	Ном. частота вращения, об/мин
ЭГПА-4,0/8200-56	4000	8200
ЭГПА-6,3/8200-56	6300	8200
ЭГПА-12,5/6500-56	12500	6500

1.3 Особенности учета влияний режимов работы и внешних факторов при построении систем управления ЭГПА

Результатом работы системы управления связки ПЧ-ЭГПА является задание скорости вращения двигателя и обеспечение требуемой производительности агрегата с поддержанием необходимых значений технологических параметров, например давление газа на выходе.

Требуемая производительность ЭГПА напрямую связана с режимом работы непосредственно компрессорной станции и газопровода в целом. Режим работы КС может значительно меняться в рамках периода наблюдения и зависит от многих факторов [20]. На рисунке 1.5 показана диаграмма работы КЦ в течение одного месяца.

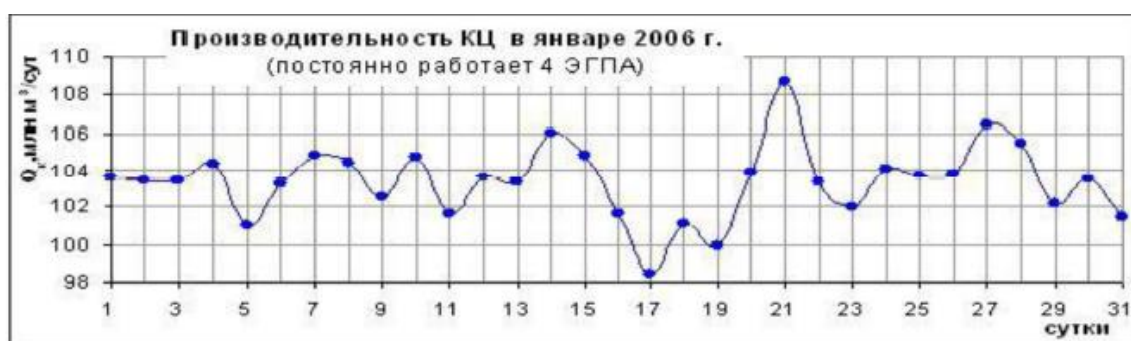


Рисунок 1.5 - Диаграмма производительности КЦ в январе 2006

Режим работы КС определяется заданным режимом газопровода, режимом работы соседних КС и даже количеством вентиляторов АВОгаза, находящихся в работе на КС через одну от наблюдаемой (см. Рисунок 1.6).

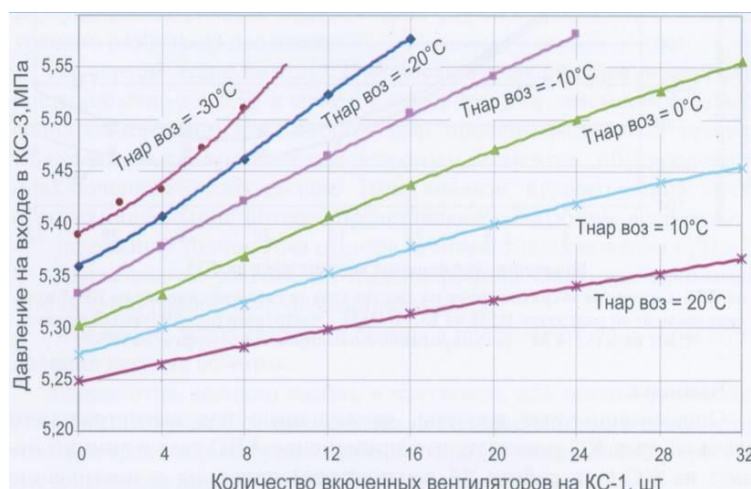


Рисунок 1.6 - Зависимость давления транспортируемого газа на входе КС-3 при включении вентиляторов АВО на КС-1 (через станцию)

Как видно из диаграммы, на технологические параметры работы КС косвенным образом также влияет температура окружающего воздуха через эффективность АВОгаза.

Таким образом, производительность ЭГПА, как основной технологический параметр может изменяться в довольно широких пределах под действием большого количества технологических и внешних факторов. На рисунке 1.7 показана диаграмма производительности для ЭГПА №3 КС Парабель, газопровода «Парабель-Кузбасс» в течение года. Как видно из диаграммы Рисунок 1.7, производительность агрегата изменяется в значительных пределах, колебания доходят до 50% от номинальных значений.

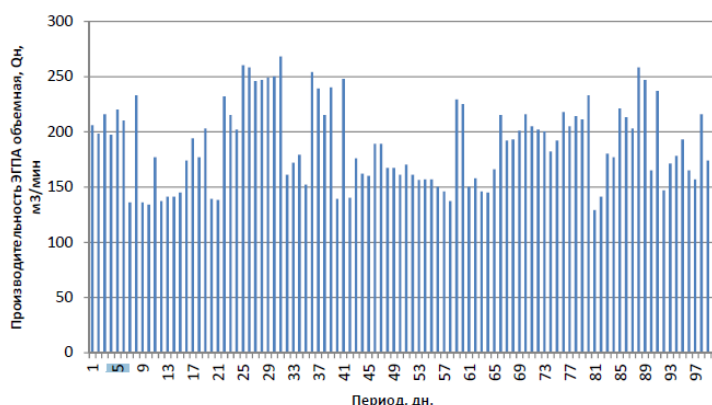


Рисунок 1.7 - Диаграмма производительности для ЭГПА №3 КС Парабель

Технологические и внешние факторы влияют не только на режимы работы КС и газопровода в целом, но также на работу конкретного агрегата.

Условия функционирования большинства ЭГПА предполагают, что скорость, момент нагрузки и многие технологические параметры значительно изменяются во времени, а не остаются постоянными, как предполагается упрощенно в простейших локальных приводах.

Наиболее существенное влияние на работу электроприводных газоперекачивающих агрегатов кроме требуемой производительности оказывают следующие технологические параметры: давления и температура газа на входе ЭГПА, давление и температура газа на выходе ЭГПА.

Согласно [91] КПД центробежного нагнетателя имеет сложную зависимость от параметров газа. В тоже время основные параметры газа взаимозависимы. Таким образом, нахождение зависимости производительности ЦБН, а, следовательно, ЭГПА от технологических параметров представляет сложные аналитические вычисления, в результате которых в любом случае невозможно учесть все индивидуальные особенности каждого агрегата.

Кроме технологических параметров на работу ЭГПА оказывают влияние факторы окружающей среды: атмосферное давление, влажность и в первую очередь температура. Температура окружающего воздуха оказывает как косвенное, через воздействие на газопровод или через эффективность АВО газа (Рисунок 1.4), так и непосредственное влияние на работу газоперекачивающих агрегатов.

Вопросы учета внутренних и внешних факторов, действующих на основные технологические установки транспорта газа, рассматривались в [32, 39]. В данных работ достигнуты существенные результаты по изучению зависимостей технологического процесса от влияющих факторов, разработаны решения по их учету при построении систем управления. Развитием достижений данных работ является изучение взаимозависимостей между влияющими факторами, корреляционный анализ, глубокий статистический анализ полученных зависимостей.

Необходимо отметить, что существуют сложные взаимозависимости между технологическими параметрами и внешними факторами, которые практически невозможно учесть аналитическим путем [56,59]. Далее в работе будет изучена взаимная корреляция между разными типами влияющих факторов.

Анализ влияний технологических и внешних факторов на работу ЭГПА дает возможность учесть их при построении систем управления и сделать системы управления инвариантными к изменению данных факторов.

1.4 Анализ существующих систем управления электроприводом

Для обеспечения плавного, с необходимой точностью регулирования скорости в заданном диапазоне применяются системы управления. Также системы управления электроприводом обеспечивают заданные

характеристики переходных процессов при изменении скорости, момента и других параметров привода.

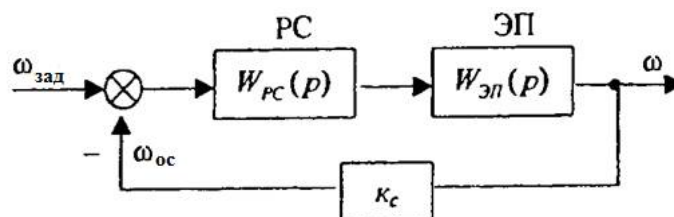
Так как по своим электромеханическим свойствам электродвигатели в схеме прямого включения в сеть не могут обеспечить регулирование скорости с требуемым качеством, возникает необходимость в преобразовании электрической энергии, подводимой к электродвигателю. Такое преобразование осуществляется с помощью полупроводниковых преобразователей. Изменяя параметры преобразованной электроэнергии (частоту, напряжение, длительность и форму импульсов и т.д.) можно получить требуемые механические и динамические характеристики.

Можно выделить два вида контуров регулирования, реализуемых в системах управления – внутренние и внешние.

Внутренние контуры служат для управления параметрами полупроводниковых преобразователей, входящих в состав автоматизированного электропривода (частота, напряжение). К внутренним контурам можно отнести регуляторы тока, ЭДС.

Внешние контуры определяют параметры движения привода, а именно скорость или положение рабочего органа. Внешние контуры, как правило, являются замкнутыми – имеют отрицательную обратную связь по регулируемому параметру.

Типовая структурная схема замкнутого контура регулирования скорости представлена на рисунке 1.8.

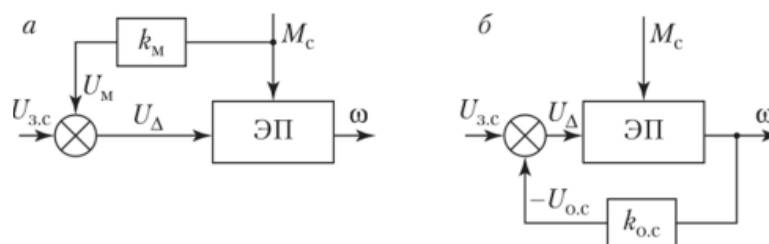


$\omega_{\text{зад}}$ – задание скорости; $\omega_{\text{ос}}$ – сигнал обратной связи по скорости; РС – регулятор скорости; K_c – коэффициент обратной связи по скорости; $W_{\text{ЭП}}(p)$ – передаточная функция электропривода с внутренним контуром регулирования.

Рисунок 1.8 - Типовая структурная схема контура регулирования скорости

В зависимости от наличия или отсутствия обратной связи различают два варианта построения систем управления электроприводом: разомкнутые и замкнутые. Замкнутые системы обеспечивают более качественное и точное регулирование. Разомкнутая структура при проектировании современных систем управления высоковольтным электроприводом в настоящее время практически не применяется.

Система регулирования может быть реализована по принципу отклонения контролируемой величины, либо по принципу компенсации внешнего воздействия (Рисунок 1.9 а, б).



а – по компенсации внешнего воздействия, б – по отклонению контролируемого параметра

Рисунок 1.9 – Принципы действия систем регулирования

Главным признаком систем управления, работающих по принципу компенсации, является наличие цепи, по которой в блок задания скорости вместе с задающим сигналом подается сигнал, содержащий информацию о внешних возмущающих воздействиях, влияющих на работу технологической системы, в которую включен электропривод.

Более распространенным являются замкнутые структуры, функционирующие по принципу отклонения контролируемого параметра. Такие системы характеризуются наличием обратной связи, передающей на сумматор сигнала о фактическом значении контролируемой величины (чаще всего - скорости вращения). По данному сигналу система осуществляет точную настройку путем изменения задающего сигнала до достижения контролируемой величиной требуемого значения. Обратная связь может быть организована не только по скорости вращения двигателя, но и по технологическим параметрам, например, по давлению газа на выходе ЭГПА.

Современные системы управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами выполняются по принципу замкнутых структур с обратной связью только по скорости вращения привода. В тоже время в соответствии с анализом, представленным в разделе 1.4, при проектировании систем управления необходимо обеспечить возможность учета воздействия на работу электропривода технологических и внешних параметров [22, 23, 24]. Целью данной работы является разработка структуры системы управления, позволяющей реализовать данный функционал.

1.5 Анализ систем электроснабжения электроприводных КС

Надежность электроснабжения является ключевым фактором обеспечения бесперебойной работы электроприводной компрессорной станции. В связи с этим существенное внимание должно уделяться системам электроснабжения и схемам питания электроприводных агрегатов.

На большинстве существующих электроприводных компрессорных станциях питание ЭГПА осуществляется напрямую от сети 10(6) кВ без использования преобразователей частоты (см. Рисунок 1.10).

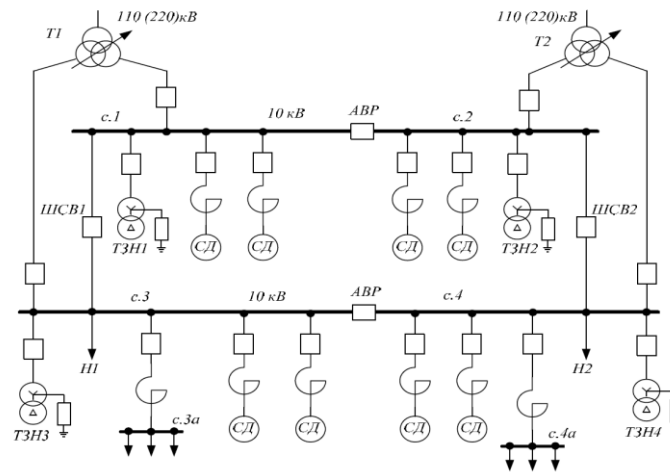


Рисунок 1.10 – Главная схема электроснабжения электроприводной компрессорной станции

Включение в схему питания преобразователей частоты расширяет выбор вариантов схем питания агрегатов. Возможна как установка индивидуального преобразователя частоты на каждый агрегат, так и использование меньшего количества преобразователей частоты для пуска и управления отдельными агрегатами по выбору. Подробный перечень вариантов схем электроснабжения групп ЭГПА с описанием приведен в разделе 4.2.

В результате анализа вариантов главных схем электроснабжения электроприводных КС в [47] была предложена схема электроснабжения с организацией дополнительных секций шин для питания агрегатов от преобразователей частоты, а также установка резервного преобразователя частоты, подключенного к обеим дополнительным секциям (см. Рисунок 1.11).

Схема на Рисунок 1.11 приведена для частного случая (компрессорная станция с определенным количеством агрегатов). Для каждого конкретного случая приведенная схема может видоизменяться в зависимости от необходимого количества частотно-регулируемых приводов, связанного с графиком производительности компрессорной станции и должно определяться на основании технико-экономического сравнения вариантов. Необходимость установки резервного преобразователя частоты также должна быть подтверждена технической необходимостью и экономической целесообразностью.

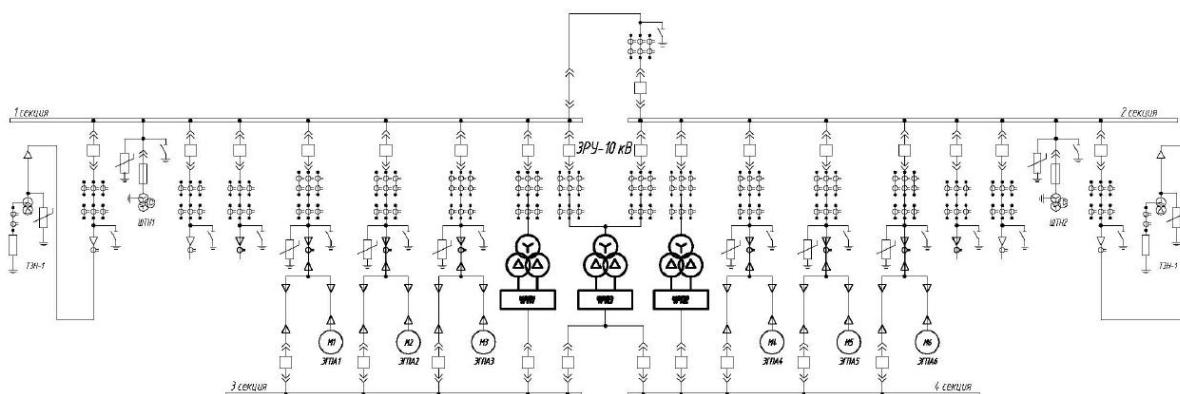


Рисунок 1.11 - Схема с двумя основными и одним резервным ПЧ с секциями шин частотного регулирования

Выводы к главе 1:

1) Электроприводные газоперекачивающие агрегаты составляют порядка 13% в парке агрегатов АО НК «КазМунайГаз». Текущее состояние большинства действующих ЭГПА не позволяет им надежно и эффективно функционировать. Основная часть установленных агрегатов работает за пределами паспортного срока службы и наработки.

2) В настоящее время при создании современных ЭГПА применяются технологии, позволяющие существенно повысить надежность и эффективность их работы. Одним из основных преимуществ нового поколения ЭГПА является возможность плавного пуска и точного регулирования благодаря использованию высоковольтных преобразователей частоты. Данное решение позволяет до 25% снизить расход электроэнергии, потребляемой агрегатом и продлить срок его службы.

3) Режимы работы компрессорной станции, параметры транспортируемого газа, а также внешние влияющие факторы оказывают существенное воздействие на режимы работы ЭГПА. Существующие на текущий момент системы автоматического регулирования электропривода агрегатов не позволяют учесть технологические и внешние воздействия в полной мере. Учет влияющих факторов позволит оптимизировать режим работы ЭГПА.

4) Бесперебойность работы электроприводных ГПА определяется надежностью системы электроснабжения. Перспектива применения частотно регулируемого привода увеличивает вариативность построения схем электроснабжения. Необходима разработка методики выбора схемы питания ЭГПА с учетом оптимального количества преобразователей частоты.

2 Разработка инвариантной системы автоматического регулирования и алгоритмов управления электроприводом ГПА

2.1 Формализация описания возмущений, действующих на электроприводной газоперекачивающий агрегат

Функционирование большинства ЭГПА предполагается в условиях, при которых скорость, момент нагрузки и многие технологические параметры значительно изменяются во времени, а не остаются постоянными, как предполагается упрощенно в простейших локальных приводах. Это обусловлено как технологическими факторами, так и внешними воздействиями, носящими случайный характер [83].

Согласно [32] на характеристики работы ЭГПА могут оказывать влияние следующие технологические и климатические факторы:

- объем перекачиваемого газа;
- давление на входе агрегата;
- температура газа на входе агрегата;
- температура наружного воздуха.

В первом варианте (Рисунок 2.1) при работе автоматизированного электропривода, взаимодействующего напрямую с объектом и воспринимающего возмущения стохастического или детерминированного характера, должны учитываться все изменения нагрузки и кинетической энергии в соответствии с законом управления [1,32].

Во втором варианте (Рисунок 2.2) сам электропривод не подвергается возмущениям, но для сохранения значений выходных характеристик на оптимальном уровне необходима автоматическая корректировка управляющих воздействий в рамках работы, комбинированной САР [44-32] с учетом всех внешних воздействий на объект.

В работе рассматривают основные технологические (производительность, давление и температура газа) и внешние (температура окружающего воздуха) факторы, которые не оказывают непосредственного влияния на электропривод. Следовательно, далее будем рассматривать электропривод с возмущениями второго рода.

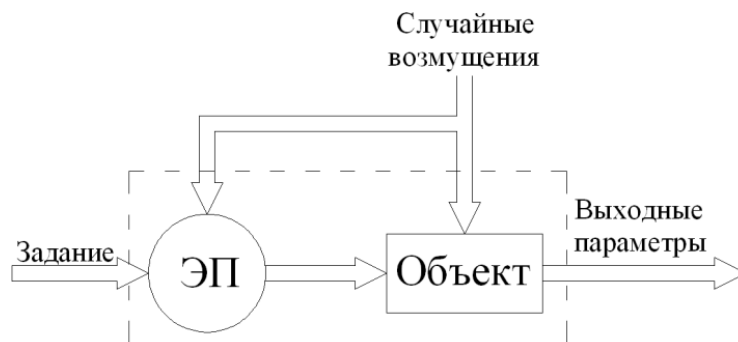


Рисунок 2.1 - АЭП с возмущениями 1-го рода

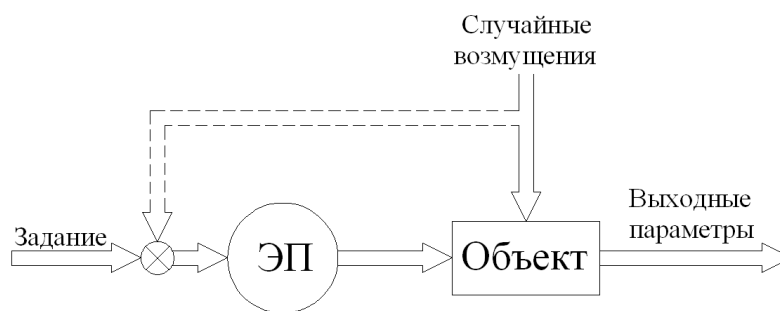


Рисунок 2.2 - АЭП с возмущениями 2-го рода

Совокупность всех факторов случайного характера, действующих на технологический процесс, определяет не только случайный характер нагрузки, потребляемой мощности и скорости электропривода ГПА, но и его КПД, коэффициент мощности [14]. Так как случайный режим работы не может быть достоверно описан традиционной детерминированной диаграммой, то для адекватного расчета параметров электропривода используются статистические методы планирования эксперимента, которые основаны на одновременной смене многих факторов [25, 27]. Применение статистических методов позволяет выделить влияние на изменение параметров процесса, как каждого фактора в отдельности, так, что самое главное, их совокупности.

В отсутствие прямого воздействия совокупности возмущений стохастического характера на механические и электрические органы электропривода (системы 2-го рода), целесообразным решением является учет всех влияющих возмущений в алгоритме системы управления автоматизированного электропривода. Для этого необходима математическая формализация описания возмущающих воздействий (например, методы регрессионного анализа) и их введение в закон управления электроприводом (пунктирная линия на Рисунок 2.2). Это позволит обеспечить соответствие задания скорости электропривода текущему состоянию технологического объекта и сделать систему управления инвариантной к набору возмущающих воздействий.

2.2 Построение замкнутой системы автоматического регулирования ЭГПА со стабилизацией давления газа на выходе при стохастических возмущениях

Как было показано в главе 1, замкнутая структура САР может быть реализована по принципу отклонения контролируемой величины, либо по принципу компенсации внешнего воздействия.

В системах, осуществляющих регулирования по отклонению, в общем случае абсолютная инвариантность является недостижимой, т.к. для систем с

такой структурой условия инвариантности вступают с условиями устойчивости работы (возможна лишь с точностью до некоторой величины ε).

В САР, осуществляющих регулирование по отклонению и регулирующих сразу несколько переменных, реализация абсолютной инвариантности возможна при наличии как минимум двух параллельных каналов для распространения одного и того же возмущения, относительно которого предполагается обеспечение инвариантности регулируемого параметра. Однако в данном классе систем инвариантность зачастую достижима не для всех возмущений, действующих на регулируемую координату, что определяет невозможность реализации условий абсолютной инвариантности. В тоже время, как показано в [76], инвариантности также можно добиться путем введения дополнительных связей по возмущению, реализовав систему как комбинированную систему автоматического регулирования.

Предлагаемая схема САР реализована с замкнутой комбинированной структурой. Такая структура совмещает в себе принципы регулирования, как по отклонению контролируемой величины, так и по компенсации внешнего воздействия, что позволяет добиться инвариантности регулируемого параметра относительно возмущающих воздействий.

Задача синтеза комбинированной системы при проектировании регулятора делится на две части. Первая задача заключается в обеспечении робастности и компенсации внешних возмущений. Данная задача решается с помощью расчета и параметрирования регулятора. Вторая задача состоит в обеспечении необходимой реакции на управляющее воздействие. Она решается с помощью расчета параметров задания по прямой связи [17].

В предлагаемой САР регулируемой переменной является скорость вращения электропривода, рассчитанная с помощью аппарата регрессионного анализа, с учетом всех возмущающих воздействий, действующих на ЭГПА (см. раздел 2.3). Обратная связь, примененная в схеме, используется для обеспечения максимальной точности регулирования.

Регулирование по обратной связи в схеме управления осуществляется при помощи регулятора, формирующего управляющий сигнал. Регулятор вырабатывает выходной сигнал, который противодействует отклонению величины контролируемого параметра от заданного значения в данный момент времени.

В общем случае регулятор формирует управляющий сигнал, который суммирует три составляющих: пропорциональную, интегрирующую и дифференцирующую. В зависимости от набора звеньев различают: П-регулятор, ПИ регулятор, ПД-регулятор и ПИД-регулятор (см. Рисунок 2.3).

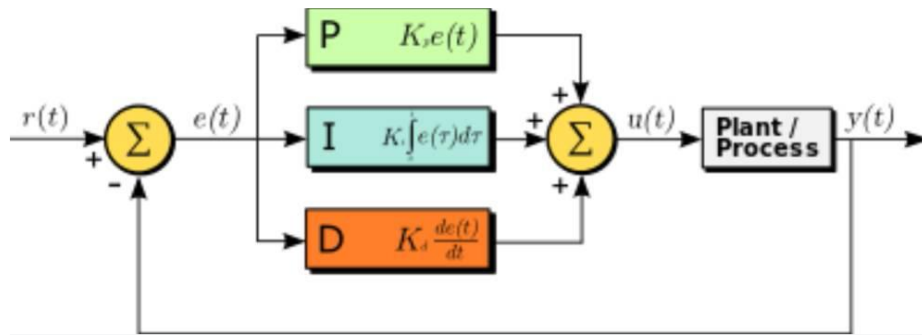


Рисунок 2.3 - Схема принципиальная ПИД-регулятора

Сигнал задания на входе технологической установки в общем случае определяется тремя составляющими регулятора, пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей:

$$u(t)=P+I+D=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(\tau) d\tau+K_d \frac{de}{dt} \quad (2.1)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора.

Пропорциональная составляющая выдает сигнал, противоположный отклонению контролируемому параметру (скорости вращения) от заданного значения. Его величина прямо пропорциональна этому отклонению. П-регулятор – это простейший вид регулятора, который имеет существенные недостатки.

При использовании только П-регулятора значение регулируемой величины не имеет возможности стабилизироваться на заданном значении. Причиной этому является статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

С увеличением коэффициента пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициента усиления), уменьшается статическая ошибка, но при высоких значениях коэффициента усиления при наличии запаздывания в системе могут начаться автоколебания. Это также может привести к потере устойчивости системы при дальнейшем увеличении коэффициента усиления.

Для устранения статической ошибки используем добавление интегрирующей составляющей, которая пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Ее использование позволяет ПИ регулятору со временем устранить статическую ошибку.

При отсутствии внешних возмущений, действующих на систему, контролируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей обнулится, и выходной сигнал будет полностью задаваться интегрирующей составляющей. Необходимо отметить, что интегрирующая составляющая при неправильном выборе её коэффициента усиления также может стать причиной автоколебаний.

Дифференцирующая составляющая предназначена для противодействия отклонениям от заданного значения, которые прогнозируются в будущем и пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины. Упомянутые отклонения могут быть обусловлены как внешними возмущениями, так и запаздыванием воздействия регулятора на систему.

ПИД-регулятор реализован в виде алгоритма в программном обеспечении системы регулирования.

Существует ряд методов определения параметров настройки ПИД-регуляторов: метод Зиглера-Никольса, метод CHR (Chien, Hrones и Reswick). Однако аналитический расчет параметров для настройки регулятора дает достаточно приблизительные значения, в связи с тем, что основывается на сильно упрощенных моделях объекта. Модели объекта кроме внутренних параметров зависят от большого количества внешних факторов и помех, воздействующих на объект. Описание моделей не учитывает присутствующую в подавляющем большинстве случаев нелинейность типа "ограничение" для управляющего воздействия, а также используют параметры, определенные с некоторой погрешностью. Таким образом, определение передаточной функции и параметров настройки ПИД-регулятора путем расчета требует значительных трудозатрат, в большинстве случаев не приводит к необходимым результатам и в конечном итоге все равно требует точной подстройки.

В связи с этим выбор параметров регулятора в рамках данной работы сразу осуществляется путем точной ручной настройки. Настройку можно выполнить на основе правил, полученных из теоретического анализа и эмпирического опыта:

- повышение пропорциональной составляющей увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- уменьшение постоянной интегрирования снижает запас устойчивости;
- ошибка регулирования с течением времени сокращается быстрее при уменьшении интегральной составляющей;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает быстродействие и запас устойчивости.

Целью настройки ПИД-регулятора является достижение требуемых критериев качества САР. Для той или иной задачи наиболее важными могут быть следующие критерии:

- форма отклика на сигнал уставки;
- форма отклика на внешнее возмущение (время установления, перерегулирование, коэффициент затухания и др.);
- форма отклика на шумы измерений;
- требования к экономии энергии в управляемой системе;
- робастность по отношению к разбросу параметров объекта управления;
- минимум шумов измерений и др.

Система регулирования скорости ЭГПА относится к системам управления технологическими процессами, в которых уставка как правило остается длительное время без изменений или меняется крайне медленно, таким образом в подобных системах требуется максимальное ослабление влияния внешних возмущений.

Для оценки качества регулирования в замкнутой системе с ПИД-регулятором обычно используют ступенчатое входное воздействие и ряд критериев для описания формы переходного процесса (Рисунок 2.4):

- максимум ошибки регулирования $e_{max} = \max_{0 < t < \infty} |e(t)|$ и момент времени T_{max} , при котором ошибка достигает этого максимума;
- интегрированная абсолютная ошибка $e_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$;
- интеграл от квадрата ошибки $e_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)^2| dt$;
- декремент затухания d - отношение первого максимума ко второму (Рисунок 2.4) (типичное значение $d = 4$ и более) $d = \frac{a}{b}$;
- статическая ошибка e_0 - постоянная ошибка в равновесном (установившемся, статическом) режиме системы;
- время установления T_v с заданной погрешностью e_s (время, по истечении которого погрешность регулирования не превышает заданного значения e_s). Обычно $e_s = 1\%$, реже - 2% , 5% . Соответственно, время установления обозначают $T_{0,01}$, $T_{0,02}$, $T_{0,05}$;
- перерегулирование e_{max} - превышение первого выброса над установившемся значением переменной. Как правило выражается в процентах от установившегося значения;
- время нарастания T_r - интервал времени, в течение которого выходная переменная нарастает от 10% до 90% от своего установившегося значения;
- период затухающих колебаний T_v . Так как, фактически, затухающие колебания не являются периодическими, здесь под периодом понимается расстояние между двумя соседними максимумами переходной характеристики.

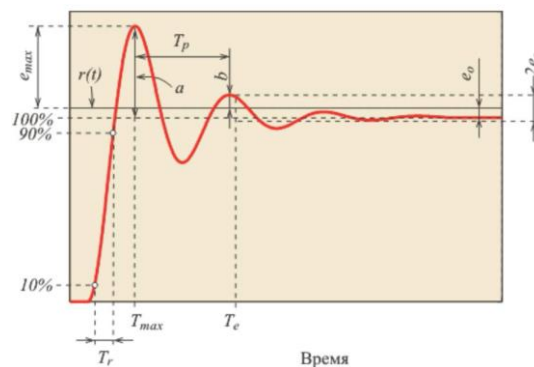


Рисунок 2.4 - Критерии качества регулирования

Важным критерием качества САР является ее устойчивость [49]. Устойчивость САР с ПИД-регулятором характеризуется способностью системы возвращаться к слежению за сигналом задания скорости после прекращения внешних воздействий. Под внешними воздействиями здесь понимаются не только внешние возмущения, действующие на сам исследуемый объект, но любые возмущения, действующие на любую часть замкнутой системы, в том числе шумы измерений, шумы квантования и дискретизации, шумы и погрешность вычислений, временная нестабильность сигнала задания. Все эти возмущения вызывают отклонения системы от положения равновесия. В случае если после прекращения воздействия происходит возвращение системы в положение равновесия, то она считается устойчивой. При анализе устойчивости САР с ПИД-регуляторами как правило ограничиваются исследованием реакции системы на ступенчатое изменение задающего сигнала, шум измерений и внешние возмущения. Потеря устойчивости обычно проявляется как неограниченное возрастание контролируемой переменной объекта, или как ее колебание с нарастающей амплитудой.

Как было указано в разделе 2.1, система управления электроприводом ЭГПА должна учитывать возмущения второго рода, а именно действующие на технологический объект и не действующие напрямую на электропривод.

Угловая скорость вращения электродвигателя ЭГПА задается в условиях одновременного случайного изменения всех технологических и внешних параметров, влияющих на работу агрегата. Для достижения требуемой скорости привода ЭГПА и, как следствие, производительности и выходных параметров газа необходимо:

- получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков в цикле с требуемой дискретностью;
- вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения электродвигателя ЭГПА $\omega_{\text{зад}}$ по аналитическим регрессионным алгоритмам;
- скорректировать $\omega_{\text{зад}}$ с учетом стабилизирующего действия обратной связи по величине выходной скорости электропривода.

Предлагаемая структура комбинированной системы автоматического регулирования (САР) скорости вращения электропривода ГПА со стабилизацией давления на выходе [53,55], которая позволяет реализовать требуемый алгоритм управления, приведена на Рисунок 2.5.

Объектом автоматизации обобщенной системы управления является электроприводной ГПА, на вход которого поступает природный газ. За счет политропной работы сжатия газа, выполняемой компрессором агрегата (компримирования) происходит повышение давления газа.

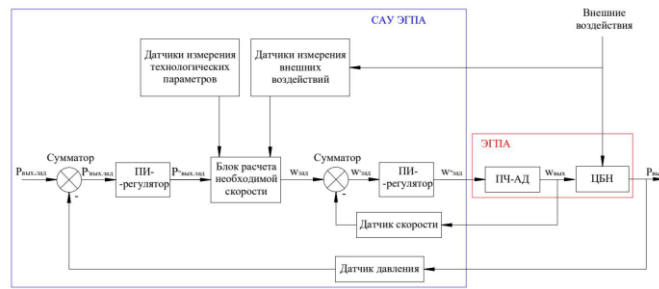


Рисунок 2.5 - Структурная схема замкнутой комбинированной САР скорости ЭГПА со стабилизацией выходного давления

Вращательное движение нагнетателя газоперекачивающего агрегата обеспечивает электродвигатель с устройством регулирования частоты вращения (преобразователь частоты). Для расчета скорости вращения привода (частоты) применен специальный блок, на вход которого поступают сигналы значений с датчиков измерения внешних воздействий (температура окружающего воздуха), а также сигналы задания технологических параметров (производительность ЭГПА, давления газа на входе и выходе, температура газа). В блоке расчета необходимой скорости реализуется регрессионный алгоритм расчета скорости вращения привода ЭГПА (см. раздел 2.3). Сигнал $\omega_{зад}$ с выхода блока расчета скорости вращения поступает на сумматор, где происходит корректировка сигналом с датчика фактической скорости. Сигнал $\omega'_{зад}$ с сумматора поступает на ПИД-регулятор, который формирует выходной сигнал $\omega''_{зад}$. Газоперекачивающий агрегат, вращаемый электроприводом с требуемой скоростью, создает необходимое выходное давление газа $P_{вых}$. Давление на выходе агрегата поддерживается на заданном значении $P_{зад}$ с помощью обратной связи с датчика давления $P_{вых}$ и установленного в цепи задания давления ПИД-регулятора.

Центробежный нагнетатель является вентиляторной нагрузкой. Согласно [41], при снижении скорости вращения привода, статический момент нагрузки снижается примерно в пропорционально квадрату величины снижения. В связи с этим, при снижении скорости вращения привода ниже номинальной отсутствует необходимость поддерживать критический момент двигателя равным номинальному, в этом случае целесообразно поддерживать постоянным соотношение статического и максимального момента АД: $M_c / M_k = const$. Это можно осуществить, если напряжение питания двигателя регулировать в соответствии с формулой М.П. Костенко:

$$U_{1*} = f_{1*} \times \sqrt{M_{c*}}, \quad (2.2)$$

где M_{c*} - относительный статический момент при данной частоте (скорости), $M_{c*} = M_c / M_n$.

Для привода центробежного нагнетателя при снижении скорости в два раза статический момент снижается в четыре раза. В таком случае при снижении частоты величину напряжения можно уменьшать в квадратичной

зависимости, что приведет к сокращению потерь в обмотке статора и магнитопроводе машины. В системе управления электроприводом канал регулирования величины напряжения реализован на программном уровне в блоке ШИМ (см. главу 3).

2.3 Получение и анализ многофакторного регрессионного уравнения управления ЧРП ЭГПА на примере реального объекта

Реальное регрессионное уравнение составляется на основании ретроспективных данных по конкретному газоперекачивающему агрегату. В рамках данной работы для расчетов используются статистические данные о работе ЭГПА реальной компрессорной станции мощностью 4 МВт. Количество срезов данных равняется 100. Данные являются абсолютно репрезентативными, приведены для широкого диапазона изменения всех параметров в течение календарного года. Таблицы значений технологических параметров приведены в приложении 2.

Основными технологическими и внешними параметрами, влияющими на требуемую величину частоты вращения электропривода ω (рад./с.), являются:

- Q_n – производительность объемная, отнесенная к начальным условиям;
- $P_{вх}$ – давление газа на входе ЭГПА;
- $P_{вых}$ – давление газа на выходе ЭГПА;
- $T_{вх}$ – температура газа на входе ЭГПА;
- $T_{вых}$ – температура газа на выходе ЭГПА;
- T_n – температура наружного воздуха.

Также есть ряд неучтенных факторов, связанных с состоянием труб, оборудования и внешними влияниями на процесс.

Отбор факторов, которые войдут в уравнение множественной линейной регрессии осуществляется путем оценки взаимной корреляции.

Корреляционный анализ факторов проводится на основе оценки коэффициентов парной корреляции Пирсона.

Расчет выполняется на основании данных из таблицы значений технологических параметров, приведенных в приложении 2.

В качестве примера рассчитаем корреляцию для пары производительность/давление на входе ЭГПА. Исходные данные и элементы расчета приведены в таблице 2.1 (таблица служит для демонстрации подхода и приведена в сокращенном виде).

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета коэффициентов парной корреляции

Номер среза данных	Производительность объемная, отнесенная к нач. условиям, Qн, м3/мин (X)	Давление на входе ЭГПА, Pвх, МПа (Y)	Отклонение производительности от среднего значения (dx)	Отклонение давления на входе от среднего значения (dy)	dx ²	dy ²	dx ² * dy ²
1	206	4,03	17,5	1,8	306,3	3,1	30,7
2	198	3,92	9,5	0,7	90,3	0,4	6,2
3	216	3,78	27,5	-0,7	756,3	0,6	-20,5
4	197	3,85	8,5	0,0	72,3	0,0	-0,4
...
99	174	3,33	14,5	-5,2	210,3	27,5	76,1
100	157	3,91	31,5	0,6	992,3	0,3	-17,4
Сумма	18850	385,47			136391	237,4	-94,8
Сред. знач.	188,5	3,85					

Рассчитаем парную корреляцию по выражению (2.30) с учетом элементов расчета из таблицы 2.1: d_x^2

$$r_{xy} = \frac{\sum dx dy}{\sqrt{\sum dx^2 \sum dy^2}} = \frac{-94,8}{\sqrt{136391 \times 327,4}} = 0,017 \quad (2.3)$$

Аналогичным образом рассчитываются взаимные корреляции для всех возможных пар факторов. Результаты оценки парной корреляции факторов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Коэффициенты частной корреляции

	Qн	Pвх	Pвых	Tвх	Tвых
Давление на входе ЭГПА, Pвх, МПа	-0,017	-	-	-	-
Давление на выходе ЭГПА, Pвых, МПа	0,026	0,695	-	-	-
Температура газа на входе ЭГПА, Tвх, °С	0,193	-0,007	0,287	-	-
Температура газа на выходе ЭГПА, Tвых, °С	0,223	-0,118	0,450	0,899	-
Температура наружного воздуха, Tн, °С	0,198	-0,249	0,069	0,535	0,480

Для оценки силы взаимной корреляции применяются следующие общепринятые диапазоны значений коэффициента парной корреляции:

- $0 < |r_{xy}| \leq 0,29$ – слабая связь (зеленый цвет в таблице 2.2);
- $0,3 < |r_{xy}| \leq 0,69$ – средняя связь (желтый цвет в таблице 2.2);
- $0,7 < |r_{xy}| \leq 1,0$ – тесная связь (красный цвет в таблице 2.2).

Так как факторы температур на входе и выходе ЭГПА являются сильно коррелированными (коэф. корреляции $> 0,7$), необходимо исключить один из факторов из регрессионного уравнения. Исключим фактор $T_{вх}$, так как регрессионное уравнение с его участием дает худшие показатели.

Несмотря на то, что ряд других факторов также имеют среднюю корреляцию, они не исключаются, так как их исключение приводит к существенному ухудшению точности регрессионного уравнения.

Одним из важнейших требований регрессионного анализа является обязательная нормальность распределения наблюдаемых случайных величин. Оценка нормальности распределения проводится по критерию Шапиро-Уилка, как одного из самых эффективных критериев. Данный критерий основан на отношении оптимальной линейной несмещенной оценки дисперсии к ее обычной оценке методом максимального правдоподобия.

Выводы к главе 2:

1) Описание возмущений (технологические и внешние) может быть формализовано путем учета в алгоритмах систем автоматического регулирования электроприводов газоперекачивающих агрегатов. Вследствие случайного характера возмущений наилучшим способом формализации является использование регрессионного анализа для определения оптимальных параметров работы ЭГПА с учетом действующих влияющих факторов.

2) Предложена структура замкнутой комбинированной системы автоматического регулирования скорости электропривода газоперекачивающего агрегата, совмещающая в себе принципы регулирования, как по отклонению контролируемой величины, так и по компенсации внешнего воздействия, что позволяет добиться инвариантности регулируемого параметра относительно возмущающих воздействий. Предложенная САР имеет в своем составе блок расчета требуемой скорости, использующий регрессионный алгоритм расчета.

3) Дано теоретическое обоснование получения алгоритмов управления ЭГПА на основе регрессионных уравнений. Рассмотрено три способа определения математической модели системы автоматического регулирования. Выполнен отбор переменных регрессионного уравнения на основании корреляционного анализа.

4) Выполнен синтез линейного и нелинейного регрессионных уравнений на основании данных работы реальной компрессорной станции. Результаты прогнозирования на основании линейного регрессионного уравнения характеризуются средней ошибкой аппроксимации равной 0,75%. Выбранное в качестве базового линейное регрессионное уравнение, прошло все этапы статистического оценивания и может быть признано адекватным. Предложенное уравнение можно использовать как вычислительную основу

алгоритма, позволяющего определить оптимальную скорость вращения электродвигателя в различных режимах работы с учетом всех технологических и климатических факторов.

3 Экспериментальное обоснование применимости разработанных инвариантной системы автоматического регулирования и алгоритмов управления электроприводом ГПА

3.1 Выбор структуры построения преобразователя частоты

Наиболее распространенным типом преобразователей частоты являются преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В ПЧ данного типа напряжение питающей трехфазной сети переменного тока подается через выпрямитель и фильтр на инвертор. Напряжение с требуемой частотой на выходе преобразователя формируется инвертором, управляемым микропроцессорной системой управления.

В общем виде функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока представлена на Рисунок 3.1.

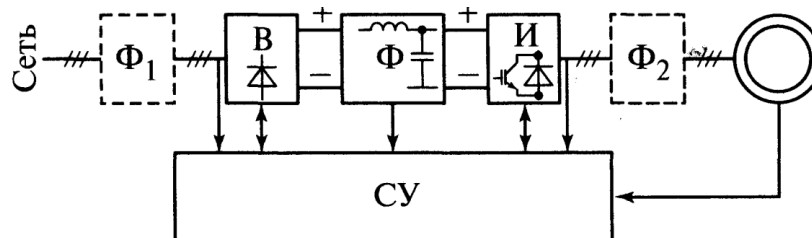


Рис 3.1 – Функциональная схема ПЧ со звеном постоянного тока

На представленной схеме: Φ_1 , Φ_2 , Φ – фильтры; В выпрямитель; И – инвертор; СУ – система управления.

Основными преимуществами преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока являются, которые можно использовать в схеме питания электропривода ГПА:

- получение на выходе ПЧ широкого диапазона частот, вне зависимости от частоты питающей сети;
- относительно простые силовые схемы и системы управления преобразователями частоты;
- возможность реализации различных алгоритмов управления со сравнительно небольшим числом элементов в структуре ПЧ.
- К недостаткам относятся:
 - двойное преобразование электрической энергии и, как следствие, увеличение потерь энергии;
 - увеличение массогабаритных характеристик ПЧ.

В схеме преобразователя частоты возможно использование, как неуправляемого выпрямителя переменного тока, так и выпрямителя с возможностью управления. Согласно [37] использование управляемого выпрямителя позволяет равномерно распределить потери между полупроводниковыми приборами ПЧ при помощи управления контуром протекания нулевого тока, благодаря чему становятся возможными более

высокие номинальные мощности ПЧ, а также частоты переключения силовых ключей. В тоже время, применение управляемого выпрямителя требует разработки дополнительных систем управления выпрямителем. В связи с тем, что разработка подобных систем не входит в задачи настоящей работы, в схеме ПЧ используем неуправляемый выпрямитель.

Для преобразователей частоты большой мощности применяются 6-, 12- или 18- пульсные сетевые выпрямители, выполненные на диодах. Такие характеристики позволяют ограничить 5 и 7 либо также 11 и 13 гармоники в высшем спектре. Использование 24- пульсных схем выпрямления практически полностью решает проблему электромагнитной совместимости частотно-регулируемого привода с питающей сетью. В моделируемом преобразователе частоты используем 12-пульсный выпрямитель, т.к. согласно [47] он в целом не уступает 24-пульсному по КПД, но в имеет в два раза меньшие массогабаритные характеристики и стоимость.

Схемы построения инверторов для питания высоковольтных асинхронных двигателей отличаются от схем для низковольтных АД. Согласно [2] Использование специальных схем высоковольтных инверторов продиктовано следующими факторами, связанными с увеличением мощности и напряжения:

1) Удельная стоимость присутствующих на рынке высоковольтных полупроводниковых устройств существенно превышает удельную стоимость низковольтных.

2) Увеличение напряжения инвертора, использующего широтно импульсную модуляцию ведет к росту производных напряжения по времени в инверторе. Это влияет на требование к изоляции АД, ведет к росту межвитковых емкостных токов, требует применения дорогих выходных фильтров и ограничивает возможную протяженность кабеля от ПЧ до нагрузки.

3) Значительное снижение надежности схемы соединения ключей: последовательное соединение ключей для увеличения рабочего напряжения устройства является неэффективным, ввиду того, что даже при небольшом разбросе параметров один из ключей будет закрываться и открываться быстрее чем другой, это приведет к ситуации, когда в моменты коммутаций в статическом режиме вместо положенных двух в стойке останется один ключ на полное напряжение.

Одной из наиболее распространенных схем построения высоковольтных инверторов является схема трехуровневого инвертора [37].

Особенность многоуровневой структуры силовой части ПЧ состоит в разделении напряжения на конденсаторах в звене постоянного тока. Благодаря этому величина коммутируемого напряжения уменьшается вдвое, а также улучшается форма выходного напряжения, что в свою очередь позволяет применить выходной фильтр меньшей мощности [5]. В результате такого подхода построения структуры инвертора происходит формирование в виде прямоугольной «решетки» импульсов высокой крутизны двуполярного выходного напряжения, которая определяется частотой переключения

ключей. В связи с этим все АИН, выполненные по многоуровневой структуре, обязательно должны оборудоваться синусоидальным фильтром на выходе, для того, чтобы исключить повреждение изоляции статора АД импульсами напряжения, у которых значение du/dt является высоким (скорости нарастания) [36,69].

Наиболее широкое распространение получили трехуровневые инверторы с фиксированной точкой (Neutral-Point Clamped — NPC) в виду простоты силовой части АИН со сравнительно малым числом полупроводниковых устройств в составе выпрямителя и инвертора [77]. Структуры АИН с NPC для получения больше трех уровней выходного напряжения широко не используются в связи с неравномерностью загрузки силовых элементов схемы и более высокими потерями. При таком решении соединенные последовательно запирающие диоды, служащие для блокировки высокого напряжения, являются причиной больших потерь проводимости.

Отличительной особенностью трехуровневого АИН над двухуровневым является возможность получения трех уровней напряжения $+udc/2$, 0 или $-udc/2$ за счет наличия средней точки. Использование трехуровневого АИН позволяет более эффективно использовать полупроводниковые силовые элементы, в связи с этим является возможным использование полупроводников, рассчитанных на меньшее номинальное напряжение. Это дает возможность сократить затраты на инвертор за счет снижения стоимости полупроводниковых элементов. В дополнение трехуровневые инверторы обладают большим КПД чем двухуровневые АИН. Выходной сигнал содержит в себе меньше неосновных гармоник - это дает возможность уменьшить размеры фильтров.

Средняя точка источника питания может быть подключена к средней точке конденсаторов на входе. В ряде случаев применяется схема, когда выпрямитель построен по схеме без фиксации средней точки. В таком случае, конденсаторы остаются в «подвешенном» состоянии. Для такого варианта построения схемы инвертора в системе управления реализуется контроль за перекосом напряжения на конденсаторах [78].

В работе применяем трехфазный трехуровневый автономный инвертор напряжения, с фиксированной нейтральной точкой, схема которого изображена на Рисунок 3.2.

В основе структуры трехуровневого АИН лежит трехфазная мостовая схема, состоящая из: двенадцати управляемых ключей, выполненных на IGBT-транзисторах VT1- VT12, двенадцати обратных диодах VD1- VD12, шести фиксированных диодов VDc1- VDc6, а также двух емкостей в звене постоянного тока Cdc1, Cdc2, через которые ток может протекать из нулевой линии в нагрузку или из нагрузки в нулевую линию.

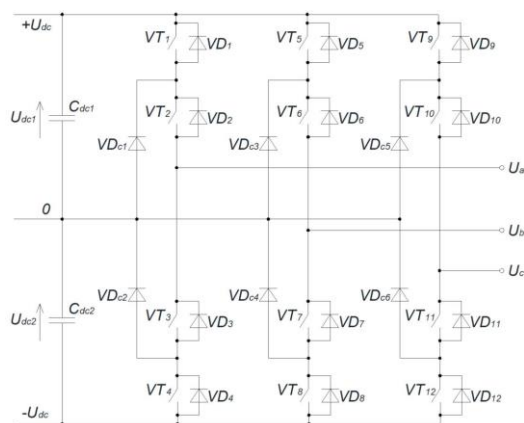


Рис 3.2 – Схема трехфазного трехуровневого АИН с фиксированной нейтральной точкой

Преобразователь делится на 3 стойки, относящиеся к соответствующим фазам трехфазной сети. Каждая стойка состоит из четырех силовых ключей, четырех обратных диодов и двух диодов, подключенных к фиксированной точке.

К средним точкам каждой стойки между двумя верхними и двумя нижними ключами подключается нагрузка. Точки между нижними и верхними ключами присоединяются к средней точке источника питания через диоды.

3.2 Разработка алгоритма управления ПЧ на базе векторной широтно-импульсной модуляции

Выбор вида широтно-импульсной модуляции. До конца прошлого столетия наиболее распространенным методом управления ПЧ, являлась синусоидальная ШИМ. Данный вид ШИМ основан на изменении управляющих скважностей ключей инвертора по синусоидальному закону. В настоящее время он мало применяется ввиду наличия существенного недостатка, который связан с малоэффективным использованием напряжения звена постоянного тока ПЧ. При данном виде ШИМ разность потенциалов фаз, для напряжения с максимальной амплитудой, изменяется от 75 до 86,6 % напряжения звена постоянного тока. Таким образом недостаток метода управления состоит в том, что разность потенциалов фаз всегда меньше напряжения звена постоянного тока, а значит, запас напряжения звена постоянного тока используется не полностью. Эту проблему возможно решить с помощью векторной широтно-импульсной модуляции [2].

Векторная ШИМ обладает следующими особенностями:

1) Как было сказано выше, векторная ШИМ по максимуму использует запас напряжения звена постоянного тока (на 15 % больше, чем при синусоидальной ШИМ), при этом форма выходного тока относительно синусоидальной ШИМ искажается незначительно.

2) Влияние «мертвого» времени, а также отсутствие переключений в одной из стоек инвертора вносит несимметричность в выходное напряжение, и форма тока двигателя имеет немного ухудшенный гармонический состав, чем в случае синусоидальной ШИМ. Проявление влияния «мертвого» времени особенно ощутимо на небольших скоростях, в случае, когда напряжение инвертора гораздо меньше номинального. ЭГПА по условиям эксплуатации не работает на низких скоростях (менее 70% от номинальной), таким образом, влияние «мертвого» времени в нашем случае будет незначительным.

Принимая во внимания все перечисленные особенности, для в работе будет реализован принцип векторной ШИМ.

Алгоритм формирования сигналов управления ключами инвертора с помощью векторной ШИМ представлен в виде блок-схемы на Рисунок 3.3.

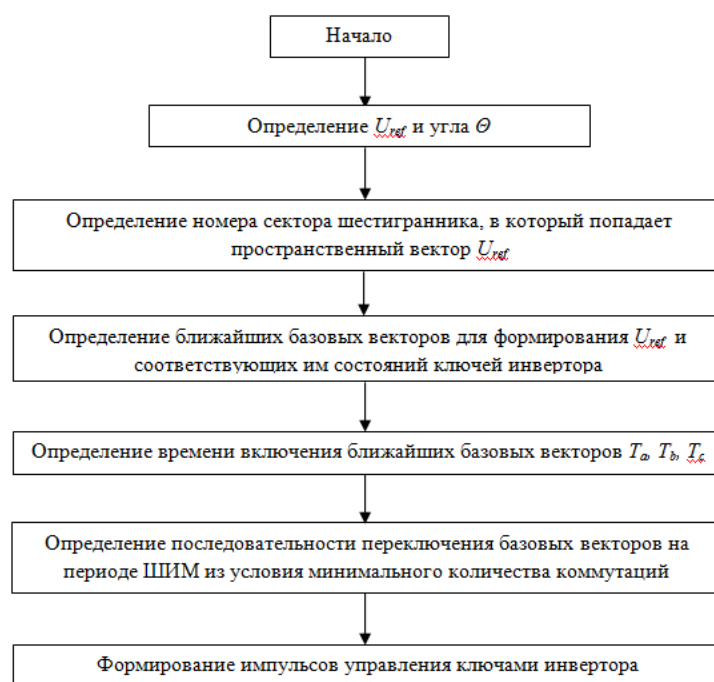


Рисунок 3.3. Блок-схема алгоритма формирования сигналов управления ключами инвертора с помощью векторной ШИМ

Согласно [70] выбор оптимального варианта последовательности включения базовых векторов производится с учетом следующих требований:

- минимизации числа переключений силовых ключей АИН за период модуляции;
- минимизации пульсаций фазного тока нагрузки и потерь, обусловленных дискретностью работы инвертора;
- ограничение по минимуму интервалов между очередными переключениями ключей;
- использование по максимуму нагрузочной способности ключей по напряжению;
- симметричное управление фазами инвертора.

Представленные требования в большей части противоречат друг другу, в связи с чем необходимо сделать выбор в пользу одного из критериев, который и определит последовательность включения базовых векторов. В настоящей работе за основной прием энергетический критерий, который отражает потери в инверторе и напрямую связан с количеством переключений силовых ключей на периоде ШИМ.

3.3 Компьютерное моделирование ЭГПА с системой автоматического регулирования скорости вращения

В отсутствие возможности проведения эксперимента на реальном технологическом оборудовании, для выполнения качественной и количественной оценки предлагаемых технических решений до изготовления опытных промышленных образцов и внедрения системы в промышленную эксплуатацию, целесообразным является построение имитационной компьютерной модели.

В данном разделе производится компьютерное моделирование основных узлов ЭГПА с частотно-регулируемым приводом. Основные характеристики ЭГПА перечислены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические параметры ЭГПА

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Номинальное напряжение на входе	В	10 000
Производительность объемная, отнесенная к начальным условиям 20°С и 0,1013 МПа	млн м ³ /сут	12,5
Степень сжатия	о.е.	1,26
КПД привода в номинальном режиме	о.е.	0,92
Мощность привода механическая номинальная	кВт	4 000
Частота вращения номинальная	об/мин	8 200
Диапазон рабочих частот вращения, % от номинальной	%	от 70 до 105

В виду того что основными целями данной работы является разработка структуры и алгоритма системы управления системы ПЧ-АД и, учитывая тот факт, что экспериментальные данные для определения регрессионного алгоритма работы получены на основании исследования режимов и параметров работы ЭГПА, находящегося в эксплуатации, целесообразно моделирование структуры и элементов агрегата вести максимально приближено к реальным характеристикам.

Компьютерное моделирование выполняется на основе математического описания и алгоритма работы предмета моделирования. Для создания модели используется пакет MatLAB Simulink [79,67].

Разработанная компьютерная модель ЭГПА с частотно регулируемым приводом представлена на Рисунок 3.4 (модель системы управления показана отдельно на Рисунок 3.5).

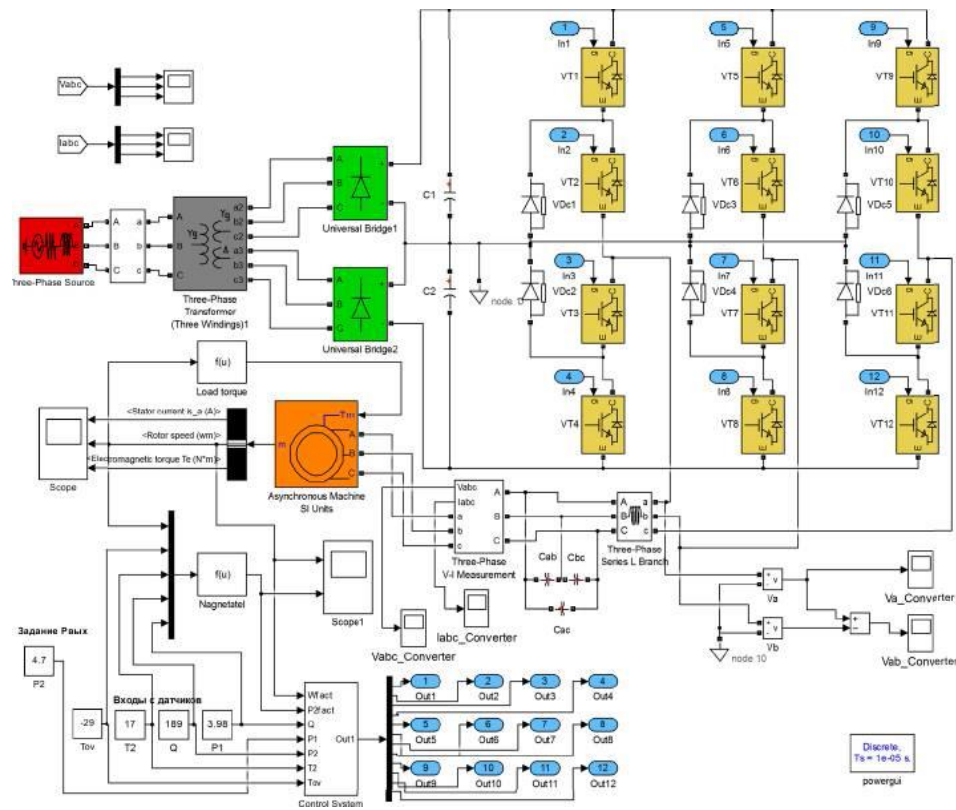


Рисунок 3.4 - Имитационная компьютерная модель ЭГПА в среде Matlab

Модель состоит из следующих основных элементов:

- центробежный нагнетатель в виде функции MatLab, основанной на аналитической взаимосвязи технологических параметров процесса компримирования газа;
- трехфазный источник напряжения, моделирующий промышленную трехфазную сеть напряжением 10 кВ и частотой 50 Гц (блок Simulink – Three-Phase Source);
- высокоскоростной трехфазный высоковольтный асинхронный электродвигатель (блок Simulink – Asynchronous Machine);
- силовой трехобмоточный трансформатор (блок Simulink – Three-Phase Transformer (Three windings));
- выпрямитель, выполненный на 2-х диодных мостах с 6 диодами в каждом (блок Simulink – Universal Bridge);
- трехфазный трехуровневый автономный инвертор напряжения, с фиксированной нейтральной точкой (проектируемый блок Simulink);
- фильтр на выходе ПЧ (блок Simulink – Three-phase RLC-Branch);
- система управления (проектируемый блок Simulink - Control System);
- блоки измерения основных параметров (блоки Simulink – Three-Phase V-I Measurement, Va, Vb);

– блоки вывода основных параметров (блок Simulink – Scope).

Моделирование центробежного нагнетателя. В связи с тем, что изучение технологических процессов компримирования газа не входит в объем данного исследования, компьютерное моделирование работы центробежного нагнетателя осуществляется не на основании математической модели и технических параметров нагнетателя, а в виде аналитического уравнения, составленного на основании регрессионного анализа. Имеющиеся в распоряжении автора данные о работе реального ЭГПА, использованные в главе 2 для составления регрессионного уравнения зависимости скорости от влияющих факторов, станут основой для аналогичного уравнения зависимости давления на выходе ЦБН $P_{\text{вых}}$ (контролируемый параметр) от технологических и внешних факторов. Предлагаемый подход позволит максимально точно учесть зависимость контролируемого параметра от всех влияющих факторов, которые были отобраны для регрессионного анализа ранее в главе 2.

В результате регрессионного анализа, уравнение зависимости производительности ЭГПА от технологических и внешних факторов имеет вид:

$$P_{\text{вых}} = -0,04Q + 0,024\omega - 1,257P_{\text{вх}} - 0,04T_{\text{вых}} + 0,04T_{\text{н}} - 20,1 \quad (3.1)$$

Моделирование электрической сети. Для имитации промышленной сети трехфазного напряжения применен типовой блок библиотеки SimPowerSystem – Three-Phase Source. Для программирования блока использованы исходные параметры электрической сети, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Параметры электрической сети

Параметр	Ед. изм.	Значение
Действующее значение линейного напряжения	В	10000
Частота	Гц	50
Мощность к.з. в точке подключения	МВА	300

Моделирование высоковольтного высокоскоростного асинхронного электродвигателя. В качестве прототипа для моделирования выбираем примененный на реальной КС высоковольтный высокоскоростной асинхронный электродвигатель 1TA 2832-4AU01-Z, производства компании Siemens.

В качестве основы для моделирования асинхронного электродвигателя применяется стандартный блок библиотеки SimPowerSystem – Asynchronous Machine. Параметры асинхронного высокоскоростного электродвигателя указаны в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Параметры высокоскоростного асинхронного двигателя 1ТА 2832-4AU01-Z

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Номинальное напряжение питания	В	3300
Мощность электродвигателя номинальная	кВт	4000
Мощность максимальная длительная	кВт	4200
Номинальная скорость вращения	об/мин	8200
КПД номинальный	о.е.	0,958
Коэффициент мощности номинальный	о.е.	0,75
Момент номинальный	Н·м	4658
Ток номинальный	А	970
Максимальный длительный ток	А	1008
Момент инерции ротора	кг·м ²	48
Масса	кг	15500

Нагрузка двигателя имитируется в виде момента сопротивления, который в силу вентиляторного характера нагрузки (центробежный нагнетатель газа) пропорционален квадрату скорости вращения двигателя $M_c \sim \omega^2$.

Моделирование преобразователя частоты. Согласно решений раздела 3.1, в работе преобразователь частоты со звеном постоянного тока, который будет состоять из неуправляемого 12-пульсного выпрямителя, звена постоянного тока с двумя конденсаторами и трехуровневого автономного инвертора напряжения, с фиксированной нейтральной точкой.

Трансформатор, входящий в 12-пульсный выпрямитель, имеет две вторичные обмотки: одну — с соединением звездой, другую — треугольником. Каждая из указанных обмоток питает свой трехфазный диодный мост. Благодаря этому, на входе трехфазных мостов имеется две трехфазные системы линейных напряжений, сдвинутые друг относительно друга на 30° , что позволяет реализовать 12 пульсное выпрямление за период.

Выпрямитель выполнен на основании стандартных блоков библиотеки SimPowerSystem: для трехобмоточного силового трансформатора - Three-Phase Transformer (Three Windings), для непосредственно звена выпрямления тока, выполненного на 2-х диодных мостах с 6 диодами в каждом - блок Simulink – Universal Bridge. Согласно решений раздела 3.1, в работе преобразователь частоты со звеном постоянного тока, который будет состоять из неуправляемого 12-пульсного выпрямителя, звена постоянного тока с двумя конденсаторами и трехуровневого автономного инвертора напряжения, с фиксированной нейтральной точкой.

Трансформатор, входящий в 12-пульсный выпрямитель, имеет две вторичные обмотки: одну — с соединением звездой, другую — треугольником. Каждая из указанных обмоток питает свой трехфазный диодный мост. Благодаря этому, на входе трехфазных мостов имеется две

трехфазные системы линейных напряжений, сдвинутые друг относительно друга на 30°, что позволяет реализовать 12 пульсное выпрямление за период.

Выпрямитель выполнен на основании стандартных блоков библиотеки SimPowerSystem: для трехобмоточного силового трансформатора - Three-Phase Transformer (Three Windings), для непосредственно звена выпрямления тока, выполненного на 2-х диодных мостах с 6 диодами в каждом - блок Simulink – Universal Bridge.

Параметры моделируемого трехобмоточного трехфазного трансформатора указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Параметры согласующих трансформаторов

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Номинальная мощность	кВА	6300
Номинальное напряжение первичной обмотки	В	10000 (с возможностью регулирования $\pm 2 \times 2,5\%$)
Номинальные напряжения вторичных обмоток	В	1700
Напряжение КЗ	%	7

Моделирование системы управления. В качестве основы для моделирования системы управления принята схема системы автоматического регулирования скорости ЭГПА со стабилизацией давления на выходе с комбинированной структурой, разработанная в разделе 2 (Рисунок 2.5) с добавлением блока реализации алгоритма векторной широтно-импульсной модуляцией (раздел 3.3).

Модель системы управления, выполненная в пакете MatLAB Simulink изображена на Рисунок 3.13 (является неотъемлемой частью схемы на Рисунок 3.12 – блок Control system).

Модель системы управления имеет замкнутую структуру с двумя контурами обратной связи – по скорости (вход 1) и по давлению на выходе ЭГПА (вход 2).

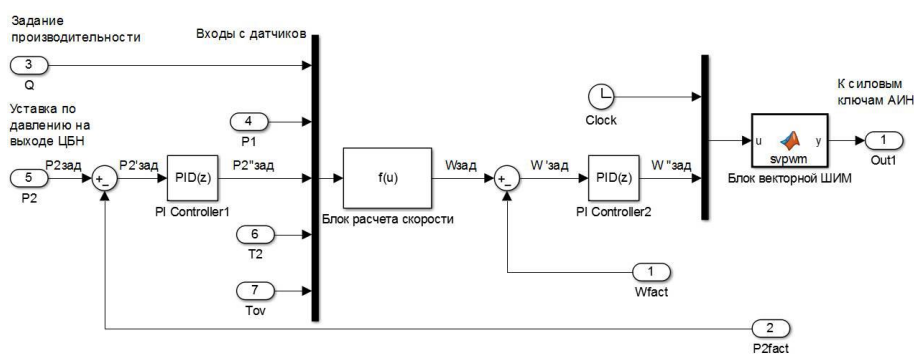


Рисунок 3.3 - Модель системы автоматического регулирования скорости ЭГПА со стабилизацией давления на выходе (см. совместно с Рисунок 3.2)

Модель системы управления имеет замкнутую структуру с двумя контурами обратной связи – по скорости (вход 1) и по давлению на выходе ЭГПА (вход 2).

Контролируемым параметром является давление на выходе ЭГПА, которое задается подачей сигнала $P2_{\text{зад}}$ на вход 5. Сигнал задания требуемого давления на выходе корректируется по сигналу обратной связи $P2_{\text{факт}}$ (вход 2) с моделируемого нагнетателя. В контуре контроля давления установлен ПИД-регулятор. В качестве ПИД-регулятора применен стандартный блок MatLAB Simulink – PID Controller. Как указывалось в разделе 2.2, выбор параметров регулятора осуществляется путем тонкой ручной настройки. В результате были определены следующие настройки для ПИД регулятора: пропорциональная составляющая - 2; интегрирующая составляющая – 0,8; дифференцирующая составляющая – 0.

Технологические и внешние факторы (Объемная производительность Q , давление на входе ЭГПА – P_1 , температура на выходе ЭГПА – T_2 и температура окружающей среды – $T_{\text{ов}}$) задаются сигналами на соответствующих входах 3, 4, 6 и 7. Основным параметром, задающим скорость вращения является объемная производительность агрегата Q . Для целей моделирования задание входных переменных осуществляется по таблицам с режимами работы действующего ЭГПА, в реальных условиях сигналы поступают с соответствующих измерительных приборов.

В системе управления электроприводом канал регулирования величины напряжения реализован на программном уровне в блоке ШИМ. При снижении частоты питающего напряжения относительно номинального, величина напряжения уменьшается пропорционально квадрату изменения частоты.

В Блоке расчета скорости (блока MatLAB Simulink – Fcn) выполняется расчет задания скорости по регрессионному уравнению, определенному в разделе 2:

$$\omega = 1,065Q - 334,75P_{\text{вх}} + 262,1P_{\text{вых}} + 1,62T_{\text{вых}} - 0,16T_{\text{н}} + 565 \quad (3.2)$$

Точное регулирование скорости осуществляется за счет реализации схемы с замкнутой структурой и введения в схему ПИД-регулятора (PID Controller2). В качестве ПИД-регулятора применен стандартный блок MatLAB Simulink – PID Controller. Как указывалось в разделе 2.2, выбор параметров регулятора осуществляется путем тонкой ручной настройки. В результате были определены следующие настройки для ПИД-регулятора: пропорциональная составляющая - 2; интегрирующая составляющая – 0,6; дифференцирующая составляющая – 0.

С выхода ПИД-регулятора сигнал задания скорости $w''_{\text{зад}}$ подается в качестве задающего на вход Блока векторной ШИМ. Блок векторной ШИМ построен на базе блока Matlab Function. Основу блока составляет алгоритм реализации векторной ШИМ (см. раздел 3.2), представленный в виде программного кода, написанного на стандартном внутреннем языке MatLab.

Поступающий на вход Блок векторной ШИМ сигнал задания скорости $w''_{\text{зад}}$ программным путем преобразуется в сигнал задания скорости вращения задающего вектора, определяющего частоту выходного напряжения инвертора.

С Блока векторной ШИМ согласно алгоритму ШИМ подаются сигналы управления ключами трехуровневого автономного инвертора напряжения (вых. 1), показанного на общей схеме компьютерной модели ЭГПА.

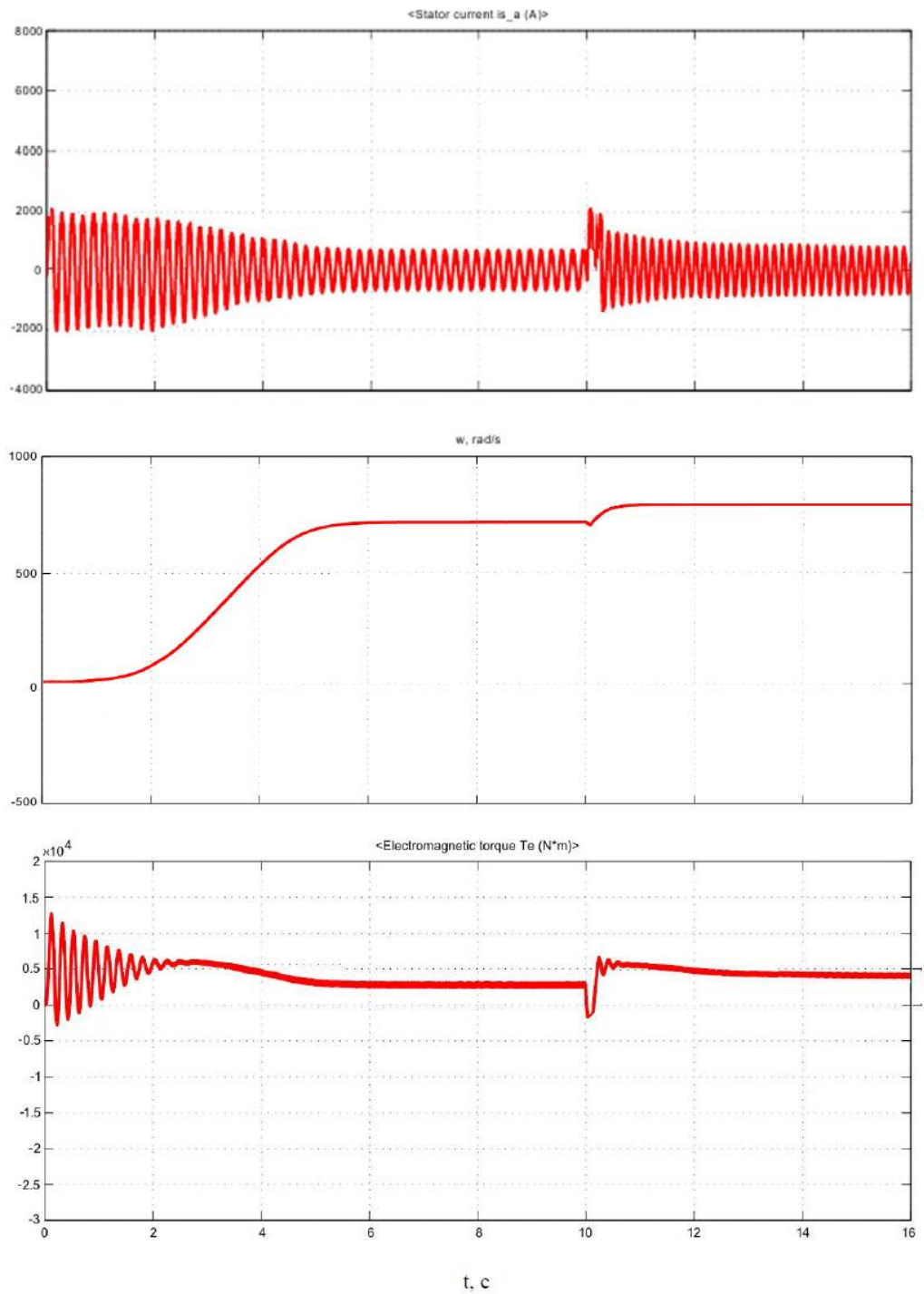
3.4 Анализ результатов моделирования

В результате моделирования получены динамические характеристики системы ПЧ ЭГПА, а именно изменения тока статора, скорости вращения электродвигателя привода ЭГПА и электромагнитного момента при пуске, разгоне до заданной скорости вращения, набросе нагрузки, а также при регулировании скорости вращения (рис 3.4). Регулирование скорости осуществлено с помощью разработанной САР путем задания плавного изменения объемной производительности ЭГПА.

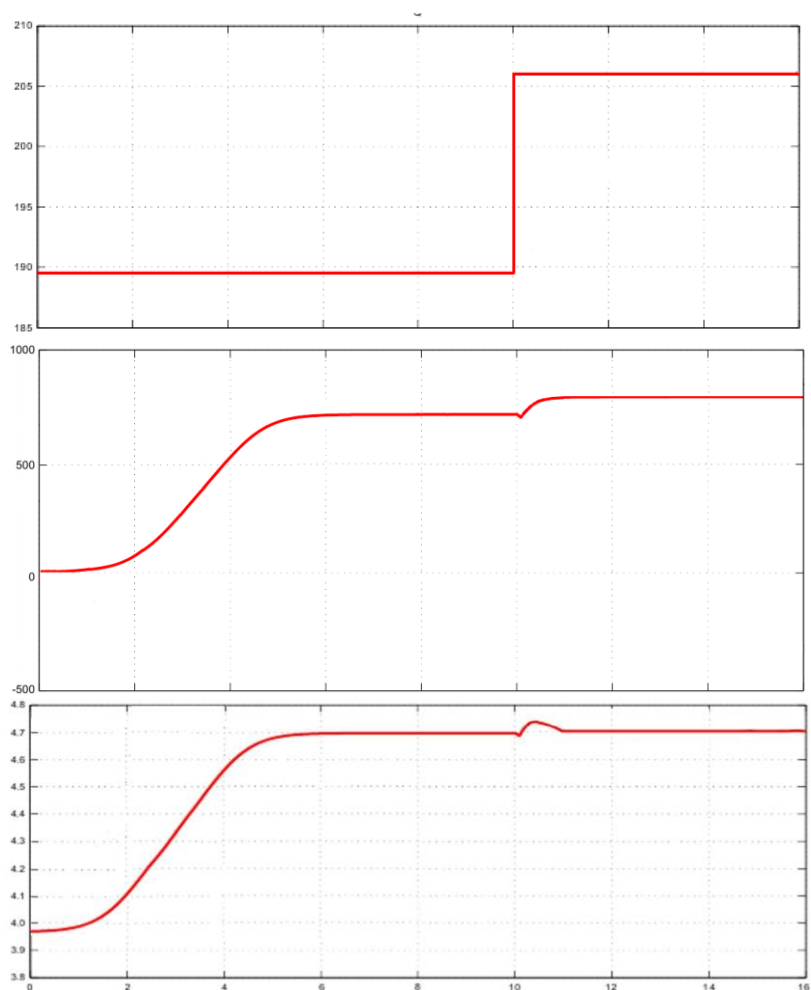
На графиках (Рисунок 3.4) показан момент пуска двигателя и набор скорости. Благодаря использованию ПИД-регулятора набор скорости происходит плавно, без существенных колебаний и скачков, перерегулирование отсутствует. Примерно через 5с можно наблюдать стабилизацию скорости и давления на выходе ЦБН в соответствии с заданным значением при начальных параметрах.

В момент времени 10с происходит изменение объемной производительности ЭГПА, графики изменения показаны на Рисунок 3.5.

В момент изменения объемной производительности ЭГПА, система автоматического регулирования, используя регрессионный алгоритм, пересчитывает задание по скорости электропривода и выдает новое значение на контроллер формирования ШИМ. На графиках можно наблюдать постепенный рост скорости привода ЭГПА, некоторые колебания тока статора и электромагнитного момента. Благодаря наличию ПИД-регулятора изменения обрабатываются точно, без значительных колебаний по току и скорости. В итоге скорость устанавливается на новом значении. Давления на выходе ЦБН после изменения производительности немного колеблется, но через 0,75с, стабилизируется на первоначально заданном значении.



1 – ток статора, А; 2 – скорость АД, рад/с; 3 – электромагнитный момент, Н·м
 Рисунок 3.4 - Результаты моделирования запуска и регулирования скорости привода ЭГПА



1 – сигнал задания объемной производительности, м³/мин; 2 – скорость АД, рад/с, 3-
давление газа на выходе ЦБН, МПа

Рисунок 3.5 - Результаты моделирования регулирования скорости двигателя привода ЭГПА со стабилизацией давления на выходе по изменяющимся влияющим факторам

Полученные графики показывают хорошие результаты отработки задающего сигнала. На Рисунок 3.6 показаны сравнение графика скорости, полученного в результате отработки САР в компьютерной модели и графика, полученного на основании расчета по регрессионному алгоритму. Для возможности корректного сопоставления сравнение показано для участков установившихся значений и изменения технологических параметров.

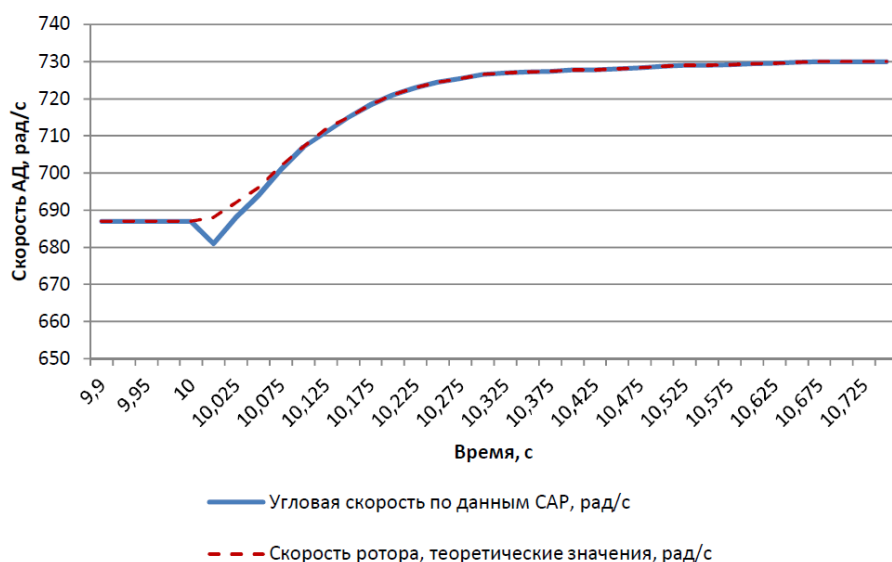


Рисунок 3.6 - Результаты обработки САР при регулировании скорости

Количественные значения критериев качества регулирования скорости во временной области, полученные в результате сопоставления теоретических значений и реальных значений, полученных на действующем ЭГПА, приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Значения критериев качества САР

П/п	Наименование критерия	Значение
1	Максимум ошибки регулирования e_{\max}	1,03%
2	Интегрированная абсолютная ошибка e_{IAE}	2,2%
3	Интеграл от квадрата ошибки e_{IAE}	0,015%
4	Декремент затухания d	отсутствует
5	Статическая ошибка e_0	отсутствует
6	Время установления $T_{0,02}$	0,7с
7	Перерегулирование e_{\max}	отсутствует
8	Время нарастания T_r	0,7с
9	Период затухающих колебаний T_0	отсутствует

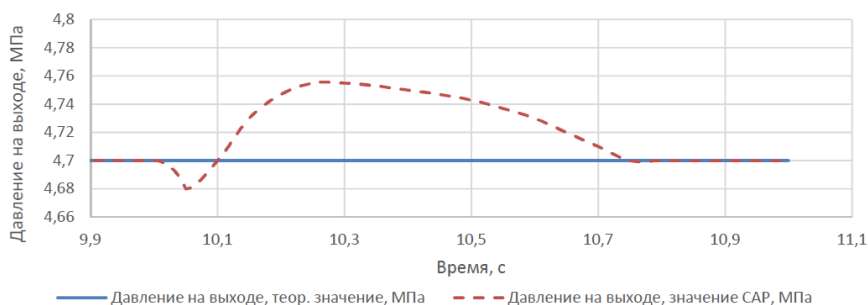


Рисунок 3.7 - Результаты обработки САР при регулировании давления на выходе

В результате проектирования ПЧ и синтеза алгоритма ШИМ необходимо обеспечение соответствия показателей качества электроэнергии питающей сети на входе ПЧ [89], без применения дополнительных фильтров. Гармонический состав тока и напряжения питающей сети и на выходе ПЧ определяем с помощью функции FFT Analysis MatLab. Результаты анализа приведены на рис 3.18-3.23.

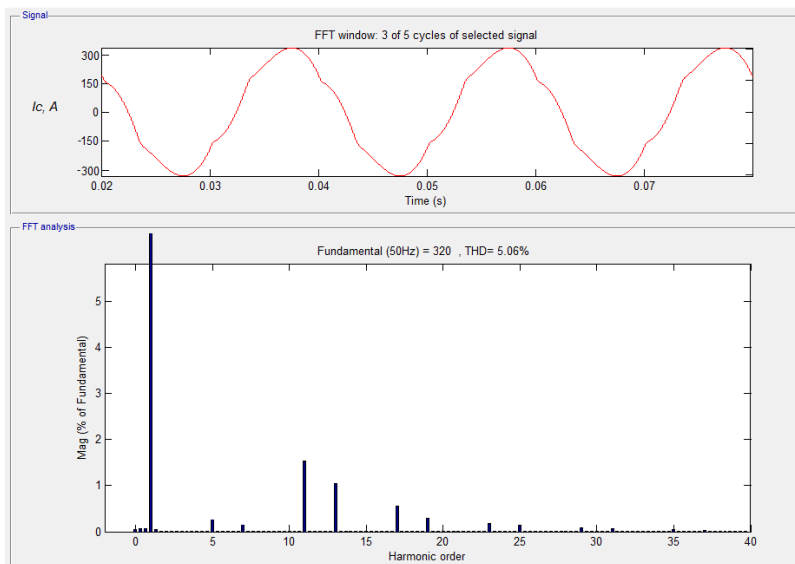


Рисунок 3.8 - Гармонический анализ тока питающей сети

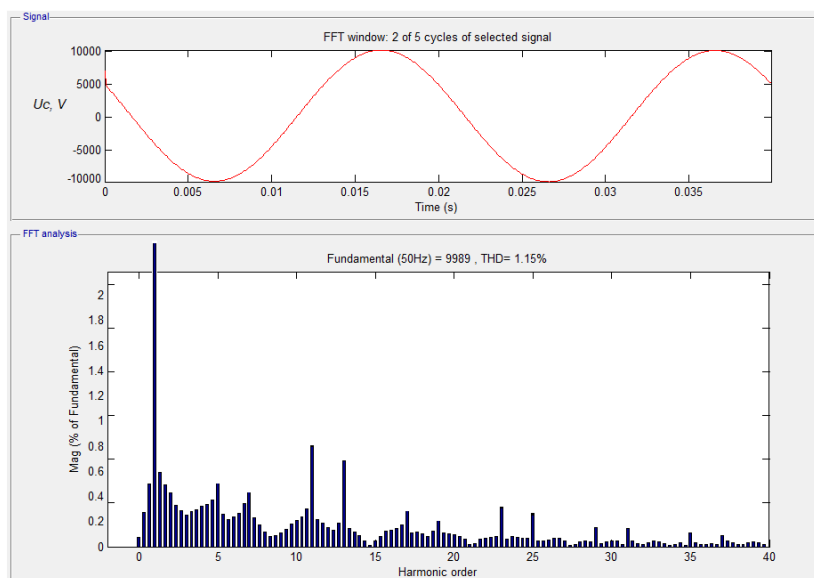


Рисунок 3.9 - Гармонический анализ напряжения питающей сети

Коэффициент гармонических искажений тока питающей сети в статическом режиме без применения фильтров составляет 6,06%, что не превышает требуемое согласно [90] значение для питания ПЧ, равное 10%.

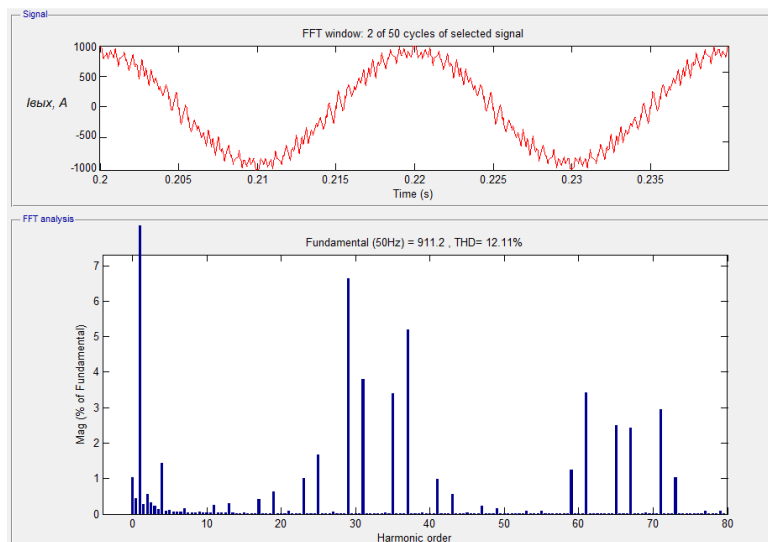


Рисунок 3.10 - Гармонический анализ тока на выходе ПЧ

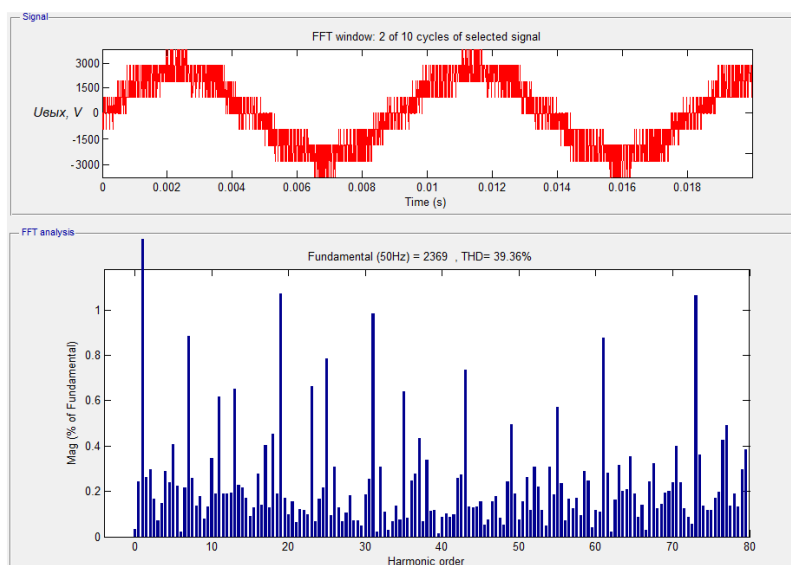


Рисунок 3.11 - Гармонический анализ фазного напряжения на выходе ПЧ

Коэффициент гармонических искажений выходного напряжения ПЧ в статическом режиме составляет без применения фильтров 39,36%, что превышает требуемое значение, регламентированное [89], которое составляет 5%.

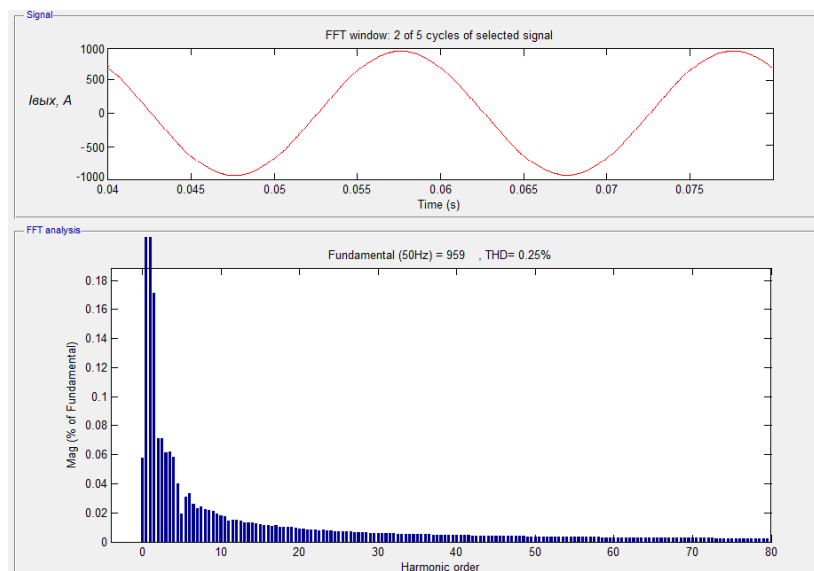


Рисунок 3.12 - Гармонический анализ тока на выходе ПЧ с применением синус-фильтра

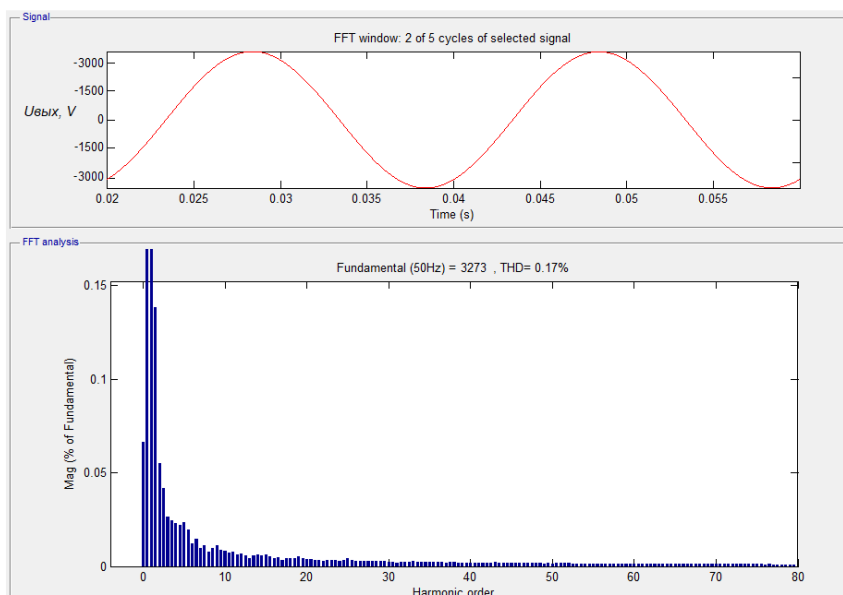


Рисунок 3.13 - Гармонический анализ фазного напряжения на выходе ПЧ с применением синус-фильтра

При применении синус-фильтра можно значительно улучшить гармонический состав выходных тока и напряжения (Рисунок 3.22, 3.23). Параметры фильтра определены исходя из резонансной частоты 500 Гц и составляют $C=0,1$ мФ, $L=4$ мГн.

Полученный в итоге суммарный коэффициент гармонических искажений выходного напряжения ПЧ в статическом режиме с использованием LC фильтра составляет 0,17%, что не превышает требуемый порог в 5%.

Выводы к главе 3:

1) Разработан алгоритм векторной ШИМ для трехфазного трехуровневого автономного инвертора напряжения, обеспечивающий минимальное количество переключений ключей. Указанный алгоритм применен при разработке компьютерной модели и реализован в виде программного кода, написанного на стандартном встроенном языке Matlab.

2) В пакете ПО MatLab Simulink разработана компьютерная модель системы ПЧ-АД, включающую модель комбинированной САР с регрессионным алгоритмом задания требуемой скорости и стабилизацией давления на выходе ЭГПА, предложенные в главе 2. Разработанная модель позволяет с высокой точностью имитировать процессы в системе ПЧ-АД.

3) Результаты моделирования показали, что предложенная структура САР, основанная на принципе комбинированного управления, позволяет добиться высокой точности регулирования скорости вращения привода ЭГПА (интеграл квадрата ошибки 0,015%) и выходного давления (интеграл квадрата ошибки 0,098%), а также сохранять устойчивость при запуске, наборе скорости, в режиме установившейся скорости и при регулировании по изменяющимся технологическим и внешним параметрам.

4) Использование 3-уровневого инвертора напряжения с предложенной векторной ШИМ позволяет достичь значения коэффициента гармонических искажений выходного напряжения ПЧ в статическом режиме с использованием синус фильтра составляет 0,17%, что не превышает требуемый порог в 5%.

4 Технико-экономические аспекты практического применения систем автоматического регулирования ЭГПА

4.1 Применения систем автоматического регулирования для управления группой ЭГПА на КС

В предыдущих главах были выработаны решения по регулированию единичного ЭГПА. Практическое применение данных решений может быть осуществлено при разработке системы задания оптимального режима одновременной работы нескольких газоперекачивающих агрегатов, характерного для большинства компрессорных станций. Оптимальные режимы работы группы агрегатов возможно реализовать только при условии использования частотно регулируемых ЭГПА с представленной в предыдущих главах системой автоматического регулирования. Однако возникает необходимость оценки оптимального количества преобразователей частоты для регулирования приводов в схеме электроснабжения ЭГПА.

Целью данной главы является разработка методики, позволяющей определить оптимальную с точки зрения экономической эффективности схему электроснабжения электроприводной КС с учетом ее режимов работы, которая может быть реализована с наименьшими капитальными затратами и в тоже время обеспечивающая реализацию наиболее энергоэффективных режимов совместной работы группы ЭГПА на компрессорной станции.

При совместной работе группы ЭГПА существуют различные варианты распределения нагрузки между агрегатами. Нагрузка может быть распределена поровну, либо отличаться для каждого из работающих агрегатов. Равномерное распределение нагрузки характерно для ЭГПА без частотного регулирования. При наличии возможности частотного регулирования целесообразно обеспечивать оптимизацию режимов групповой работы ЭГПА за счет неравномерной загрузки агрегатов. С помощью оптимизации режимов групповой работы ЭГПА возможно добиться максимального совокупного КПД группы работающих агрегатов, а, следовательно, наибольшей энергоэффективности перекачки газа.

При изменении нагрузки на ЭГПА без регулирования скорости вращения его КПД существенно снижается (Рисунок 4.1, кривая «ЭГПА без ЧРП»). Загрузку ЭГПА без регулирования скорости вращения необходимо выполнять как можно более близкой к номинальному значению.

При регулировании скорости вращения при помощи преобразователя частоты КПД сохраняется на высоком уровне практически на всем диапазоне регулирования (Рисунок 4.1, кривая «ЭГПА с ЧРП»).

Как можно видеть из Рисунок 4.1, с помощью регулирования частоты можно добиться существенной экономии электроэнергии, тем не менее, использование индивидуального преобразователя частоты в схеме питания каждого ЭГПА представляется избыточным. Принимая во внимание высокую стоимость высоковольтных преобразователей частоты и трансформаторов,

возникает необходимость оценки их оптимального количества в схеме электроснабжения электропривода.

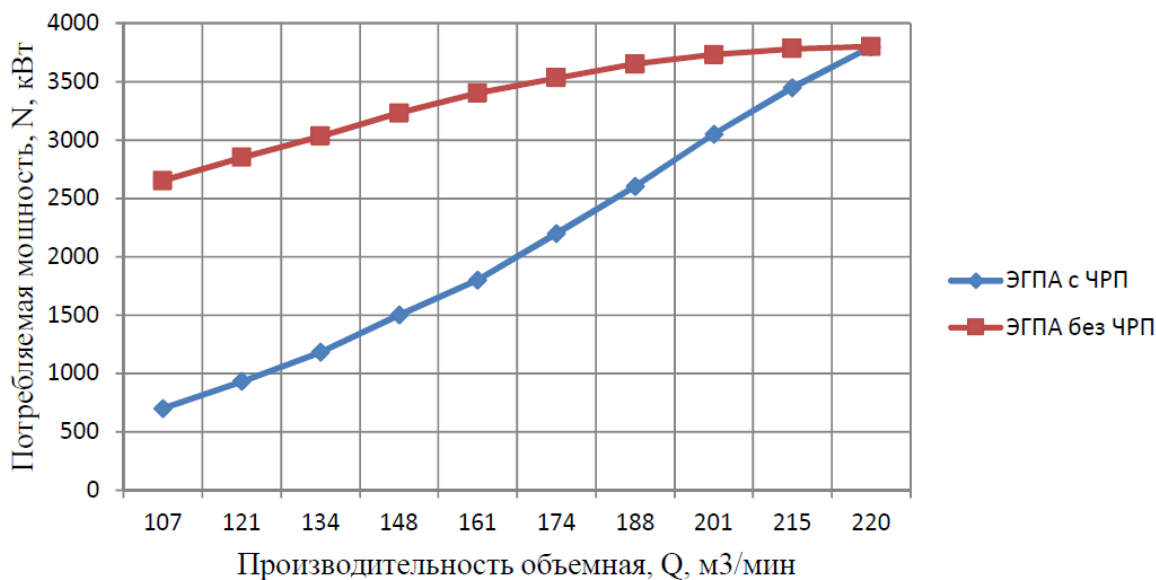


Рисунок 4.1 – Зависимость потребления эл./эн. от производительности ЭГПА

Как можно видеть из Рисунок 4.1, с помощью регулирования частоты можно добиться существенной экономии электроэнергии, тем не менее, использование индивидуального преобразователя частоты в схеме питания каждого ЭГПА представляется избыточным. Принимая во внимание высокую стоимость высоковольтных преобразователей частоты и трансформаторов, возникает необходимость оценки их оптимального количества в схеме электроснабжения электропривода.

В зависимости от графика нагрузки компрессорной станции возможно определить, сколько агрегатов будет работать постоянно в номинальном режиме и не потребуют регулирования скорости, и сколько агрегатов будет работать в режиме, отличном от номинального, и исходя из этого, рассчитать необходимое количество преобразователей частоты.

Также необходимо определить целесообразность установки резервных преобразователей частоты, которые будут использоваться в случае выхода из строя или планового ремонта рабочих преобразователей частоты.

Предлагаемая методика основана на принципах технико-экономического сравнения вариантов и позволяет определить экономически эффективное количество преобразователей частоты для электроприводов газоперекачивающих агрегатов и на основании результатов расчетов сконфигурировать главную схему электроснабжения электроприводной компрессорных станциях.

Алгоритм выбора наиболее экономически эффективной схемы электроснабжения ЭГПА на компрессорных станциях основан на последовательности действий, представленной на Рисунок 4.2.



Рисунок 4.2 - Алгоритм выбора оптимальной схемы электроснабжения ЭГПА на КС

Исходные данные необходимые для расчета экономически эффективного количества преобразователей частоты и включают в себя: режимы работы КС, характеристики основного оборудования, стоимостные показатели основного оборудования, стоимость строительно-монтажных и пуско-наладочных работ, стоимость технического обслуживания и ремонтов основного оборудования, тарифы на электроэнергию и т.д.

Источниками исходных данных являются: эксплуатационные данные, информация заводов-изготовителей, данные по объектам аналогам и т.д.

Определение экономически эффективного количества рабочих и резервных преобразователей частоты осуществляется на основании технико-

экономического сравнения вариантов (см. п. 4.4). Выбранное количество преобразователей частоты является основным показателем, влияющим на конфигурацию схемы электроснабжения.

Схема электроснабжения составляется на основании расчета экономически эффективного количества рабочих и резервных преобразователей частоты с учетом перечня потребителей электроэнергии и основных особенностей построения схем электроснабжения электроприводных КС.

4.2 Варианты построения схем электроснабжения ЭГПА при различном количестве ЧРП

Для питания электроприводных газоперекачивающих агрегатов, устанавливаемых в 60-80-е гг. прошлого века применялась схема с прямым подключением агрегатов к сети (Рисунок 4.3). Как было показано выше применение такого включения не позволяет регулировать скорость вращения привода агрегата и достигать оптимальных энергетических показателей работы. Кроме того, за счет высоких пусковых токов снижается ресурс двигателей.

В последнее время широкое распространение получили частотно-регулируемые приводы. Использование преобразователей частоты для регулирования скорости вращения агрегатов позволяет реализовать энергоэффективные режимы работы электроприводной компрессорной станции, что ведет к существенному сокращению расхода электроэнергии.

Как было показано выше, ввиду того, что на компрессорной станции всегда есть резервные газоперекачивающие агрегаты, а также то, что при номинальной нагрузке компрессорной станции, часть агрегатов можно использовать с номинальной нагрузкой, то необходимость точной регулировки производительности всех агрегатов отсутствует. При этом производится расчет экономически целесообразного количества преобразователей частоты, используемых для регулирования электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

Для возможности работы любого агрегата с частотно регулируемым приводом целесообразно рассчитанное количество преобразователей частоты распределить поровну между секциями шин РУ-10 (6) кВ. При этом будет обеспечиваться энергоэффективное регулирование скорости вращения определенного количества агрегатов на каждую секцию, в то время как остальные агрегаты будут работать с номинальной частотой вращения от питающей сети.

Возможность подключения преобразователя частоты к каждому агрегату обеспечивает реализацию плавного пуска всех агрегатов каждой секции шин. Плавный пуск агрегатов позволит избежать недопустимых бросков пускового тока, просадки напряжения питающей сети, а, следовательно, повысить надежность и безотказность работы энергетического

оборудования и увеличить ресурс ЭГПА. После плавного пуска все агрегаты кроме одного переходят на питание напрямую от сети 50Гц. [47]

В зависимости от общего количества газоперекачивающих агрегатов, а также от количества частотно-регулируемых приводов агрегатов, конфигурация схемы может иметь 5 вариантов построения.

Вариант 1. Наиболее экономичной с точки зрения капитальных затрат является схема без использования преобразователей частоты (Рисунок 4.3). Однако данная схема не позволяет реализовать энергоэффективные алгоритмы управления группой ЭГПА. Все агрегаты, введенные в работу по условиям режима перекачки газа, загружены равномерно и питаются напрямую от присоединений РУ-10 кВ.

Вариант 2. При небольшом количестве газоперекачивающих агрегатов, а также в случае незначительных диапазонах регулирования, для обеспечения реализации энергоэффективных режимов регулирования может использоваться схема с одним преобразователем частоты (Рисунок 4.4).

При этом от установленного преобразователя частоты может быть запитан любой из агрегатов обеих секций. От данного преобразователя частоты осуществляется плавный пуск всех агрегатов при их последовательном запуске.

Вариант 3. Для обеспечения реализации энергоэффективных режимов регулирования может использоваться схема с двумя преобразователями частоты, по одному на каждую секцию (Рисунок 4.5). Данная схема позволяет реализовать регулирования производительности компрессорной станции в большем диапазоне, чем схема варианта 2, при приемлемом уровне увеличения капитальных затрат.

При этом от установленного преобразователя частоты для каждой секции может быть запитан любой из агрегатов данной секции. От каждого преобразователя частоты осуществляется плавный пуск всех агрегатов конкретной секции при их последовательном запуске.

Вариант 4. Для обеспечения реализации энергоэффективных режимов регулирования может использоваться схема с тремя преобразователями частоты, по одному на каждую секцию и один общий резервный (Рисунок 4.6). Такое решение позволяет без потери диапазона регулирования выводить в ремонт и на техническое обслуживание любой из преобразователей частоты и на это время использовать общий резервный. Также схема обеспечивает надежность регулирования при аварийном выходе из строя одного из преобразователей.

Алгоритм работы и пуска аналогичен схеме варианта 3.

Вариант 5. Схема подразумевает частотное регулирование привода каждого из подключаемых агрегатов (Рисунок 4.7). Каждый агрегат пускается и регулируется с помощью индивидуального преобразователя частоты.

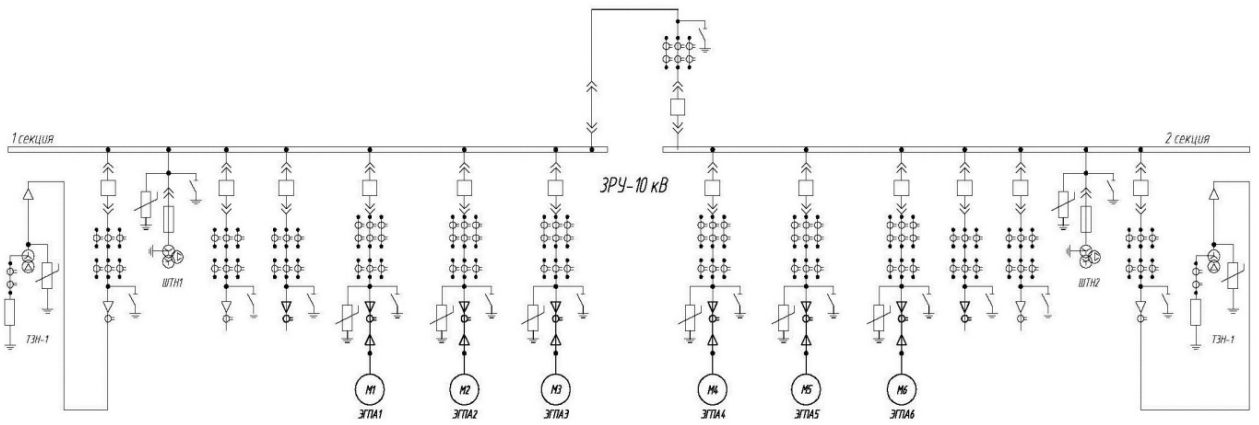


Рисунок 4.3 - Схема без ПЧ

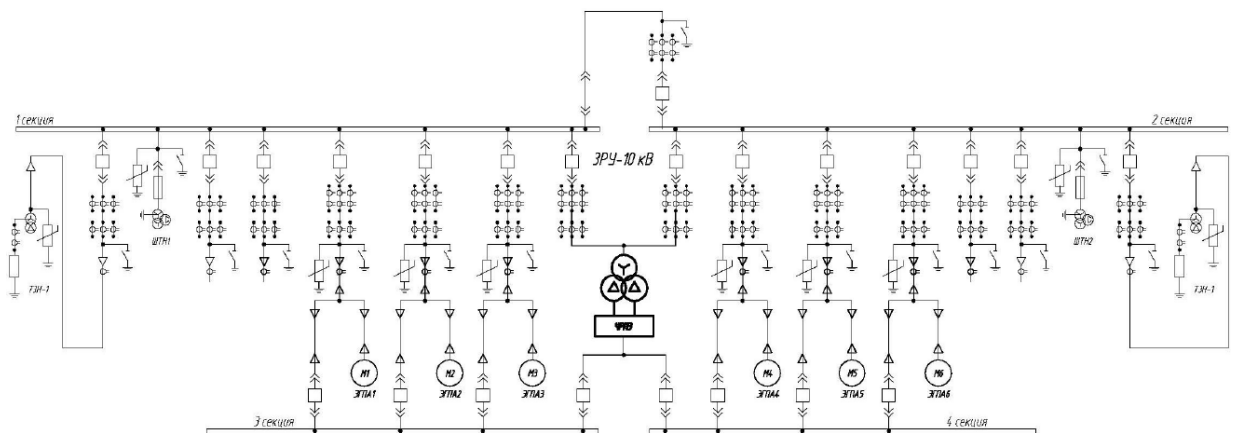


Рисунок 4.4 - Схема с одним ПЧ с секциями шин частотного регулирования

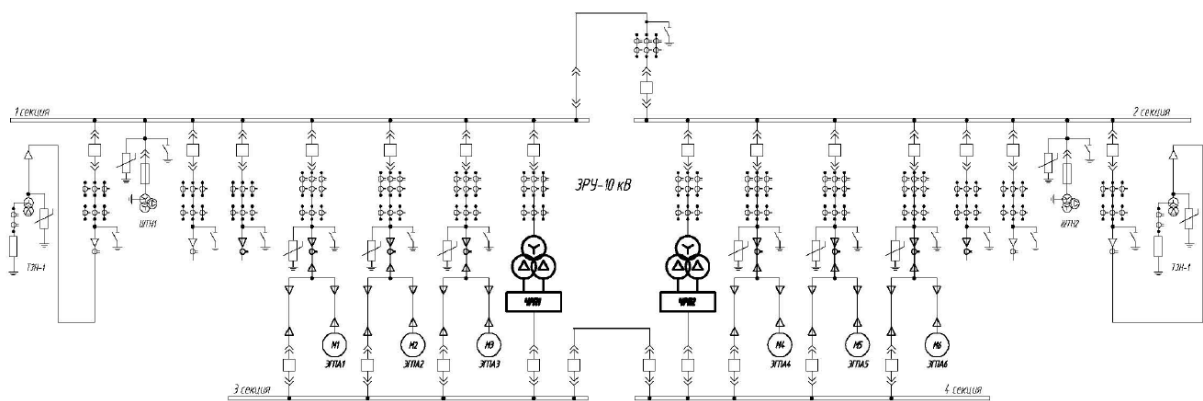


Рисунок 4.5 - Схема с двумя ПЧ с секциями шин частотного регулирования

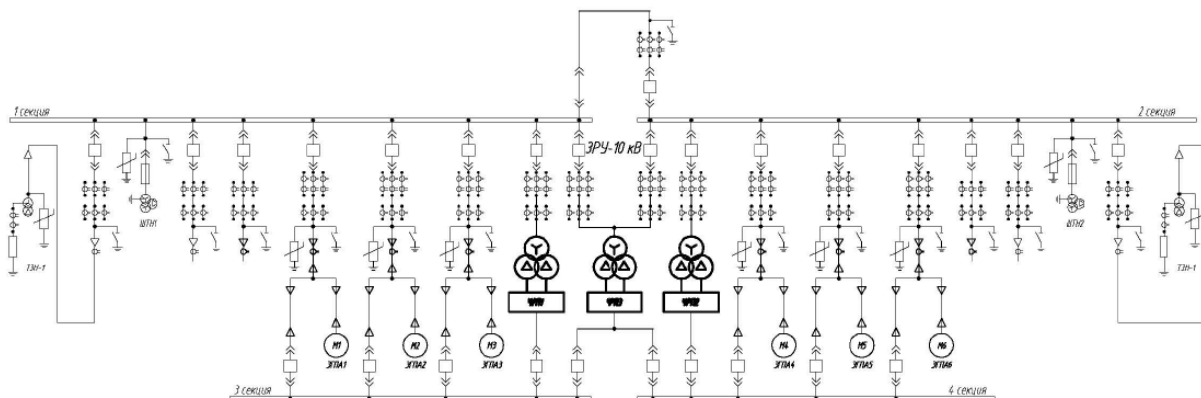


Рисунок 4.6 - Схема с тремя ПЧ с секциями шин частотного регулирования

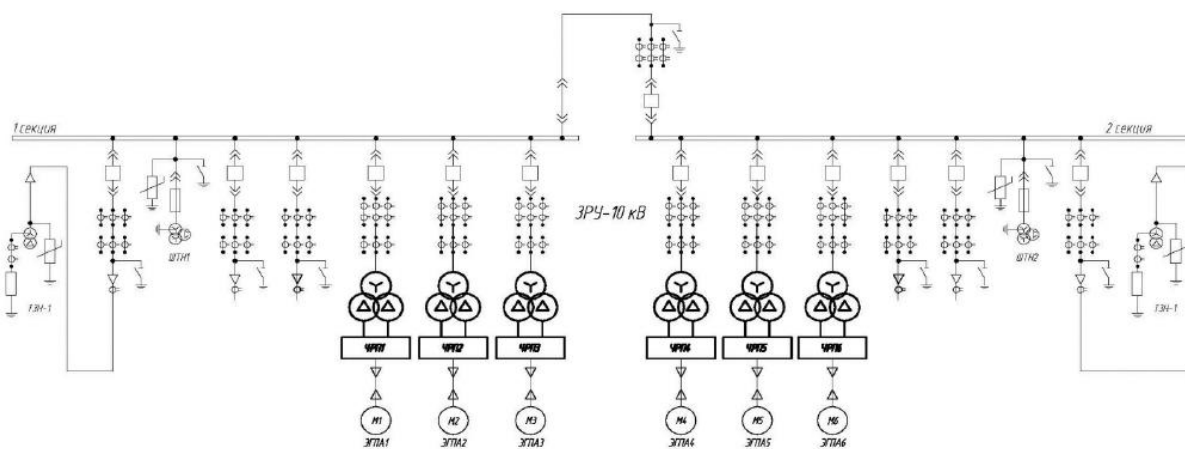


Рисунок 4.7 - Схема с индивидуальным ПЧ для каждого ЭГПА

4.3 Методические подходы к технико-экономическому сравнению вариантов

Выбор экономически эффективного количества частотно регулируемых приводов ЭГПА осуществляется по критерию минимизации дисконтированного совокупного потока затрат.

Дисконтированный совокупный поток затрат – сумма капитальных и эксплуатационных затрат по данному варианту реализации проекта за весь расчетный период, приведенных к начальному шагу.

$$Z_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^T Kt \cdot \frac{1}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^T \text{Э}t \cdot \frac{1}{(1+E)^t} \quad (4.1)$$

- где $Z_{\text{диск}}$ - дисконтированный совокупный поток затрат;
 K_t – капитальные затраты на t-ом шаге;
 Э_t – эксплуатационные затраты на t-ом шаге расчета;
 E – норма дисконта;
 t – номер шага расчета от 0 до T;

T – расчетный период.

В основу технико-экономического сравнения положены следующие принципы [38]:

Рассмотрение проекта на протяжении всего его жизненного цикла (горизонта расчета). Расчетный период определяется исходя из срока службы до капитального ремонта или, при отсутствии такового, из срока службы до полного физического или морального износа основного вводимого оборудования.

Окончательный ввод рассматриваемого оборудования в эксплуатацию ожидается после завершения периода строительства, т.е. горизонт расчета должен определяться как совокупность срока службы основного оборудования и продолжительности строительства. Период строительства или инвестиционный период условно принимается равным 1 году.

Моделирование денежных потоков выполняется исходя из всех связанных с осуществлением проекта денежных расходов за расчетный период.

На каждом шаге расчетного периода значение денежного потока характеризуется оттоком, равным платежам на этом шаге.

Учет фактора времени и рисков. Разновременные денежные потоки приводятся к базовому при помощи дисконтирования. Основным экономическим нормативом, используемым при дисконтировании, является норма дисконта. Норма дисконта определяет степень риска реализации проекта, а также упущенную выгоду от возможных альтернативных вложений.

Основными факторами риска при сравнении вариантов схем электроснабжения является рост капитальных и эксплуатационных затрат. В этой связи учет рисков с помощью ставки дисконтирования некорректен, так как все денежные потоки при сравнении являются затратными.

Таким образом, норма дисконта должна соответствовать упущенной выгоде от возможных альтернативных вложений. Наиболее корректно использовать безрисковую ставку доходности, а именно доходность государственных облигаций. На 2020 год она равняется 8%.

Учет только предстоящих затрат. При расчетах показателей эффективности учитываются только предстоящие в ходе осуществления проекта затраты, включая затраты, связанные с привлечением ранее созданных производственных фондов. Прошлые, уже осуществленные затраты, не обеспечивающие возможности получения альтернативных доходов в перспективе, в денежных потоках не учитываются и на значение совокупных расходов не влияют.

Учет влияния инфляции. Для исключения искажений в прогнозировании инфляции и в соответствии с положениями [38], инфляционная составляющая нормы дисконта в расчетах не учитывается, т.е. все расчеты выполняются в постоянных текущих ценах. Текущими называются цены, сложившиеся на конец базового периода.

Налоговые платежи. При выполнении экономического сравнения вариантов налоги и отчисления учитываются в соответствии с действующим Законодательством.

Налог на прибыль при технико-экономическом сравнении не учитывается, так как при расчете потока затрат понятие прибыли не применимо.

Налог на добавленную стоимость (НДС) по капитальным вложениям в расчете не учитывается, т.к. проект находится в зоне налоговых вычетов в соответствии со статьей 171 [40].

В соответствии со статьей 381 п.11 [40] с основных фондов, участвующих в производственном процессе транспорта природного газа, налог на имущество не взимается.

Оценка капитальных вложений. Капитальные вложения для каждого варианта в зависимости от особенностей объекта и вида строительства (новое, реконструкция, модернизация) включают в себя полные затраты на введение объекта в действие, а именно: новое оборудование включая доставку, демонтаж старого оборудования, строительные-монтажные и пусконаладочные работы и т.д.

Капитальные затраты рассчитываются укрупненно в текущих ценах на основании объектов-аналогов и прейскурантов производителей оборудования.

Как правило, все капитальные затраты учитываются в первый год расчетного периода.

Оценка эксплуатационных затрат. Расчет эксплуатационных затрат предполагает учет только тех затрат, которые существенно влияют общий поток затрат и отличаются для различных вариантов. В расчете учитываются

- расходы на электроэнергию, потребляемую ЭГПА;
- средние годовые расходы на техническое обслуживание и ремонт ПЧ.

Другие эксплуатационные затраты (на содержание персонала и т.д.) для различных вариантов отличаются несущественно, и в расчетах ими можно пренебречь.

Эксплуатационные затраты рассчитываются в текущих ценах на основании справочников, прейскурантов, технических характеристик оборудования, данных производителей ЭГПА и газотранспортных предприятий АО НК «КазМунайГаз».

Риск-анализ. Количественная оценка рисков производится с помощью анализа чувствительности [46].

Цель анализа чувствительности состоит в сравнительном анализе влияния различных факторов на ключевой показатель эффективности проекта, например, на дисконтированный поток затрат.

В качестве отправной точки для расчета дисконтированного потока затрат принимаются базовые варианты расчета.

При проведении анализа чувствительности осуществляется многократный расчет дисконтированного потока затрат по каждому варианту реализации проекта, при каждом расчете изменяется одна из переменных проекта и регистрируется изменение дисконтированного потока затрат.

Ключевым показателем, отражающим насколько сильно изменяется критериальный показатель при единичном изменении риск переменной является эластичность.

Эластичность вычисляется по следующей формуле:

$$E = \frac{(ДПЗ_2 - ДПЗ_1) / ДПЗ_1}{(x_2 - x_1) / x_1} \quad (4.2)$$

где E – эластичность дисконтированного потока затрат (ДПЗ);

$ДПЗ_1, ДПЗ_2$ - значения дисконтированного потока затрат в момент времени t_1 и t_2 соответственно;

x_1, x_2 – значения переменной в момент времени t_1 и t_2 соответственно.

Выводы к главе 4:

1) В главе предложена методика выбора оптимальной с точки зрения экономической эффективности схемы электроснабжения электроприводной компрессорной станции. Данная методика может быть также распространена и на другие промышленные объекты, использующие в своей технологии группу приводов.

2) Представлен анализ вариантов схем электроснабжения электроприводных компрессорных станций. Анализ отражает особенности каждого из вариантов.

3) В рамках методики разработан алгоритм определения экономически эффективного количества преобразователей частоты для регулирования приводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорной станции, который включает в себя оценку расхода электроэнергии для каждого количества преобразователей на основании оптимального распределения нагрузки между работающими агрегатами компрессорной станции. Оценка экономически эффективного количества ПЧ осуществляется путем сравнения дисконтированных потоков затрат каждого из варианта оснащения частотно-регулируемыми приводами.

4) В главе в качестве примера реализации разработанной методики приведен выбор наиболее экономически эффективной схемы для реальной реконструируемой КС. Экономия электроэнергии относительно варианта без установки ПЧ составила 15,8 млн. кВт·ч ежегодно. Экономический эффект в течение жизненного цикла, относительно ближайшего к оптимальному варианту составил 32,3 млн. тг., а относительно самой распространенной схемы, применяемой на аналогичных объектах 92,6 млн. тг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В настоящее время электроприводные газоперекачивающие агрегаты составляют значительную часть (около 13%) в парке АО НК «КазМунайГаз». Однако основная часть установленных агрегатов работает за пределами нормального срока службы и наработки. Технические решения, примененные в большинстве действующих ЭГПА, не отвечают современным требованиям к эффективности и надежности.

2) При создании новых современных ЭГПА применяются технологии, позволяющие существенно повысить надежность и эффективность их работы. Одним из основных преимуществ нового поколения ЭГПА является возможность плавного пуска и точного регулирования благодаря использованию высоковольтного частотно регулируемого привода. Применение преобразователей частоты с современными системами автоматического регулирования (САР) позволяет существенно снизить расход электроэнергии, потребляемой агрегатом и продлить срок его службы.

3) Необходимость использования современных САР обусловлена тем, что режимы работы компрессорной станции, параметры транспортируемого газа, а также внешние влияющие факторы оказывают существенное воздействие на режимы работы ЭГПА. Учет влияющих факторов позволит увеличить эффективность работы ЭГПА и снизить потребление электроэнергии.

4) Описание возмущений (технологических и внешних), действующих на ЭГПА, может быть формализовано путем учета в алгоритмах систем автоматического регулирования электроприводов газоперекачивающих агрегатов. Вследствие случайного характера возмущений наилучшим способом формализации является использование регрессионного анализа для определения оптимальных параметров работы ЭГПА с учетом действующих влияющих факторов.

5) Для повышения энергоэффективности и надежности ЭГПА за счет учета влияющих факторов в работе предложена структура замкнутой комбинированной САР скорости электропривода газоперекачивающего агрегата со стабилизацией давления на выходе ЭГПА. Структура САР позволяет обеспечить поддержание требуемого значения выходного давления и одновременного регулирования скорости ЭГПА для изменения производительности. На данную САР оформлен патент на полезную модель RU 143 197 U1. Предложенная САР имеет в своем составе блок расчета требуемой скорости, использующий регрессионный алгоритм расчета.

6) Для возможности реализации предложенного алгоритма в работе дано теоретическое обоснование возможности использования алгоритмов управления ЭГПА на основе регрессионных уравнений. Рассмотрено три способа определения математической модели системы автоматического регулирования. Выполнен отбор переменных регрессионного уравнения на основании корреляционного анализа.

7) Для подтверждения эффективности предложенного алгоритма выполнен синтез регрессионного уравнения на основании данных работы реальной компрессорной станции. Результаты прогнозирования на основании полученного регрессионного уравнения обладают высокой точностью (Средняя ошибка аппроксимации равна 0,75%). Полученное регрессионное уравнение, прошло все этапы статистического оценивания и может быть признано адекватным. Таким образом, данное уравнение можно использовать как вычислительную основу алгоритма, позволяющего определить оптимальную частоту вращения электродвигателя при различных режимах работы с учетом всех технологических, конструктивных и климатических факторов.

8) Для возможности проверки работоспособности и эффективности предложенных САР и регрессионного уравнения задания скорости в пакете ПО MatLab Simulink разработана компьютерная модель ЭГПА, позволяющая с высокой точностью моделировать процессы в системе ПЧ-АД.

9) В рамках разработки модели предложен алгоритм векторной ШИМ для трехфазного трехуровневого автономного инвертора напряжения, обеспечивающий минимальное количество переключений ключей. Предложенный алгоритм реализован в виде внутреннего программного кода MatLab.

10) Результаты моделирования показали, что предложенная структура САР, основанная на принципе комбинированного управления, позволяет добиться высокой точности регулирования скорости вращения привода ЭГПА (интеграл

11) квадрата ошибки 0,015%) и выходного давления (интеграл квадрата ошибки 0,098%), а также сохранять устойчивость при запуске, наборе скорости, в режиме установившейся скорости и при регулировании по изменяющимся технологическим и внешним параметрам.

12) Использование 3-уровневого инвертора напряжения с предложенной векторной ШИМ позволяет достичь значения коэффициента гармонических искажений выходного напряжения ПЧ в статическом режиме с использованием синус фильтра составляет 0,17%, что не превышает требуемый порог в 5%.

13) Разработанная САР и регрессионный алгоритм задания скорости ЭГПА позволяет использовать его при реализации группового регулирования электроприводных газоперекачивающих агрегатов с целью достижения требуемых технологических параметров процесса компримирования газа в автоматическом режиме с оптимальными энергетическими характеристиками.

14) Бесперебойность работы электроприводных ГПА зависит от надежности системы электроснабжения. Перспектива применения частотно регулируемого привода увеличивает вариативность построения схем электроснабжения. Необходима разработка методики выбора схемы питания ЭГПА с учетом оптимального количества ПЧ.

15) В работе приведены основные положения разработанной методики выбора оптимальной схемы электроснабжения электроприводной компрессорной станции. Данная методика может быть также распространена и на другие промышленные объекты, использующие в своей технологии группу высоковольтных

16) приводов.

17) В рамках разработки методики представлен анализ вариантов схем электроснабжения электроприводных компрессорных станций. Анализ отражает особенности каждого из вариантов. В результате даются рекомендации по их применению в зависимости от особенностей технологического объекта.

18) В рамках методики разработан алгоритм определения оптимального количества преобразователей частоты для частотного регулирования приводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорной станции. Алгоритм включает в себя оценку расхода электроэнергии для каждого количества преобразователей на основании оптимального распределения нагрузки между работающими агрегатами компрессорной станции. Оценка оптимального количества осуществляется путем сравнения дисконтированных потоков затрат каждого из вариантов оснащения частотно регулируемые приводами.

19) Для обоснования предложенной методики в работе приведен пример выбора оптимальной схемы для реальной реконструируемой КС. Экономия электроэнергии относительно варианта без установки ПЧ составила 15,8 млн. кВт·ч ежегодно. Экономический эффект относительно ближайшего к оптимальному варианту составил 32,3 млн. тг., а относительно самой распространенной схемы, применяемой на аналогичных объектах 92,6 млн. тг. Полученные в ходе выполнения данной работы результаты полностью соответствуют поставленным целям, поэтому можно сказать, что цель работы достигнута.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аникин Д.А., Зуйков А.В., Крюков О.В. Энергосбережение в электроприводе турбокомпрессора газоперекачивающего агрегата // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу/ МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2004, ч.II. – С. 241-243.
- 2 Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для Вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
- 3 Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н. и др. Новее технологии и современное оборудование в электро-энергетике газовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий и др. – М. Энергия, 2002. – 300с.
- 4 Браславский И.Я., Поляков В.Н., Ишматов З.Ш. Математическое моделирование частотно-регулируемого электропривода с Ёмкостными накопителями энергии// Труды XV МНТК «Электроприводы переменного тока» (ЭПТ-2012) / УрФУ, Екатеринбург, 12-16 марта 2012. – С.129-134.
- 5 Васин И.М., Махонин С.В., Скворцов Б.А. Способ формирования высокого напряжения матричного каскадного преобразователя частоты// Электричество, 2012, №9. – С.51-55.
- 6 Великий С.Н. Применение регулируемого электропривода на основном и вспомогательном оборудовании в ОАО «Газпром» / Материалы конференции ОАО «Газпром» «Применение современных электроприводных ГПА и регулируемого электропривода на технологическом оборудовании», Лысьва, Газпромэнергоинформ, 2006. – С.3-6.
- 7 Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 2003. – 566с.
- 8 Вольский Э.Л., Контантинова И.М. Режим работы магистрального газопровода / Э.Л. Вольский, И.М. Контантинова. – Л.: Недра, 1970. – 168с.
- 9 Герасенков А.А. Экономическая оценка вариантов применения регулируемых ЭГПА// Основные научно-технические проблемы развития энергетики в газовой промышленности: Сб. трудов / М.: ВНИИГАЗ, 2006, - С.79-97.
- 10 Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С., Роговой В.И. и др. К вопросу применения быстроходных частотно-регулируемых электроприводов для турбокомпрессоров МГ // Электротехника, 2001, №1. – С.17-26.
- 11 Демиденко Е.З.. Линейная и нелинейная регрессия. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
- 12 Жабин В.М., Косарев Д.В. Сравнительный анализ способов регулирования режимов работы центробежных нагнетателей электроприводных ГПА / Транспорт газа, 2007, №7. – с. 23-30.
- 13 Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы электрооборудования и автоматизации для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности, 2008, № 6. – С.6-10.

14 Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Изв.ВУЗов. Электромеханика, 2009, №5. – С.64-70.

15 Зюзёв А.М. Современные тенденции проектирования электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса // Труды XIII МНТК «Электроприводы переменного тока (ЭППТ-05)», Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С.254-256.

16 Каменев В.М., Чернин М.Е., Ширманов В.М. и др. Электроприводные газоперекачивающие агрегаты нового поколения производства ЗАО «РЭПХ» // Компрессорная техника и пневматика, 2010, №1. – С.38-43.

17 Киянов Н.В., Крюков О.В., Блинов М.В. и др. Методология оптимизации инвариантного управления электроприводом в условиях стохастических возмущений // Труды V Международной конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2007), СПб, 2007. – С. 54-57.

18 Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Алгоритмы управления энергоэффективным высокооборотным ЭГПА // Изв.Вузов. Электромеханика, 2012, №3. С.40-44.

19 Колесников С.М. Разработка и исследование энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов: автореферат ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Воронеж, 2005.

20 Комиссаров С.В. Разработка компьютерного комплекса для диспетчерского управления экспортными поставками газа: автореферат дисс. ... канд. техн. наук 05.13.11. / РГУНГ им. И.М. Губкина, М., 2007. – 25с.

21 Крылов Д.В. Возможности использования электроэнергии Кольской АЭС для завода по производству СПГ и для ЭГПА на г/п Видяево-Волхов // Газовый бизнес, 2008, №5-6. – С.64-67.

22 Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности, 2010, №10. – С.50-53.

23 Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с ИТ- алгоритмами // Автоматизация в промышленности, 2008, №6. – С.36-39.

24 Крюков О.В. Проектирование и модернизация электроприводов нефтегазовых перекачивающих агрегатов // Труды III ВНТК «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий». – Уфа, УГНТУ, 8 апреля 2011. – С.69-72.

25 Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотран-портных систем // Материалы IX МНТК «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'12). – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 30 января – 2 февраля 2012. – С.222-236.

26 Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество, 2008, №9. – С.44-50.

27 Крюков О.В., Захаров П.А. Приложения теории вероятностей и теории планирования эксперимента в задачах управления газотранспортными объектами // Труды XII МНТК “Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты (ПЕЕЕ-2008)” – Алушта, 2008. – С.342.

28 Крюков О.В., Захаров П.А. Концепция инвариантного управления электроприводами КС // Материалы XV МНТК «Информационные системы и технологии (ИСТ-2011)», Н.Новгород, НГТУ, 22 апреля 2011. – С.198-200.

29 Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматическая стабилизация систем электромагнитного подвеса роторов газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности, 2011, №6. – С.50-54.

30 Крюков О.В., Титов В.Г. Моделирование пусковых режимов электроприводных ГПА // Изв.ВУЗов. Электромеханика, 2012, №3. – С. 29-35.

31 Крюков О.В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов // Приводная техника, 2010, №5. – С.20-27.

32 Крюков О.В. Энергоэффективные электроприводы газоперекачивающих агрегатов газопроводов на базе интеллектуальных систем управления и

мониторинга // Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. – Нижний Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2014. – 312с.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тулешов Султан Асылбекулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы

Научный руководитель: Бакытжан Калиев

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 22

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата

08.06.2022

Жумариев А.С.

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тулешов Султан Асылбекулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы

Научный руководитель: Бакытжан Калиев

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 22

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата

08.06.22

Заведующий кафедрой



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Тулешов Султан Асылбекулы

Тақырыбы: Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы

Жетекшісі: Бакытжан Калиев

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.4

Әріптерді ауыстыру: 22

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 0

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні

08.06.22

Кафедра меңгерушісі



РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
(наименование вида работы)

Тулешов Султан Асылбекулы
(Ф.И.О. обучающегося)

7M07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования
(шифр и наименование специальности)

На тему: «Исследование рабочих параметров электроприводных газоперекачивающих агрегатов для повышения надежности работы»

Выполнено:

а) графическая часть на _____ 10 _____ слайдах

б) пояснительная записка магистерской диссертации на _____ 48 _____ страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Тема диссертационного исследования полностью соответствует наименованию образовательной программы магистратуры.

Исследователь рассматривает вопрос по повышению надежности работы ГПА путем применения технологии эпиламирования.

В представленной на рецензию магистерской диссертации проанализированы результаты натурных испытаний технологии эпиламирования на газоперекачивающих агрегатах СТД-4000 в компании ТОО «КМГ Проект», который показывает, что наиболее проблемными узлами, определяющими работоспособность ГПА, являются зубчатая муфта, зубчатое зацепление и подшипники скольжения.

Применение фтортензидных композиций «Валкон» способствует удержанию смазочной среды в зоне трения, исключая сухое трение в период пуска и останова агрегатов. Композиция «Валкон» повышает стабильность функционирования ГПА, снижая уровень вибрации не менее чем на 20 %.

Таким образом все задачи, поставленные в диссертации, получили свое решение в полном объеме. Диссертация является работой, соответствующей требованиям, имеющей научную новизну и практическую значимость. Изменение конструкции клапанного узла является одним из перспективных направлений в области увеличения надежности насоса.

Особых замечаний к диссертационной работе нет.

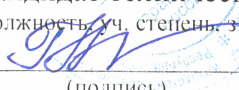
Оценка работы

Диссертационная работа выполнена на достаточно научно-исследовательском уровне. Поставленные цели получили свое решение, содержание и оформление соответствует нормативным требованиям.

Магистрант Тулешов Султан заслуживает присвоения академической степени «магистр техники и технологий», диссертации магистранта можно поставить оценку – А «90%» процентов.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент
(должность, уч. степень, звание)

 Граф А.Ю.
(подпись)

« _____ » _____ 2022 г.