

# Отчет о проверке на заимствования №1



**Автор:** Проверяющий 2 g.satimov@au.es.kz / ID: 29  
**Проверяющий:** Проверяющий 2 (g.satimov@au.es.kz / ID: 29)  
**Организация:** Алматинский Университет Энергетики и Связи

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://au.es.antiplagiat.ru>

## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 268  
Начало загрузки: 18.06.2019 08:50:19  
Длительность загрузки: 00:00:17  
Имя исходного файла: Энергоэффективные системы электропривода механизмов центробежного действия  
Размер текста: 1489 кБ  
Тип документа: Магистерская диссертация  
Символов в тексте: 73477  
Слов в тексте: 8431  
Число предложений: 533

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)  
Начало проверки: 18.06.2019 08:50:36  
Длительность проверки: 00:00:08  
Комментарии: не указано  
Модули поиска: Модуль поиска "АУЭС", Сводная коллекция ЭБС, Коллекция РГБ, Цитирование, Модуль поиска Интернет, Модуль поиска перефразирования Интернет, Модуль поиска общеупотребительных выражений, Кольцо вузов



ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
47,57%	0,56%	51,87%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.  
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.  
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.  
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.  
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.  
Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.  
Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	4,82%	Реферат Выпускная квалификационная работа содержит 72 страницы текста, 32 ри...	<a href="http://lib.knigi-x.ru">http://lib.knigi-x.ru</a>	07 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[02]	4,32%	TPU_VKR_20072.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	27 Мая 2016	Кольцо вузов
[03]	0,7%	TPU_VKR_20116.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	27 Мая 2016	Кольцо вузов
[04]	4,06%	TPU_VKR_23622.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	01 Июн 2016	Кольцо вузов
[05]	0,49%	TPU_VKR_21088.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	30 Мая 2016	Кольцо вузов
[06]	4,98%	не указано	<a href="http://bib.convdocs.org">http://bib.convdocs.org</a>	05 Янв 2017	Модуль поиска перефразирования Интернет
[07]	0,86%	Учебное пособие "Электрический привод"	<a href="http://portal.tpu.ru:7777">http://portal.tpu.ru:7777</a>	20 Янв 2018	Модуль поиска Интернет
[08]	0%	TPU_VKR_20096.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	27 Мая 2016	Кольцо вузов
[09]	0,25%	TPU_VKR_19800.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	27 Мая 2016	Кольцо вузов
[10]	0,67%	TPU_VKR_47249.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	12 Июн 2016	Кольцо вузов
[11]	1,62%	Электропривод промышленных механизмов (Метод.указания по выполнению лаб...	не указано	15 Мая 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[12]	0%	Электропривод промышленных механизмов (Метод.указания по выполнению лаб...	не указано	15 Мая 2018	Кольцо вузов
[13]	2,86%	1.3Неверсивные тиристорные преобразователи - Терьохін В.Б. Моделювання сис...	<a href="http://ukrdoc.com.ua">http://ukrdoc.com.ua</a>	26 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[14]	2%	«Энергосберегающий электропривод центробежных насосов собственных нужд ТЭ...	<a href="http://au.es.kz">http://au.es.kz</a>	раньше 2011	Модуль поиска Интернет
[15]	0,62%	950826351746-0	не указано	15 Янв 2019	Кольцо вузов
[16]	1,09%	Скачать	<a href="http://worldreferat.ru">http://worldreferat.ru</a>	29 Окт 2018	Модуль поиска Интернет
[17]	0,68%	Электропривод нефтеперекачивающих и компрессорных станций нефтегазопрово...	не указано	29 Мая 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[18]	2,39%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/VYJKPZH3YDFPMR16Q64STE">https://esu.citis.ru/dissertation/VYJKPZH3YDFPMR16Q64STE</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	20 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[19]	0,14%	не указано	<a href="http://bib.convdocs.org">http://bib.convdocs.org</a>	01 Янв 2017	Модуль поиска перефразирования

					Интернет
[20]	0,15%	Аналитические и экспериментальные исследования регулируемого электропривод...	не указано	29 Мая 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[21]	0,73%	Электропривод на базе системы преобразователь частоты – асинхронный двигате...	<a href="http://fan5.ru">http://fan5.ru</a>	29 Сен 2017	Модуль поиска Интернет
[22]	1,65%	ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МАТЕРИАЛЫ IV МЕЖДУНАРОДНОГО МОЛОДЁЖНОГО.	<a href="http://lib.knigi-x.ru">http://lib.knigi-x.ru</a>	07 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[23]	0,58%	TPU_VKR_17590.pdf	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	19 Мая 2016	Кольцо вузов
[24]	0,11%	УП_(МЭЭЭСвCML)_ЭиВИЭ_Теремес К.Т._17012018	не указано	17 Янв 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[25]	0,92%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/1tgm000KD8xB15JG6w2cLb00">https://esu.citis.ru/dissertation/1tgm000KD8xB15JG6w2cLb00</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	20 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[26]	1,45%	Курсовик - Регулируемый электропривод лифта по системе ПЧ-АД с короткозамкну...	<a href="https://webkursovik.ru">https://webkursovik.ru</a>	05 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[27]	0,5%	Читать фрагмент PDF	<a href="http://urait.ru">http://urait.ru</a>	раньше 2011	Модуль поиска Интернет
[28]	0%	УП ЭиАПУ Алмуратова НК 31102016.txt	не указано	31 Окт 2016	Модуль поиска "АУЭС"
[29]	1,43%	Энергетические соотношения в силовом канале электропривода центробежных м...	<a href="http://megaobuchalka.ru">http://megaobuchalka.ru</a>	08 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[30]	0,42%	Удуг Л.С. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД БУРОВОЙ УСТАНОВКИ	<a href="http://science.kuzstu.ru">http://science.kuzstu.ru</a>	13 Авг 2017	Модуль поиска Интернет
[31]	0,83%	не указано	<a href="http://window.edu.ru">http://window.edu.ru</a>	05 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[32]	1,2%	Динамическое торможение	<a href="http://ru.wikipedia.org">http://ru.wikipedia.org</a>	05 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[33]	0%	Динамическое торможение	<a href="http://ru.wikipedia.org">http://ru.wikipedia.org</a>	раньше 2011	Модуль поиска Интернет
[34]	0,45%	Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов	<a href="http://diss.seluk.ru">http://diss.seluk.ru</a>	11 Июл 2018	Модуль поиска Интернет
[35]	0,1%	Том 1	<a href="http://portal.tpu.ru">http://portal.tpu.ru</a>	26 Сен 2017	Модуль поиска Интернет
[36]	0%	Энергетические соотношения в силовом канале электропривода центробежных м...	<a href="http://megaobuchalka.ru">http://megaobuchalka.ru</a>	раньше 2011	Модуль поиска Интернет
[37]	0,24%	ҚазККА Хабаршысы № 4(103), 2017. Файлды *.pdf форматында көру (3/3)	<a href="https://kazatk.kz">https://kazatk.kz</a>	11 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[38]	0,11%	Тимошкин, Вадим Владимирович Разработка и исследование наблюдателя угловой.	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	31 Янв 2015	Коллекция РГБ
[39]	0,31%	МД ЭиАПУ Жунисбай ДЕ 20012016.txt	не указано	20 Янв 2016	Модуль поиска "АУЭС"
[40]	0,31%	Диссертация	<a href="http://osu.ru">http://osu.ru</a>	06 Сен 2017	Модуль поиска Интернет
[41]	0,87%	Doc2All.ru - Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхро...	<a href="http://doc2all.ru">http://doc2all.ru</a>	05 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[42]	0,16%	МД140613 ЭЭФ ТойшиевНС ru.txt	не указано	13 Июнь 2014	Модуль поиска "АУЭС"
[43]	0,11%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/YEUMMGEGULUDO7I9G2AOPHD1">https://esu.citis.ru/dissertation/YEUMMGEGULUDO7I9G2AOPHD1</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	20 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[44]	0%	Разработку электропривода водянного насоса по системе ТРН-АД управления скор...	не указано	19 Июнь 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[45]	0,76%	Нереверсивный мостовой трёхфазный тиристорный преобразователь 2 страница	<a href="http://mybiblioteka.su">http://mybiblioteka.su</a>	08 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[46]	0%	МД ЭиАПУ Каблашев КК 19012016.txt	не указано	19 Янв 2016	Модуль поиска "АУЭС"
[47]	0%	Анатолий Загорский Тиристорные пусковые устройства	<a href="http://masters.donntu.org">http://masters.donntu.org</a>	15 Окт 2018	Модуль поиска Интернет
[48]	0,07%	Смирнов, Александр Олегович диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[49]	0,49%	Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов	<a href="http://dis.podelise.ru">http://dis.podelise.ru</a>	30 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[50]	0,19%	Боловин, Евгений Владимирович Разработка алгебраических методов идентифика...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	22 Фев 2019	Коллекция РГБ
[51]	0%	Старовойтов, Николай Владимирович диссертация ... кандидата технических наук : ...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[52]	0,16%	Бурков, Алексей Федорович диссертация ... доктора технических наук : 05.09.03 Сан...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[53]	0,21%	не указано	<a href="http://dspace.susu.ru">http://dspace.susu.ru</a>	08 Ноя 2018	Модуль поиска Интернет
[54]	0%	45143	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	09 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС
[55]	0,13%	Черняховский, Роман Леонидович диссертация ... кандидата технических наук : 05....	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[56]	0%	Юшков, Игорь Сергеевич диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.01 Сам...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ

[57]	0%	Бабинович, Дарья Евгеньевна Оптимизация электропотребления на объектах техн.	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	19 Фев 2018	Коллекция РГБ
[58]	0%	Борискин, Павел Иванович диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 Мо.	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[59]	0%	72258	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	10 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС
[60]	0%	250390	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	раньше 2011	Сводная коллекция ЭБС
[61]	0%	Яруллин, Ринат Бариевич на примере виброзерноочистительных машин : диссерт...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[62]	0%	Жуков, Илья Борисович диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 Санкт...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[63]	0%	Автоматизированный электропривод конвейера	не указано	28 Мая 2018	Модуль поиска "АУЭС"
[64]	0,02%	Однокопылов, Георгий Иванович Методы и алгоритмы отказоустойчивого управл..	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	19 Фев 2018	Коллекция РГБ
[65]	0,15%	Полищук, Владимир Иосифович Развитие теории построения систем диагностики ...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	19 Фев 2018	Коллекция РГБ
[66]	0%	Михель, Александр Альбертович диссертация ... кандидата технических наук : 05.14...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[67]	0%	Кружков, Вадим Геннадьевич диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 ...	<a href="http://dlib.rsl.ru">http://dlib.rsl.ru</a>	раньше 2011	Коллекция РГБ
[68]	0,19%	Теория электропривода: Методические указания и контрольные задания, страница..	<a href="http://vunivere.ru">http://vunivere.ru</a>	01 Янв 2017	Модуль поиска перефразирований Интернет
[69]	0%	62911	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	09 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС
[70]	0%	44766	<a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>	09 Мар 2016	Сводная коллекция ЭБС
[71]	0%	Электротехнический справочник. Т. 4. Использование электрической энергии	<a href="http://studentlibrary.ru">http://studentlibrary.ru</a>	27 Ноя 2017	Сводная коллекция ЭБС
[72]	0,56%	не указано	не указано	раньше 2011	Модуль поиска общеупотребительных выражений

Текст документа

Аннотация

В настоящее время электроприводы переменного тока нашли свое применение в различных отраслях промышленности. Большое количество электроприводов построено на основе асинхронных машин, вследствие их высоких показателей с точки зрения надежности и цены. В качестве привода механизмов центробежного действия обычно применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой, их мощность может находиться в пределах от нескольких киловатт до мегаватт 41 .

Системы регулируемого по частоте вращения электропривода центробежных механизмов позволяют освободиться от энергозатратной регулирующей арматуры, снизить динамические нагрузки на механическую систему электропривода и уменьшить влияние пусковых токов на других потребителей, подключенных к 25 сети.

В данной диссертационной работе исследуются два способа управления асинхронным электроприводом с центробежной нагрузкой - электропривод по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) и 34 электропривод 18 по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» (ТРН-АД). 18

Проведен сопоставительный анализ этих вариантов, показавший преимущества системы ПЧ – АД, потребляющей меньше электроэнергии при регулировании в заданном диапазоне.

Для исследований использовался экспериментальный стенд, для которого проведены:

- а) расчет мощности и выбор электродвигателя для привода центробежного насоса стенда;
- б) определение параметров схемы замещения 27 асинхронного двигателя в абсолютных единицах по 27 справочным техническим данным;
- в) расчёта естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя.

В ходе исследования были разработаны две имитационные модели в

программном пакете Matlab/Simulink:

а) имитационная модель «Электропривод по схеме ПЧ-АД»;

б) имитационная модель «Электропривод по схеме ТРН-АД».

Полученные имитационные модели могут быть использованы для компьютерного моделирования различных технологических режимов механизмов центробежного действия.

Аңдатпа

Қазіргі уақытта айнымалы ток электр жетектері өнеркәсіптің түрлі

салаларында кеңінен өз қолданылуын тапты. Жоғары сенімділік және

бағасының тиімділігіне байланысты электр жетектерінің үлкен саны

асинхронды машиналар негізінде жасалынған. Ортадан тепкіш әсер ету

механизмдерінің жетегі ретінде әдетте қысқа тұйықталған орамалы

асинхронды қозғалтқыштар қолданылады, олардың қуаты бірнеше киловаттан мегаваттқа дейін болуы мүмкін.

Ортадан тепкіш механизмдердің электр жетегінің айналу жиілігі

бойынша реттелетін жүйелері энергия шығынын реттеуші арматурадан

босатуға, электр жетегінің механикалық жүйесіне динамикалық жүктемені

төмендетуге және іске қосу токтарының желіге қосылған басқа

тұтынушыларға кері әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

Осы диссертациялық жұмыста ортадан тепкіш жүктемесі бар

асинхронды электр жетекті басқарудың екі тәсілі, яғни «жиілік түрлендіргіші

– асинхронды қозғалтқыш» (ЖТ-АҚ) схемасы бойынша электр жетегі және

«кернеудің тиристорлы реттеуіші – асинхронды қозғалтқыш» (КТР-АҚ)

схемасы бойынша электр жетегі зерттеледі.

Зерттелінген екі нұсқаларға салыстырмалы талдау жүргізілді, берілген

диапазонда реттеу барысында электр энергиясын аз тұтынатын, ЖТ-АҚ

жүйесінің артықшылықтарын көрсетіледі.

Зерттеу үшін эксперименттік стенд қолданылды, және келесі бөлімдер

қарастырылып, нәтижелер алынды:

а) қуаттың есебі және стендтің орталықтан тепкіш сорғысының жетегі

үшін электрқозғалтқышты таңдау;

б) анықтамалық техникалық деректер бойынша абсолюттік бірліктерде

асинхронды қозғалтқышты алмастыру схемасының параметрлерін анықтау;

в) асинхронды қозғалтқыштың табиғи және жасанды механикалық және

электромеханикалық сипаттамаларын есептеу.

Зерттеу барысында Matlab/Simulink бағдарламалық пакетінде екі

имитациялық модель жасалды:

а) «ЖТ-АҚ сұлбасы бойынша электр жетегі» имитациялық моделі;

б) «КТР-АҚ сұлбасы бойынша электр жетегі» имитациялық моделі.

Алынған имитациялық модельдер ортадан тепкіш әсер ететін

механизмдердің түрлі технологиялық режимдерін компьютерлік модельдеу

үшін пайдаланылуы мүмкін.

Annotation

Currently, AC drives have found their application in various industries. A

large number of electric drives are built on the basis of asynchronous machines, due

to their high values in terms of reliability and price. As the drive mechanisms of

centrifugal action are usually used asynchronous motors with squirrel-cage winding,

their power can be in the range of several kilowatts to megawatts.

The systems of the electric drive of centrifugal mechanisms regulated to the

speed make it possible to get rid of energy-consuming control valves, reduce

dynamic loads on the mechanical system of the electric drive and reduce the

influence of starting currents on other consumers connected to the network.

In this thesis work investigates two methods of control of asynchronous

electric drive with centrifugal load - electric drive to scheme «frequency converter –

asynchronous motor» (FC-AM) and electric drive for the scheme «thyristor voltage

controller – asynchronous motor» (TVC-AM).

Comparative analysis of these options, which showed the advantages of the system FC- AM consuming less electricity in the regulation in the predetermined range.

For research, an experimental stand was used, for which conducted:

- a) calculation of power and the choice of the electric motor for the drive of the centrifugal pump of the stand;
- b) determination of parameters of the equivalent circuit of the asynchronous engine in SI units on handbook technical data;
- c) calculation of natural and artificial mechanical and electromechanical characteristics of the asynchronous motor.

During the research, two simulation models were developed in the software package Matlab/Simulink:

- a) simulation model «Electric drive according to the scheme of FC-AM»;
- b) simulation model «Electric drive according to the scheme of TVC-AM».

The obtained simulation models can be used for computer simulation of various technological modes of centrifugal mechanisms.

## Содержание

### Введение 9

#### 1 Силовой канал регулируемого электропривода центробежного насоса 12

##### 1.1 Описание экспериментальной установки 13

##### 1.2 Параметры элементов экспериментального стенда 15

###### 1.2.1 Нагрузка на валу приводного двигателя 15

###### 1.2.2 Выбор электродвигателя для механизмов с вентиляторным типом нагрузки 16

#### 2 Расчет и исследование статических характеристик электропривода центробежного насоса 16

##### 2.1 Справочные параметры электродвигателя 16

##### 2.2 Расчет параметров схемы замещения электродвигателя 17

##### 2.3 Справочные параметры преобразователя 23

##### 2.4 Параметры механической системы 25

##### 2.5 Расчет параметров и характеристик элементов силового канала электропривода 25

###### 2.5.1 Расчет параметров преобразователя 25

###### 2.5.2 Расчет параметров двигателя 26

###### 2.6 Расчет естественных характеристик электродвигателя 27

###### 2.6.1 Расчет естественной механической характеристики 27

###### 2.6.2 Расчет естественной электромеханической характеристики 2 29

###### 2.6.3 Проверка обеспечения заданной области работы электропривода 31

###### 2.6.4 Проверка правильности выбора двигателя и 16 преобразователя 32

#### 2.7 Расчёт характеристик системы преобразователь – двигатель – механизм 33

#### 3 Разработка имитационной модели асинхронного электропривода центробежного насоса 39

##### 3.1 Функциональная схема электропривода 39

##### 3.2 Имитационная модель электропривода 42

###### 3.2.1 Формирователь фазных напряжений 48

###### 3.2.2 Двухфазный асинхронный двигатель в неподвижной системе координат 49

###### 3.2.3 Одномассовая механическая система с реактивной нагрузкой 49

###### 3.2.4 Задатчик интенсивности с S-образной характеристикой 50

###### 3.2.5 Преобразователь токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя 50

3.2.6 1 Вычислитель действующего значения тока статора трехфазного двигателя 51

3.3 Имитационные исследования частотно-регулируемого

асинхронного электропривода 5 насоса со скалярным управлением 52 1

4 1 Исследование статических и динамических свойств

электропривода центробежного насоса по схеме «тиристорный

регулятор напряжения – асинхронный двигатель» 55

4.1 18 Устройства плавного пуска и их функции 55

4.2 Расчёт характеристик системы тиристорный преобразователь –

двигатель – насос 57

4.3 Энергетическая эффективность асинхронных электроприводов 62

4.4 Имитационная модель электропривода с регулированием скорости

изменением напряжения обмоток статора 64

4.4.1 Имитационная модель трехфазного источника питания 66

4.4.2 Имитационная модель СИФУ 66

4.4.3 Имитационная модель тиристорного моста 70

4.4.4 Имитационная модель блока динамического торможения 71

4.5 Имитационные исследования электропривода по схеме ТРН-АД 73

4.6 Анализ эффективности систем управления ПЧ-АД и ТРН-АД 75

Заключение 77

Список использованной литературы 79 72

Введение

Актуальность темы 72 . В условиях современных экономических

отношений возникает необходимость повышения эффективности

использования, всех видов энергоресурсов с применением в широких

масштабах энергосберегающих технологий. Одним из важных ресурсов в

решении этой задачи является снижение энергопотребления на

промышленных объектах средствами автоматизированного электропривода. 49

Современный электропривод представляет собой конструктивное

единство электрического, электромеханического (электродвигателя) и

механического преобразователей энергии и устройства управления. Он

обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую энергию

в соответствии с алгоритмом работы технологической установки. Сфера

применения электрического привода в промышленности, на транспорте и в

быту постоянно расширяется. В настоящее время более 60% всей

вырабатываемой в мире электрической энергии потребляется электрическими

двигателями [1,3]. Современный этап развития электропривода

характеризуется массовым переходом от нерегулируемого привода к

регулируемому на основе достижений в области силовой и управляющей

электроники 26 , 21

Асинхронные машины наиболее распространены в промышленности и

на транспорте вследствие своей простоты и надёжности. Но не простой

задачей является эффективное управление ими и создание для них

специальных систем управления. Анализ таких систем показывает, что

преимущества асинхронного двигателя наиболее полно реализуются при

частотном регулировании, которое обеспечивается преобразователями

частоты.

Для основной группы общепромышленных механизмов, таких, как

турбомеханизмы (компрессоры, насосы, вентиляторы), механизмы

непрерывного транспорта (транспортёры, конвейеры), поршневые машины,

требуется небольшой диапазон регулирования скорости и относительно

низкое быстродействие. В данном случае целесообразно применять простое

скалярное управление частотно-регулируемым асинхронным

электроприводом. Для более сложных производственных механизмов

требуются система векторного управления 26 , которая является

быстродействующей и широкодиапазонной. Например, электроприводы роботов, металлорежущих станков и др.

Альтернативным вариантом частотно-регулируемому электроприводу является асинхронный электропривод с тиристорным регулятором

9

напряжения, с помощью которого можно обеспечить плавный пуск асинхронного двигателя с заданными параметрами разгона и регулирование скорости в определенных пределах. Для 38 повышения эффективности управления, как в динамике, так и в статике электропривода ТРН-АД, необходима обратная связь по угловой скорости. Наличие обратной связи по скорости позволяет 41 обеспечить жесткость регулировочных характеристик, увеличить диапазон регулирования и повысить устойчивость электропривода при работе на средних и низких скоростях.

Работа посвящена актуальной теме – сравнительному анализу двух перспективных систем асинхронного электропривода с оценкой их энергетической эффективности.

Согласно государственной программе «Цифровой Казахстан» утверждённой постановлением правительства РК №827 от 12.12.2017г., главной целью нашей страны является ускорение темпов развития экономики РК и улучшение качества жизни населения за счет использования цифровых технологий.

Объектом исследования данной работы является 72 регулируемый асинхронный электропривод 25 центробежных механизмов по схемам « 50 преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) и «тиристорный регулятор напряжения - асинхронный двигатель» (ТРН-АД). 34

Предметом исследования 18 являются электромеханические и электромагнитные характеристики систем регулируемого электропривода на базе АД с короткозамкнутым ротором и их энергетические показатели.

Целью диссертации является разработка и исследование энергоэффективного регулируемого асинхронного электропривода для механизмов центробежного действия.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач 72 диссертационной работы:

- 1) определение параметров элементов экспериментального стенда с регулируемым автоматизированным электроприводом центробежного насоса;
- 2) расчет и анализ механических и электромеханических характеристик электропривода по схеме ПЧ-АД и ТРН-АД в режиме регулирования центробежной нагрузки;
- 3) разработка имитационных моделей электропривода механизма центробежного действия по схеме ПЧ-АД и ТРН-АД;
- 4) провести экспериментальные исследования энергетических, электромеханических характеристик электропривода на физической и имитационной моделях.

Методы исследования. Для решения поставленных задач 72 использовались 72 экспериментальные и теоретические методы исследований. В качестве теоретической 38 основы применялись: математическая модель 25 трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой в 25 неподвижной системе координат, методика расчёта параметров схемы

10

замещения АД, основы теории автоматического управления.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается 25 путем сравнения результатов имитационного моделирования в программной среде Matlab/Simulink, и экспериментальных

исследований на физической модели, которые показали адекватность моделей в области принятых допущений.

Теоретическая ценность работы заключается в получении подробной методики расчета параметров объектов физического и имитационного моделирования – сложных современных систем автоматизированного электропривода.

Практическая значимость представленной магистерской диссертации обусловлена тем, что разработанные в программном пакете Matlab/Simulink имитационные модели « Электропривод по схеме 18 ПЧ-АД» и « Электропривод по схеме ТРН-АД» 18 могут быть использованы для моделирования различных технологических режимов.

По результатам исследования опубликованы статьи:

- 1) Разработка имитационной модели асинхронного 1 электропривода со скалярным управлением, « 1 Вестник КазАТК», No2(109), 2019г.;
- 2) Математическая модель асинхронной машины с учётом вытеснения тока и насыщения магнитной цепи, «Вестник КазАТК», No2(109), 2019г.;
- 3) Расчёт вольт-частотной характеристики системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, «Вестник КазННТУ», No4, 2019г.;
- 4) Расчёт механических и электромеханических характеристик АД с IR-компенсацией, «Вестник КазННТУ», No4, 2019г.

11

1 Силовой канал регулируемого электропривода центробежного насоса

На рисунке 1.1 представлена функциональная схема автоматизированного электропривода механизма центробежного действия [7].  
Силовая система управления ССУ привода, с помощью информационной (ИСУ), получает питание от сети с параметрами  $U_c, I_c, f_c$  и преобразует их для питания двигателя ЭД в соответствии с режимом работы последнего.  
Механические параметры на валу ЭД – момент  $M_B$  и частота вращения  $\omega_B$  передаются исполнительному механизму ИМ (рабочее колесо насоса, крыльчатка вентилятора и т.д.). В замкнутых системах АЭП сигнал управления формируется при сравнении сигналов задающего устройства (ЗУ) и датчиков обратных связей (ДОС). Центробежный механизм, например, насос, преобразует механическую мощность, характеризуемую моментом на валу  $M_B$  и частотой вращения  $\omega_B$ , в гидравлическую, которая определяется напором НЦМ и подачей QЦМ 29 . 36

Для 14 изменения напора и подачи на выходе агрегата вместо регулируемого электропривода (или одновременно с ним) часто используется разного рода гидравлическая и пневматическая запорная аппаратура 29 ( 14 ЗР).

Рисунок 1.1 – Общая функциональная схема автоматизированного электропривода центробежного механизма

ИСУ  
СУ  
 $U_c, I_c, f_c$   
 $M_B, \omega_B$   
От ЗУ  
От ДОС  
 $U_c, I_c, f_c$   
НЦМ,  
Q НТР, QТР  
ССУ ЭД ЦМ ЗР

12

Силовой канал электропривода представляет собой ряд последовательных преобразований энергии: электрических в ССУ, электромеханических в ЭД, гидравлических в ЦМ и ЗР.



## 1.1 Описание экспериментальной установки

Лабораторный стенд «Система автоматического управления

центробежным насосом» (рисунок 1.2) содержит все электрические,

гидравлические и электронные элементы, позволяющие в полной мере

исследовать процессы в автоматизированном электроприводе центробежного насоса.

Рисунок 1.2 – Функциональная схема стенда

Гидравлическая система состоит из следующих элементов (рис. 1.2):

– ПБ: питательный бак;

– МБ: мерный бак;

– Н: центробежный насос Lowara, управляемый преобразователем

частоты ПЧ;

– Р: датчик давления Овен ПД100;

13

– F1: тахометрического расходомер-счетчик Бетар;

– F2: ультразвуковой расходомер US-800;

– Задв.: задвижка с электроприводом Danfoss;

– ОК: обратный клапан;

– K1: шунтирующий шаровый кран;

– K2: шаровый кран для слива жидкости.

В питательном баке ПБ находится рабочая жидкость, которой также

заполнен трубопровод. Перемещение жидкости по трубопроводу обеспечивает

центробежный насос Н, управляемый преобразователем частоты ПЧ. В

трубопроводе последовательно установлены три датчика: датчик давления Р,

тахометрический счетчик F1 и ультразвуковой расходомер F2. Для

регулирования расхода/давления и создания возмущающего воздействия в

систему введена задвижка Задв. с электроприводом. Для защиты от обратного

поступления воды в питательный бак введен обратный клапан ОК. Рабочая

жидкость после прохождения трубопровода попадает в мерный бак МБ, а

затем обратно в питательный бак. Если проводится измерение расхода

объемным методом, то требуется закрыть шунтирующий кран К1, в остальное

время кран должен быть открыт. При необходимости слива жидкости при

выключенном электропитании стенда требуется открыть шаровый кран К2,

предварительно подставив под него емкость достаточного объема.

Электрическая система состоит из следующих компонентов (рис. 1.2):

1.2):

– ПЛК: программируемый логический контроллер Siemens S7-1200;

– Modbus-USB: преобразователь интерфейсов Modbus-USB;

– ПЧ: преобразователь частоты Unidrive M 701 фирмы Control Techniques;

– ПК: персональный компьютер с установленной Scada системой.

Поскольку изучаемые датчики оснащены электрическим интерфейсом,

сигналы с них должны быть заведены на устройства обработки и управления.

В целях ознакомления с современными протоколами обмена данными, а также

с различными методами преобразования расхода и давления датчики имеют

следующие протоколы:

– датчик давления Р1 оснащен универсальным токовым выходом 4-20мА;

– тахометрический расходомер-счетчик Р2 имеет герконовый датчик.

– ультразвуковой расходомер Р3 снабжен интерфейсом Modbus .

Основным устройством управления в стенде является программируемый

логический контроллер ПЛК S7-1200. Он осуществляет функции сбора

данных, их обработки и управления устройствами стенда. Так, к дискретному

входу DI1.0 ПЛК подключен расходомер F1, ко входу AI0 модуля расширения

SM1234 подключен датчик давления Овен ПД100. С помощью аналогового

выхода модуля расширения AQ0 ПЛК управляет скоростью центробежного

насоса Н, подавая сигнал управления на преобразователь частоты ПЧ.

Управление задвижкой Заdv также осуществляется при помощи аналогового выхода модуля расширения 11 AQ1 ПЛК. 11

14  
Сигнал с ультразвукового расходомера F2 поступает на преобразователь интерфейсов Modbus-USB и далее передается на персональный компьютер, который при помощи Scada 11 - системы обрабатывает эту информацию и передает на ПЛК 17 .

Представленная система автоматизации технологического процесса – открытая. Система автоматизации построена на промышленном оборудовании фирм Siemens, 53 AC Electronix, Control Techniques. В качестве программного обеспечения используется также лицензионное 17 ПО 53 фирмы Siemens, AC Electronix и Adastra Research, с помощью которого можно создавать свои алгоритмы управления или редактировать базовые программы, а также в режиме мониторинга получать данные с датчиков расхода и давления 17 .

1.2 Параметры элементов экспериментального стенда

1.2.1 Нагрузка на валу приводного двигателя

Максимальная требуемая скорость вращения электропривода:

$$\omega_{\text{дв.макс}} = n_{\text{пмакс}}/30, (1.1)$$
$$\omega_{\text{дв.макс}} = 3.14 \cdot 2850/30 = 298.45 \text{ рад/с} .$$

Минимальная требуемая скорость вращения электропривода:

$$\omega_{\text{дв.мин}} = \omega_{\text{дв.макс}}/D, (1.2)$$

где D=10 заданный диапазон регулирования.

$$\omega_{\text{дв.мин}} = 298.45/10 = 29.845 \text{ рад/с} .$$

Статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{с прив.}} = \Delta M_{\text{с пост}} + (1 + b_n) \cdot M_{\text{пол}} \cdot \omega_{\text{н}}/3, (1.3)$$

где  $\Delta = \cdot = 0.021 \cdot 1.962 = 0.041 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент постоянных потерь на валу;

$\cdot = = 0.021$  – коэффициенты постоянных (a) и переменных (b) потерь механизма [1];

$\cdot = = 1.962 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – полезная мощность на валу двигателя.

1.2.2 Выбор электродвигателя для механизмов с вентиляторным типом нагрузки

15  
Для электродвигателей с вентиляторным типом нагрузки выбирается электродвигатель с самовентиляцией . Условия выбора электродвигателя при продолжительной нагрузке вентиляторного типа:

$$n_{\text{дв.н}} \geq n_{\text{эп.макс}}, (1.4)$$
$$M_{\text{дв.н}} \geq M_{\text{с макс}}, (1.5)$$
$$P_{\text{дв.н}} \geq M_{\text{с макс}} \cdot \pi/30 \cdot n_{\text{дв.н}}^*, (1.6)$$
$$P_{\text{дв.н}} \geq 2 \cdot 3.14/30 \cdot 2850 \geq 596, \text{ Вт}.$$

Значение номинальной скорости двигателя принимается ориентировочно  $\approx 0.95 \cdot = 0.95 \cdot 3000 = 2850$ , где – ближайшее значение синхронной скорости двигателя.

2 Расчет и исследование статических характеристик электропривода центробежного насоса

2.1 Справочные параметры электродвигателя

Таблица 2.1 – Паспортные данные электродвигателя

Типо
размер
При
номинальной
нагрузки
,
%

,

%

SM63

BG/304

3000 380 0.61 5 0.66 96 0.0009

Продолжение таблицы 2.1

3.13 2.1 0.9 4.32

2.2 Расчет параметров 27 схемы замещения электродвигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя 39 :

16

$\omega_0 = \pi \cdot n_0 30, (2.1)$

$\omega_0 = 3.14 \cdot 3000 30 = 314.159 \text{ рад/с} .$

Номинальная скорость вращения двигателя:

$n_{дв.н} = 1 - s_n \cdot n_0, (2.2)$

$n_{дв.н} = 1 - 0.05 \cdot 3000 = 2850 \text{ об/мин},$

$\omega_{дв.н} = n_{дв.н} 9.55, (2.3)$

$\omega_{дв.н} = 2850 9.55 = 298.451 \text{ рад/с} .$

Номинальный момент двигателя:

$M_{дв.н} = P_{дв.н} 103 \omega_{дв.н}, (2.4)$

$M_{дв.н} = 0.61 \cdot 103 298.451 = 2.044 \text{ Н}\cdot\text{м} .$

Для определения номинального фазного напряжения и тока двигателя необходимо знать схему соединения обмоток статора. Обмотки статора соединены по схеме Y. Тогда номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток обмотки статора двигателя:

$U_{1фн} = U_{1лн} 3, (2.5)$

$U_{1фн} = 380 3 = 220 \text{ В},$

$I_{1фн} = I_{1лн} = P_{дв.н} 3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \varphi_{пн}, (2.6)$

$I_{1фн} = I_{1лн} = 6103 \cdot 220 \cdot 0.66 \cdot 0.96 = 1.459 \text{ А}.$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$I_{1\text{ макс}} = I_{1лн} \cdot 2 \cdot I_{\text{ п}} \text{ дв}, (2.7)$

$I_{1\text{ макс}} = 1.459 \cdot 4.32 = 6.3 \text{ А}.$

Критический момент двигателя на естественной характеристике: 27

$M_k = m_k \cdot M_{дв.н}, (2.8)$

17

$M_k = 3.13 \cdot 2.04 = 6.4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$M_{дв.пуск} = m_{п} \cdot M_{дв.н}, (2.9)$

$M_{дв.пуск} = 2.1 \cdot 2.04 = 4.3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$

Определение параметров схемы замещения двигателя. 6

Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного

двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке

2.1 [2].

Рисунок 2 2.1 – Т- 16 образная 2 схема замещения асинхронного двигателя

Ток фазы статора при частичной нагрузке 15 :

$I_{1р*} = p^* \cdot 16 P_{дв.н} 3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \varphi_{р*} \cdot \eta_{р*}, (2.10)$

где  $= 0.572$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке [2];

$= 0.965$  – КПД при частичной нагрузке [2];

$= 0.75$  – коэффициент загрузки двигателя 7 [2].

$I_{1р*} = 0.75 \cdot 6103 \cdot 220 \cdot 0.615 \cdot 0.965 = 1.168 \text{ А}.$

Ток холостого хода асинхронного двигателя 16 :

$I_0 = I_{1н} \cdot I_{1р*} I_{н2} \cdot p^* \cdot 1 - s_{н1} \cdot p^* \cdot 1 - s_{н2} \cdot p^* \cdot 1 - s_{н1} \cdot p^* \cdot s_{н2}, (2.11)$

$I_0 = 1.459 \cdot 1.168 1.459 2 \cdot 0.75 \cdot 1 - 0.051 \cdot 0.75 \cdot 0.052 1 - 0.051 \cdot 0.75 \cdot 0.052$

$= 0.662 \text{ А}.$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического

скольжения: 43

18 43

$$s_k = s_n \cdot m_k + m_{k2-1-2} \cdot s_n \cdot \beta \cdot m_{k-11-2} \cdot s_n \cdot \beta \cdot m_{k-1}, (2.12)$$

где – коэффициент, характеризующий соотношение активных

сопротивлений статора и ротора 2 , принимаем 15 =1.

$$s_k = 0.05 \cdot 3.13 + 3.132-1-2 \cdot 0.05 \cdot 1 \cdot 3.13-11-2 \cdot 0.05 \cdot 1 \cdot 3.13-1 = 0.39.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора

асинхронного двигателя:

$$R_2' = 3 \cdot U_1^2 \cdot f_{n2} \cdot (1-s_n)^2 \cdot m_k \cdot P_{дв} \cdot 6 \cdot n \cdot C_{12} \cdot \beta + 1 s_k, (2.13)$$

где =1+ =1+ =1.053 – коэффициент, характеризующий соотношение

$$R_2' = 3 \cdot 220^2 \cdot (1-0.05)^2 \cdot 3.13 \cdot 610 \cdot 1.0532 \cdot 1 + 10.39 = 9.141 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, (2.14)$$

$$R_1 = 1.053 \cdot 9.141 \cdot 1 = 9.622 \text{ Ом}.$$

Определим параметр, который позволяет найти индуктивное

сопротивление короткого замыкания :

$$\gamma = 1 \cdot 7 \cdot s_{k2} \cdot \beta_2, (2.15)$$

$$\gamma = 10.392-12 = 2.364,$$

тогда, 16 индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кн} \cdot 48 = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2', (2.16)$$

$$X_{кн} = 2.364 \cdot 1.053 \cdot 9.141 = 22.747 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X_{1\delta} = 0.42 \cdot X_{кн}, (2.17)$$

$$X_{1\delta} = 0.42 \cdot 22.747 = 9.554 \text{ Ом}.$$
 27

19 27

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в

номинальном режиме:

$$L_{1\delta} = X_{1\delta}^2 \cdot n \cdot f_{1n}, (2.18)$$

$$L_{1\delta} = 9.554^2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 0.03 \text{ Гн}.$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния

обмотки ротора в номинальном режиме 2 :

$$X_{2\delta}' = 0.58 \cdot 27 \cdot X_{кн} C_1, (2.19)$$

$$X_{2\delta}' = 0.58 \cdot 22.747 \cdot 1.053 = 12.535 \text{ Ом}.$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком

рассеяния, в номинальном режиме 2 :

$$L_{2\delta}' = X_{2\delta}'^2 \cdot n \cdot f_{1n}, (2.20)$$

$$L_{2\delta}' = 12.535^2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 0.04 \text{ Гн}.$$

ЭДС ветви намагничивания E1, наведённая потоком воздушного зазора в

обмотке статора в номинальном режиме 68 :

$$E_1 = (U_{1n} \cdot 7 \cdot \cos \varphi \cdot R_1 \cdot I_{1n})^2 + U_{1n}^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot X_{1\delta}^2 \cdot I_{1n}^2, (2.21)$$

$$E_1 = (220 \cdot 0.66 \cdot 9.622 \cdot 1.459)^2 + (220 \cdot 0.751 \cdot 9.554 \cdot 1.459)^2 = 200.271 \text{ В},$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания: 16

$$X_{\mu} = E_{110}, (2.22)$$

$$X_{\mu} = 200.271 \cdot 0.662 = 302.439 \text{ Ом}.$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в

воздушном зазоре 4 :

$$L_{\mu} = X_{\mu}^2 \cdot n \cdot f_{1n}, (2.23)$$

$$L_{\mu} = 302.439^2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 0.963 \text{ Гн}.$$

Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального 27

20

электромагнитного момента двигателя и : 27

$$M_{эм} \cdot 15 \cdot n \cdot s_n = M_{эм} \cdot n =$$

$$3 \cdot U1 \cdot \phi_{H2} \cdot R2' \cdot \omega_0 \cdot s_n \cdot X_{KH2} + R1 + R2' \cdot s_{H2} + R1 \cdot R2' \cdot s_n \cdot X_{\mu 2}.$$

(2.24)

$$M_{эм.н} \cdot s_n = M_{эм.н} ==$$

$$3 \cdot 2202 \cdot 9.141314 \cdot 159 \cdot 0.05 \cdot (22.747)^2 + 9.622 + 9.1410 \cdot 0.052 + 9.622 \cdot 9.1410 \cdot 0.05 \cdot 302.439$$

$$2 = 2.248 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{эм.н}^* = 32 \cdot z_p \cdot L_{\mu L} + L2\delta' \cdot \psi_{2н} \cdot 2 \cdot I1_{H2} \cdot I_{02}, \quad (2.25)$$

где  $\psi_{2н} = \dots = -0.662 - 0.963 = -0.902 \text{ Вб}.$

$$M_{эм.н}^* = 32 \cdot 1 \cdot 0.9630.963 + 0.04 \cdot 0.902 \cdot 2 \cdot 1.4592 - 0.6622 = 2.387 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Должны выполняться условия:

$$M_{дв.н} < M_{эм.н} \leq 1.1 \cdot M_{дв.н}, \quad (2.26)$$

$$2.044 \text{ Н} \cdot \text{м} < 2.248 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 2.248 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{эм.н}^* \approx M_{эм.н}, \quad (2.27)$$

$$2.387 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 2.248 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По результатам расчета эти условия выполняются [1].

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры схемы замещения электродвигателя **15**

$$9.622 \ 9.554 \ 0.03 \ 302.439 \ 0.963 \ 9.141 \ 12.535 \ 0.04 \ 22.747$$

2.3 Справочные параметры преобразователя

Условия выбора преобразователя частоты:

1)  $\geq$ , (2.28)

$$1100 \text{ Вт} \geq 610 \text{ Вт}.$$

2)  $\geq$ , (2.29)

$$480 \text{ В} \geq 380 \text{ В}.$$

21

3)  $\geq$ , (2.30)

$$3.4 \text{ А} \geq 1.459 \text{ А}.$$

Таблица 2.3 – Параметры преобразователя частоты

Тип

Параметры

питающей сети

Выходное **16**

напряже

ние, В

Тяжелый режим

работы

Нормальный режим

работы

U1л, В fс,

Гц

Макс.

длит.

ток, А

Мощность,

кВт

Макс.

длит.

ток, А

Мощность,

кВт

Unidrive

$$M \ 701 \ 3 \times (380 \div 480) \ 50 \text{--} 60 \ 0 \div 480 \ 2.5 \ 0.75 \ 3.4 \ 1.1$$

В этом руководстве описаны изделия Unidrive M700 и Unidrive M701.

Особенности Unidrive M700 / Unidrive M701:

- аналоговые и цифровые входы-выходы с одноканальным входом

безопасное отключение момента;

- энергонезависимая карта памяти для копирования параметров и хранения данных;
- высококачественный универсальный электропривод для асинхронных, серво, линейных двигателей и двигателей с постоянными магнитами;
- гибкие измерения скорости и положения с поддержкой различных устройств и всех распространенных интерфейсов;
- связь по полевой сети Ethernet (Unidrive M700);
- последовательный порт 485 (Unidrive M701).

Выбор несущей частоты инвертора осуществляется в

соответствии с рекомендациями фирмы-производителя для выбранного типа преобразователя с учетом фактического тока загрузки [2].

Принимаем несущую частоту инвертора  $\omega = 10$  кГц, фактическое

значение тока загрузки составляет:

$$I_{\text{факт.н}} = 0.8 \cdot I_n, (2.31)$$

$$I_{\text{факт.н}} = 0.8 \cdot 3.4 = 2.72 \text{ A.}$$

22

Рисунок 2.2 – Минимальные подключения для запуска двигателя в

любом рабочем режиме

#### 2.4 Параметры механической системы

В данном проекте рассматривается **одномассовая механическая система**

(**1** ОМС). **Одномассовая механическая система** (**1** регулируемого электропривода приведена на рисунке 2.2 [1].

23

Рисунок 2.3 – Структурная схема **одномассовой механической системы** (**1**)

Параметры **одномассовой механической системы**:

– (**1** суммарный эквивалентный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = 1.1 \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{нас}}, (2.32)$$

$$J_{\Sigma} = 1.1 \cdot 0.0009 + 0.0008 = 0.00179 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

– момент сопротивления от сил трения:

$$\Delta M_{\Sigma} = \Delta M_{\Sigma, \text{дв}} + a_n \cdot M_{\Sigma, \text{нагр. макс}}, (2.33)$$

где  $\Delta M_{\Sigma} = - = 2.248 - 2.044 = 0.204 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – момент сил трения собственно двигателя.

$$\Delta M_{\Sigma} = 0.204 + 0.021 \cdot 2 = 0.246 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

#### 2.5 Расчет параметров и характеристик элементов силового канала электропривода

##### 2.5.1 Расчет параметров преобразователя

Инвертор с ШИМ может быть представлен линейным усилителем с коэффициентом усиления [2]:

$$k_i = 2 \cdot U_1 f_n N_{\text{уп. макс}}, (2.34)$$

где – максимальное значение управления на входе преобразователя, принимается  $= 1$ .

$$k_i = 2 \cdot 2201 = 311.13.$$

24

Инерционность инвертора характеризуется чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции:

$$T_{\text{шим}} = 1/f_{\text{шим}}, (2.35)$$

где несущая частота инвертора, Гц. (**1**)

$$T_{\text{шим}} = 1/10000 = 0.0001 \text{ с}.$$

##### 2.5.2 Расчет параметров двигателя

Эквивалентная индуктивность обмоток [2],

статора:

$$L_1 = L_1 \delta + (\text{1}) L_{\Sigma}, (2.36)$$

$L1 = 0.03 + 0.963 = 0.993 \text{ Гн},$

ротора:

$L2 = L2\delta' + L\mu, (2.37)$

$L2 = 0.04 + 0.963 = 1.003 \text{ Гн}.$

Коэффициент рассеяния:

$\sigma = 1 - L\mu2L1 \cdot L2, (2.38)$

$\sigma = 1 - 0.96320.993 \cdot 1.003 = 0.069.$

Эквивалентное сопротивление:

$Rэ = R1 + R2' \cdot L\mu2L22, (2.39)$

$Rэ = 9.622 + 9.141 \cdot 0.96321.0032 = 18.05 \text{ Ом}.$

Электромагнитные постоянные времени:

$Tэ = \sigma \cdot L1Rэ, (2.40)$

$Tэ = 0.069 \cdot 0.99318.05 = 0.0038 \text{ с}.$

$T2 = L2R2', (2.41)$

25

$T2 = 1.0039.141 = 0.11 \text{ с}.$

2.6 Расчет естественных характеристик электродвигателя

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени

совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных

характеристик электродвигателя с параметрами двигателя определенными по

справочным техническим данным выбранного электродвигателя [1].

2.6.1 Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика  $M=f(s)$  асинхронного

электродвигателя рассчитывается для частоты  $\omega = 50 \text{ Гц}$  **2** **27** по выражению

$M s = 3 \cdot U1\phi_n \cdot \omega^2 \cdot R2' \cdot \omega^0 \cdot s \cdot X_{кн2} + R1 + R2' s^2 + R1 \cdot R2' s \cdot X_{\mu2} . (2.42)$

Задаемся скольжением в пределах  $s = 0.01, 0.02 \dots 1$  и рассчитываем

характеристику  $M=f(s)$  (рисунок 2.4), где  $\omega = \cdot$ .

Также рассчитываются значения электромагнитного момента :

$M_{эм,н} s_n = M_{эм,н} =$

$3 \cdot U1\phi_n^2 \cdot R2' \cdot \omega^0 \cdot s_n \cdot X_{кн2} + R1 + R2' s_n^2 + R1 \cdot R2' s_n \cdot X_{\mu2},$

$(2.43)$

$M_{эм,н} s_n = M_{эм,н} ==$

$3 \cdot 220^2 \cdot 9.141314.159 \cdot 0.05 \cdot (22.747)^2 + 9.622 + 9.1410.05^2 + 9.622 \cdot 9.1410.05 \cdot 302.439$

$2 = 2.248 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

критического скольжения:

$s_{кр} = R2' \cdot 1 + R1X_{\mu2}R1^2 + X_{кн2}, (2.44)$

$s_{кр} = 8.128 \cdot 1 + 9.622302.4399.6222 + 22.7472 = 0.37.$

и электромагнитного критического момента:

$M_{эм,кр} s_{кр} = M_{эм,кр} =$

$3 \cdot U1\phi_n^2 \cdot R2' \cdot \omega^0 \cdot s_{кр} \cdot X_{кн2} + R1 + R2' s_{кр}^2 + R1 \cdot R2' s_{кр} \cdot X_{\mu2},$

$(2.45)$

$M_{эм,кр} s_{кр} = M_{эм,кр} ==$

$3 \cdot 220^2 \cdot 9.141314.159 \cdot 0.37 \cdot (22.747)^2 + 9.622 + 9.1410.37^2 + 9.622 \cdot 9.1410.37 \cdot 302.439$

$2 = 6.731 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

26

Рисунок 2.4 – Естественная **2** механическая характеристика асинхронного

электродвигателя

2.6.2 Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественная электромеханическая характеристика  $(s)$

электродвигателя рассчитывается **6** для значения частоты  $\omega = 50 \text{ Гц}$  по

выражению **31** :

$I1 s = I0^2 + I2'^2 + 2 \cdot I0 \cdot I2'(s) \cdot \sin\varphi2(s), (2.46)$

где

$I2' s = U1\phi_n \pm R1 + R2' s^2 + X_{кн2} + R1 \cdot R2' s \cdot X_{\mu2}, (2.47)$

$$\sin\varphi_{2s} = X_{\kappa n} R_1 + R_2' s^2 + X_{\kappa n}^2. \quad (2.48)$$

По вышеприведенным выражениям для скольжений  $s = 0$  и  $s \rightarrow 0$

рассчитываются значения тока статора ( ) и :

$$I_0 = U_1 \varphi_n R_1^2 + X_1 + X_{\mu}^2, \quad (2.49)$$

$$I_0 = 2209.6222 + (9.554 + 302.439)^2 = 0.705 \text{ A.}$$

$$I_1 \text{ сн} = I_0^2 + I_2'^2 s_{\text{сн}} + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' (\text{сн}) \cdot \sin\varphi_2(\text{сн}), \quad (2.50)$$

$$I_1 \text{ сн} = 0.7052 + 1.1352 + 2 \cdot 0.705 \cdot 1.135 \cdot 0.117 = 1.404 \text{ A.}$$

где

$$I_2' \text{ сн} = U_1 \varphi_n \pm R_1 + R_2' s_{\text{сн}}^2 + X_{\kappa n}^2 + R_1 \cdot R_2' s_{\text{сн}} \cdot X_{\mu}^2, \quad (2.51)$$

27

$$I_2' \text{ сн} = 2209.622 + 9.1410.052 + 22.7472 + 9.622 \cdot 9.1410.05 \cdot 302.4392 = 1.135 \text{ A.}$$

$$\sin\varphi_2 s_{\text{сн}} = X_{\kappa n} R_1 + R_2' s_{\text{сн}}^2 + X_{\kappa n}^2, \quad (2.52)$$

$$\sin\varphi_2 s_{\text{сн}} = 22.7479.622 + 9.1410.052 + 22.7472 = 0.117.$$

По результатам расчета строится естественная **электромеханическая**

**характеристика  $\omega = f(\omega)$**  . Электромеханическая характеристика приведена на

**рисунке 2.5.**

**Рисунок 2.5 – Естественная электромеханическая характеристика **6****

асинхронного электродвигателя

2.6.3 Проверка обеспечения заданной области работы

электропривода

28

**Рисунок 2.6 – Естественная механическая характеристика двигателя  $\omega(\varphi)$**

**М ) и **1** характеристика **полного момента сопротивления на валу двигателя **1******

$$(\omega) : \Delta = 0.328 \text{ Н}\cdot\text{м} ; = 2.173 \text{ Н}\cdot\text{м} ; = 2.339 \text{ Н}\cdot\text{м} .$$

**Рисунок 2.7 – Естественные электромеханические характеристики**

$$\text{двигателя } \omega ( ) \text{ и } \omega ( ) : = 1.2 \text{ A} ; = 1.041 \text{ A} ; = 1.459 \text{ A}$$

Из анализа приведенных на рисунках 2.6 и 2.7 характеристик следует,

что электродвигатель SM63BG/304 обеспечивает требуемое значение

29

максимальной скорости насоса CEAM70/3/A =298.451 рад/с, длительную

работу при максимальном моменте нагрузки.

2. **6.4 Проверка правильности выбора двигателя и преобразователя**

По результатам построения механических характеристик

электропривода и нагрузки (рисунок 2.6) проверяется

правильность выбора двигателя по моменту [1]. Во всем диапазоне должны

выполняться условия **31** : **16**

$$M_{\text{дв.длит.доп}} \omega \geq \Delta M_{\text{с}}, \quad (2.53)$$

$$M_{\text{дв.макс}} \omega \geq M_{\text{эп.макс}}. \quad (2.54)$$

на минимальной скорости электропривода =29.845 рад/с **имеем:**

$$2.327 \text{ Н}\cdot\text{м} > 0.328 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$6.88 \text{ Н}\cdot\text{м} > 4.346 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик

электропривода (ω) (рисунок 2.7) проверяется правильность выбора

двигателя по току: **16**

$$I_{\text{дв.длит.доп}} \omega \geq I_{\text{с макс}}. \quad (2.55)$$

на максимальной скорости электропривода =298.45 рад/с **имеем:**

$$1.459 \text{ A} > 1.2 \text{ A}.$$

Следовательно, двигатель по току выбран **16** правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик

электропривода (ω) (рисунок 2.10) проверяется правильность выбора

преобразователя **31** по току **31** :

– условие (ω) ≤ 0.8, имеем 1.459 A < 2.7 A ;

– условие (ω) ≤, имеем 2.4 A < 3.4 A ;



- условие  $\leq$ , имеем  $610 \text{ Вт} \leq 1100 \text{ Вт}$ ;
- условие  $\leq$ , имеем  $380 \text{ В} \leq 480 \text{ В}$ .

Следовательно, преобразователь выбран правильно.

2.7 Расчёт характеристик системы преобразователь – двигатель –

30

механизм

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

при  $f_1=50 \text{ Гц}$   $= = 1$ ; **39**

при  $f_2=40 \text{ Гц}$   $= = 0.64$ ;

при  $f_3=30 \text{ Гц}$   $= = 0.36$ ;

при  $f_4=20 \text{ Гц}$   $= = 0.16$ ;

при  $f_5=15 \text{ Гц}$  **39**  $= = 0.09$ ;

при  $f_6=10 \text{ Гц}$   $= = 0.04$ ;

при  $f_7=5 \text{ Гц}$  **39**  $= = 0.01$ .

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$U_1 = U_{1н} \cdot f_1^* = 220 \cdot 1 = 220 \text{ В},$

$U_2 = U_{1н} \cdot f_2^* = 220 \cdot 0.64 = 140.8 \text{ В},$

$U_3 = U_{1н} \cdot f_3^* = 220 \cdot 0.36 = 79.2 \text{ В},$

$U_4 = U_{1н} \cdot f_4^* = 220 \cdot 0.16 = 35.2 \text{ В},$

$U_5 = U_{1н} \cdot f_5^* = 220 \cdot 0.09 = 19.8 \text{ В},$

$U_6 = U_{1н} \cdot f_6^* = 220 \cdot 0.04 = 8.8 \text{ В},$

$U_7 = U_{1н} \cdot f_7^* = 220 \cdot 0.01 = 2.2 \text{ В}.$

Рисунок 2.8 – Вольт-частотная характеристика при законе управления

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения

произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$\omega_{01} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 501 = 314.159 \text{ радс};$

$\omega_{02} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 401 = 251.327 \text{ радс};$

$\omega_{03} = 2 \cdot \pi \cdot f_3 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 301 = 188.496 \text{ радс};$

31

$\omega_{04} = 2 \cdot \pi \cdot f_4 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 201 = 125.664 \text{ радс};$

$\omega_{05} = 2 \cdot \pi \cdot f_5 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 151 = 94.248 \text{ радс};$

$\omega_{06} = 2 \cdot \pi \cdot f_6 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 101 = 62.832 \text{ радс};$

$\omega_{07} = 2 \cdot \pi \cdot f_7 p = 2 \cdot 3.14 \cdot 51 = 31.416 \text{ радс}.$

Рассчитываем механические характеристики  $M(\omega)$  для выбранных

частот:

$M_{s,fi} = 3 \cdot U_{i2}(f_i) \cdot R_2' \omega_0 \cdot f_i^* \cdot s \cdot X_{кн} \cdot f_i^* \cdot 2 \cdot R_1 + R_2'^2 s^2 + R_1 \cdot R_2'^2 s \cdot X_{\mu} \cdot f_i^* \cdot 2, \quad (2.56)$

где

$U_{fi} = U_{1н} \cdot f_{i1н2}, \quad (2.57)$

$\omega_{s,f1} = 314.159 \cdot f_{i50} \cdot 1-s. \quad (2.58)$

Рисунок 2.9 – Механические характеристики  $\omega(M)$  системы

«преобразователь-двигатель-механизм» при законе регулирования **1**

Анализ приведенных на рисунке 2.9 механических характеристик

электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования  $= \text{const}$

не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты

инвертора  $= 5 \text{ Гц}$ .

**С 40** целью обеспечения **9** пускового момента экспериментально выполнен

подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики **2**

32

преобразователя. Окончательно выбраны для начального участка

характеристики следующие параметры **2** :  $= 14 \text{ В}, = 5 \text{ Гц}$ .

В результате вольт-частотная характеристика представлена

зависимостью:

$U_{fi} = U_{1нач} + U_{1н} \cdot U_{1нач} \cdot f_{i1н2}. \quad (2.59)$

$U_1 = 14 + (220 - 14) \cdot 1 = 220 \text{ В},$

$$U_2 = 14 + (220 - 14) \cdot 0.64 = 145.84 \text{ В,}$$
$$U_3 = 14 + (220 - 14) \cdot 0.36 = 88.16 \text{ В,}$$
$$U_4 = 14 + (220 - 14) \cdot 0.16 = 46.96 \text{ В,}$$
$$U_5 = 14 + (220 - 14) \cdot 0.09 = 32.54 \text{ В,}$$
$$U_6 = 14 + 220 - 14 \cdot 0.04 = 22.24 \text{ В,}$$
$$U_7 = 14 + (220 - 14) \cdot 0.01 = 16.06 \text{ В.}$$

Рисунок 2.10 – Вольт-частотные характеристики: 1 – по формуле ; 2 – при введении добавки по напряжению

33

Рисунок 2.11 - Механические характеристики  $\omega(M)$  системы «преобразователь-двигатель-механизм» при настройке вольт-частотной характеристики

На представленных механических характеристиках видно, как отчетливо меняется развиваемый двигателем момент при корректировке вольт-частотной характеристики. Из рисунка 2.11 видно, что электропривод запускается с частоты 5Гц и обеспечивает перегрузочную способность во всем диапазоне регулирования.

Электромеханические характеристики  $\omega(\ )$  разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель после настройки **2** вольт-частотной характеристики преобразователя рассчитываются для **10** ранее выбранных значений частоты по выражениям **10** :

$$I_1 s, f_i = I_0 2 f_i + I_2 ' 2 s, f_i + 2 \cdot I_0 f_i \cdot I_2 ' s, f_i \cdot \sin s, f_i, (2.60)$$
$$I_0 f_i = U_i (f_i) R_{12} + X_{1\delta} + X_{\mu 2} \cdot f_i f_{i1} n_2, (2.61)$$
$$I_2 ' s, f_i = U_i (f_i) \pm R_1 + R_2 ' s_2 + X_{кн} \cdot f_i f_{i1} n_2 + R_1 \cdot R_2 ' s \cdot X_{\mu} \cdot f_i f_{i1} n_2, (2.62)$$
$$\sin \varphi_2 s, f_i = X_{кн} \cdot f_i f_{i1} n R_1 + R_2 ' s_2 + X_{кн} \cdot f_i f_{i1} n_2. (2.63)$$

34

Рисунок 2.12 – Электромеханические характеристики электропривода  $\omega(\ )$  при скалярном управлении после настройки вольт-частотной характеристики **3** :  
=3.4 А, =1.459 А

3 Разработка имитационной модели асинхронного электропривода центробежного насоса

3.1 Функциональная схема электропривода

Обобщенная функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением приведена **31** на рисунке 3.1. **1** На схеме символом \* обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

$\Delta, \Delta$  – компенсационные сигналы управления соответственно в канале регулирования частоты и напряжения;

$\omega$  – фактическое значение угловой скорости вращения

электродвигателя (ротора);

ЗИС – задатчик интенсивности скорости с линейной или S-образной **21**

35

характеристикой;

РС – регулятор скорости;

ФНУ1 – формирователь напряжений управления двухфазным асинхронным двигателем = . . . ;

ФНУ2 – преобразователь напряжений управления двухфазным **21** двигателем в напряжения управления трехфазным двигателем. **9**

Рисунок 3.1 – Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением **9**

40 **21**

37 **21**

Настроочными параметрами электропривода являются: тип и параметры задатчика интенсивности скорости (ЗИС), значение минимальной частоты

преобразователя 10, закон регулирования и коррекция 10 вольт-частотной характеристики. Большинство из данного перечня уже вычислено. Приведем их:

- 1) минимальная частота преобразователя =5 Гц;
- 2) закон регулирования ;
- 3) коррекция вольт-частотной характеристики выполнена в разделе 2.7;
- 4) принимаем s-образный ЗИС.

38

3.2 Имитационная модель электропривода

Схема набора имитационной модели асинхронного частотно-регулируемого электропривода 1 центробежного насоса 1 со скалярным управлением приведена на рисунке 3.2.

В состав имитационной модели 1 на рисунке 3.2 входят 23 суперблоки:

- формирователя фазных напряжений (рисунок 3.3);
- 1 двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α, β (рисунок 3.4);
- 1 одномассовой механической системы (рисунок 3.5);
- блок формирования нагрузки вентиляторного характера, реализованный с помощью 1 блока Fsp;
- задатчика интенсивности скорости (рисунок 3.6);
- 1 преобразования токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя (рисунок 3.7);

- 1 вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя (рисунок 3.8). 1

39 1

Рисунок 3.2 – 1 Схема набора имитационной модели 1 асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением

43 1

Рисунок 3.3 – Схема набора имитационной модели 1 формирователя фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат α, β

44 2

Рисунок 3.4 – Имитационная модель 2 двухфазного асинхронного электродвигателя в 23 неподвижной системе координат

45 15

Рисунок 3.5 – Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

46 15

Рисунок 3.6 – Имитационная модель 15 задатчика 15 скорости с S-образной характеристикой

47

45

3.2.1 Формирователь фазных напряжений

Схема набора 1 формирователя фазных напряжений приведена на рисунке 3.3. Формирование фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат статора α, β осуществляется по выражениям:

$$u1\alpha t = 2 \cdot U1 \cdot \sin 1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot t, (3.1)$$

$$u1\beta t = 2 \cdot U1 \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot t. (3.2)$$

где значение напряжения определяется в соответствии с выбранной настройкой вольт-частотной характеристики. 1

Вольт-частотная характеристика 1 формируется с помощью стандартного блока Lookup Table или блока Fsp в соответствии с выражениями:

$$U1нач + U1фн - U1нач \cdot f12f1н2 = 14 + 220 - 14 \cdot x2502, (3.3)$$

- при законе регулирования  $f = \text{const}$ .

Параметры блоков формирования синусоидальной функции

имитационной модели рисунке 3.3:

Sine Wave Sine Wave1

Amplitude 1 Amplitude 1

Frequency, rad/sec 1 Frequency, rad/sec 1

Phase, rad 0 Phase, rad  $\pi/2$

Постоянная времени преобразователя:

$T_i = 1/f_i$ , (3.4)

$T_i = 110000 = 0.0001$  с.

На вход 1 схемы **1** рисунок 3.3 подается значение начальной частоты, **1** на вход 2 – сигнал задания скорости (частоты).

Коэффициент преобразования сигнала задания в частоту выходного напряжения инвертора = определяется соотношением:

$k_{Nf} = f_{i.\text{макс}} - f_{i.\text{мин}} / N_{\text{зс.макс}}$ , (3.5)

где принято  $=1$ .

46

$k_{Nf} = 50 - 51 = 45$  Гц.

3.2.2 Двухфазный асинхронный двигатель в неподвижной системе координат

Имитационная модель **1** двухфазного **1** асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  составлена на основании структурной схемы рисунок 3.7 и приведена на рисунке 3.4.

Рисунок 3.7 - Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$

3.2.3 **1** Одномассовая механическая система с **1** реактивной нагрузкой

Схема набора имитационной модели одномассовой механической системы при моменте нагрузки реактивного характера, приведена на рисунке 3.5.

Параметры настройки модели механической системы **1**:

$- \Delta = +\Delta = 0.204 + 0.041 = 0.245$  Н·м – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя;

$= 0.00179$  **1** кг· – эквивалентный момент инерции.

Одномассовая механическая система с вентиляторной нагрузкой и моментом **1** трения моделируется двумя блоками: суперблоком одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера (рисунок 3.5) и стандартным блоком  $F_{sp}$  для формирования **1** вентиляторной нагрузки.

Параметры настройки блока  $F_{sp}$ :

$1 + b_n \cdot M_{пол.н\omega n3} \cdot \text{abs } x \cdot x^2 = 7.535 \cdot 10^{-8} \cdot \text{abs } x \cdot x^2$ , (3.6)

47

где  $= 0.021$ ,  $= 1.962$  Н·м,  $= 298.45$  рад/с, что соответствует

симметричной характеристике ( $\omega$ ) насоса при смене направления вращения.

3.2.4 Задатчик интенсивности с S-образной характеристикой **22**

Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой **10** **22** представлена на рисунке 3.6. Принята S-образная характеристика задатчика ( $t$ ) с параметрами:  $= 0.5$  с,  $= 1$  с,  $= 2 \cdot + = 2 \cdot 0.5 + 1 = 2$  с.

Параметры настройки имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой:

$T_{i1} = t_1 = 0.5$  с, (3.7)

$T_{i2} = t_1 + t_2$ , (3.8)

$T_{i2} = 0.5 + 1 = 1.5$  с,

$k = 0.5 \cdot t_1 t_1 + t_2$ , (3.9)

$k = 0.5 \cdot 0.50.5 + 1 = 0.16667$ .

3.2.5 Преобразователь токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя

Преобразование токов статора, двухфазного двигателя в неподвижной системе координат в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя,, реализуется в соответствии с формулами преобразования  $\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$ , по схеме, представленной на рисунке 3.8.

Рисунок 3.8 – Имитационная модель преобразователя токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя,, 1

48

3.2.6 1 Вычислитель действующего значения тока статора трехфазного двигателя 1

Действующее значения фазных токов трехфазного и двухфазного двигателя равны и определяются по выражению 1 :

$$I_{1\phi} = \sqrt{12 \cdot i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, (3.10)$$

В установившихся режимах работы действующие значения токов

обмоток статора двухфазного и трехфазного двигателей равны 1 :

$$i_{1\alpha} = i_{1\beta} = i_{1a} = i_{1b} = i_{1c} = I_{1\phi}. (3.11)$$

Схема набора имитационной модели для 5 вычислений 6 действующего значения тока статора трехфазного двигателя приведена на рисунке 3.9.

Рисунок 3.9 – Имитационная модель вычислителя действующего

значения тока статора трехфазного двигателя 5 1

Параметры блоков формирования задания:

$f_{in} \text{ нач} = 5 \text{ Гц}$ ,  $\text{step time} = 0$ ;

$N_{зад1} = f_{p.мин} - f_{in} \text{ нач} / N_f = 10 - 545 = -0.11$ ,  $\text{step time} = 1 \text{ с}$ ;

$N_{зад2} = f_{p.макс} - f_{p.мин} / N_f = 50 - 1045 = -0.89$ ,  $\text{step time} = 3 \text{ с}$ ;

$N_{зад3} = -f_{p.макс} + f_{in} \text{ нач} / N_f = -50 + 545 = -1$ ,  $\text{step time} = 5 \text{ с}$ .

3.3 Имитационные исследования частотно-регулируемого

асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением

Имитационные исследования электропривода насоса проводятся с

целью проверки его работоспособности в следующих 2 технологических

режимах: пуск на любую рабочую скорость насоса; переход с одной рабочей

скорости насоса на другую и останов насоса 2. В процессе имитационных

исследований достаточно рассмотреть 1 следующие режимы работы системы

«электропривод-насос»:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость; 2

49

- пуск электропривода 2 на максимальную рабочую скорость 10 ;

- торможение электропривода с максимальной скорости до

минимальной 2 .

К электроприводу насоса не предъявляется жестких требований к

динамическим показателям. Поэтому при выборе параметров настройки 2 1 ЗИС,

прежде всего, следует исходить из условия обеспечения мягкого пуска

электропривода. В ходе имитационных экспериментов установлено, что для

обеспечения мягкого пуска насоса достаточно принять постоянную времени

задатчика 2 = 2 с. 1

На рисунках 3.10 и 3.11 приведены временные и динамические

механические характеристики отработки электроприводом насоса с законом

управления  $I = \text{const}$  и настройкой вольт-частотной характеристикой,

следующего цикла работы:

- пуск на минимальную частоту 2 = 5 Гц ;

- 2 переход на минимальную 2 рабочую скорость насоса ( = 10 2 Гц );

- переход на максимальную рабочую скорость насоса ( = 50 Гц 2 );

- 2 переход на минимальную частоту 2 =5 Гц .

Рисунок 3.10 – Графики переходных процессов отработки электроприводом насоса заданного цикла при законе регулирования  $I = \text{const}$

53

51

Рисунок 3.11 – Статическая и динамическая механические характеристики электропривода и нагрузки

Выводы: полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод насоса 2

при скалярном управлении с законом управления  $I = \text{const}$  и корректировкой вольт-частотной 2 характеристикой обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты =5 10 Гц и требуемый диапазон регулирования скорости насоса. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя.

Время пуска 3  $\approx 0.5$  с, 1 время переходного процесса 1 при переходе с минимальной рабочей скорости на максимальную  $\approx 1.5$  с, время переходного процесса при переходе с максимальной скорости на минимальную (электрическое торможение)  $\approx 1.5$  с .

52

53

4 Исследование статических и динамических свойств

электропривода центробежного насоса по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель»

4.1 18 Устройства плавного пуска и их функции

При использовании системы «асинхронный двигатель» 22 механизм центробежного действия» рекомендуется применять устройства плавного пуска.

Рисунок 4.1 – Устройство плавного пуска фирмы «Danfoss»

Наиболее простым и часто используемым способом включения асинхронного двигателя является прямой пуск непосредственным его подключением к сети. Такое включение сопровождается значительным увеличением пускового тока, который может превышать номинальный в несколько раз. Также наблюдаются колебания момента, которые по значению существенно превышают номинальный 22 момент. Такие скачки тока и момента приводят к большим нагрузкам, как на сеть, так и на механизм. 22

Рисунок 4.2 – Схема силовых цепей нереверсивного тиристорного регулятора напряжения 4

54

Для ряда механизмов рекомендуется использовать плавное увеличение момента двигателя в процессе разгона или плавное уменьшение в процессе торможения. Чтобы решить эту проблему рекомендуется применять пусковые устройства, которые позволяют избежать бросков тока и момента и снизить нагрузки на сеть и механическую часть двигателя. Применение устройств плавного пуска позволит:

- 1) избежать пиковых механических нагрузок механизма;
- 2) избежать бросков тока при пуске;
- 3) реализовать плавный пуск, без толчков в механизме;
- 4) увеличить коэффициент мощности;
- 5) исключить пики тока при переключении;
- 6) отказаться от контакторов;
- 7) в некоторых случаях, исключить применение гидромуфт и муфт скольжения.

Такие устройства позволяют использовать пуск с пониженным пусковым моментом, являющимся наиболее благоприятным для приводного механизма (иными словами, осуществить безударный пуск), а также исключить неблагоприятные режимы перегрузки при пуске. Такой пуск обеспечивается при подаче напряжения на двигатель, которое будет увеличиваться в процессе пуска по экспоненциальному закону.

В результате использования устройства плавного пуска будет получено увеличение срока эксплуатации электропривода и установки в целом, а также повышение надежности его работы.

Плавное нарастание скорости, момента и тока при пуске является основной задачей, решаемой при обеспечении плавного пуска. При использовании тиристорного регулятора напряжения плавное нарастание напряжения на двигателе обеспечивает выполнение этой задачи.

Анализ выполняемых функций устройств различных производителей позволяет отметить, что подавляющее большинство устройств реализует следующие основные функции:

- управление пусковым режимом;
- управление режимом останова;
- управление рабочим режимом;
- вспомогательные функции;
- защитные функции;
- интерфейс между устройством и управляющим элементом верхнего уровня;
- интерфейс между устройством и оператором.

Как правило, тиристорные регуляторы напряжения снабжаются функциями защиты. К таким функциям можно отнести: **4**

55

- защита от короткого замыкания;
- защита при работе в условиях пониженного напряжения на входе ТРН;
- защита при работе в условиях повышенного напряжения на входе ТРН;
- защита от токов перегрузки;
- защита от обрыва фаз;
- защита от невключения шунтирующего контактора (при наличии);
- защита от пробоя силового тиристора;
- защита от тепловой перегрузки;
- защита от несимметрии входного напряжения;
- защита при потере управляемости тиристора.

Применяются они в достаточно большом количестве механизмов, однако наибольший интерес представляют именно **4** **22** механизмы с вентиляторной нагрузкой. Известно, что такие механизмы обладают большой инерционностью и требуют достаточно большого времени разгона. Прямой пуск такого механизма даёт сильное увеличение нагрузки на сеть и, как следствие, уменьшение напряжения в питающей сети, появляются большие нагрузки в подшипниках и кинематике. При использовании ременных передач может наблюдаться их проскальзывание. Плавный пуск значительно снижает вероятность возникновения подобных ситуаций. **22**

При пуске **4** механизмов с вентиляторной нагрузкой нагрузочный момент находится в квадратичной зависимости от частоты вращения **4** ( $M \sim \omega^2$ ).

Такого рода механизмы в большинстве случаев имеют большой момент инерции (от 10 до 200 – кратного значения момента инерции двигателя **4**).

Таковыми характеристиками обладают насосы, вентиляторы, воздуходувки, машины с центробежным принципом управления, корабельные приводы, центрифуги **4** и т.д.

4.2 Расчёт характеристик системы тиристорный преобразователь – двигатель – насос

Для оценки работоспособности электропривода по системе ТРН – АД необходимо провести сравнительный анализ статических механических характеристик для замкнутого и разомкнутого асинхронного электропривода. 18

Найдем относительные значения питающего напряжения, при которых будет работать электропривод:

при  $U = 220 \text{ В}$   $= 1$ ;

при  $U = 176 \text{ В}$   $= 0.8$ ;

при  $U = 132 \text{ В}$   $= 0.6$ ;

при  $U = 66 \text{ В}$   $= 0.3$ .

56

Рассчитываем механические характеристики  $M(\omega)$  для выбранных напряжений по формуле:

$$M \omega = 3 \cdot U^2 \cdot R_2' (\omega_0 - \omega) \cdot X_{\text{кн}}^2 \cdot R_1 + R_2' \omega_0 - \omega \omega_0^2 + R_1 \cdot R_2' \omega_0 - \omega \omega_0 \cdot X_{\mu}^2, \quad (4.1)$$

Рисунок 4.3 – Статические механические характеристики асинхронного двигателя SM63BG/304 для различных 19 напряжений обмоток статора

Возникает вопрос об устойчивости работы электропривода насоса при скольжении больше критического.

Критерием устойчивости работы электропривода является выполнение неравенства:

$$k_{\beta} - k_{\beta c} < 0, \quad (4.2)$$

где  $k_{\beta}$  – жесткость механической характеристики двигателя в точке установившегося режима;

$k_{\beta c}$  – жесткость механической характеристики механизма (насоса) в точке установившегося режима.

Жесткость механической характеристики насоса можно определить аналитически:

$$k_{\beta c} = dM/d\omega = d(M_c + a \cdot \omega^3)/d\omega = 3 \cdot a \cdot \omega^2 \quad (4.3) \quad 6$$

57

Как следует из (5.3), жесткость механической характеристики насоса практически линейно увеличивается с ростом его скорости и во всем диапазоне регулирования скорости положительна 6 . 7

Рисунок 4.4 – Зависимости жесткости асинхронной машины и насоса от скорости

Из анализа полученных графических зависимостей на рисунке 4.4, следует что условие (4.2) выполняется в окрестностях скорости  $\omega = (1 - \epsilon) \cdot \omega_0$ .

Поэтому вращение насоса при скольжении (скорости  $\omega$ ) будет устойчивым.

Устойчивое вращение механизмов с вентиляторной нагрузкой со скольжениями, большими, при регулировании их скорости изменением напряжения подтверждается практическими исследованиями 6 [3]. 7

Электромеханическая характеристика ( $\omega$ ) определяется зависимостью:

$$I_1 \omega = I_0^2 (\omega) + I_2^2 (\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi, \quad (4.4)$$

$$I_2 \omega = U I_1 R_1 + R_2 s^2 + X_{\text{кн}}^2 + R_1 \cdot R_2 s \cdot X_{\mu}^2, \quad (4.5)$$

$$I_0 \omega = U I_1 R_1^2 + X_1^2 + X_{\mu}^2, \quad (4.6)$$

$$\sin \varphi^2 = X_{\text{кн}} R_1 + R_2 s^2 + X_{\text{кн}}^2. \quad (4.7)$$

58

Рисунок 4. 5 – Статические электромеханические характеристики асинхронного двигателя SM63BG/304 для различных напряжений обмоток статора

При изменении напряжения статора критический и пусковой момент асинхронного двигателя уменьшаются пропорционально квадрату фазного напряжения. Одновременно пропорционально напряжению уменьшается ток короткого замыкания 6 . Регулирование скорости происходит за счёт изменения жесткости характеристик. Для некоторых насосов и вентиляторов удается достичь диапазона регулирования  $D = 1 : 10$  благодаря работе двигателя на



участках механической характеристики со скольжениями, большими **6** , **7**

Согласно [6] уравнение, описывающее статические механические

характеристики замкнутого асинхронного ЭП по схеме ТРН-АД с датчиком

скорости **18** имеет вид:

$$\omega_M = \omega_0 - M_k \beta, (4.8)$$

где – скорость идеального холостого хода;

– модуль жесткости механической характеристики;

M – электромагнитный момент двигателя. **18**

59 **18**

Рисунок 4.6 – Механические **18** характеристики замкнутого асинхронного

электропривода по схеме ТРН-АД **18**

Напряжение смещения примем  $=0.3 \cdot$  для получения механической

характеристики, обеспечивающей минимальный необходимый момент

электропривода. На рисунке 4.6 (M) – естественная механическая

характеристика при номинальном напряжении .

4.3 Энергетическая эффективность асинхронных электроприводов

Полные электромагнитные потери в асинхронном двигателе зависят от

трех составляющих:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2} + \Delta P_{с1} (4.9)$$

где  $\Delta$  – **7** потери в меди статора, Вт;

$\Delta$  – потери в обмотке ротора, Вт;

$\Delta$  – потери в стали статора, Вт.

При работе на естественной характеристике эти потери определяются

выражениями **6** [5]: **7**

60

$$\Delta P_{м1} = I_0 I_{1н} + I_0 I_{1н} \cdot \mu C_2 \cdot \Delta P_{м1н}, (4.10)$$

$$\Delta P_{м2} = \mu C_2 \cdot \Delta P_{м2н}, (4.11)$$

$$\Delta P_{с1} = B + 1 - B \cdot \mu C_2 \cdot \Delta P_{с1н}, (4.12)$$

где  $\Delta = 3 \cdot$  – номинальные потери в меди статора, Вт;

$\Delta = 3 \cdot$  – **7** номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

$\Delta = \Delta$  – номинальные потери в стали ротора, Вт;

$\Delta =$  – суммарные потери в двигателе, Вт;

$=$  – относительное значение момента статической нагрузки, о.е.;

B – конструктивный коэффициент, зависящий от серии

асинхронного двигателя, о.е. (  $B=0.96 \div 0.98$  – для серий асинхронных

двигателей 4А-6А,  $B=0.96 \div 0.98$  – для краново-металлургической серии).

При работе на регулировочной характеристике, реализуемой за счёт

снижения напряжения обмотки статора, полные электромагнитные потери в

асинхронном двигателе определяются в соответствии с выражениями:

$$\Delta P_{м1} = 1.1 \cdot \mu C_2 I_0 \cdot s n I_{1н} \cdot s + 1 - I_0 I_{1н} \cdot s n s \cdot \Delta P_{м1н}, (4.13)$$

$$\Delta P_{м2} = 1.1 \cdot \mu C_2 s s n \cdot \Delta P_{м2н}, (4.14)$$

$$\Delta P_{с1} = \mu C_2 B \cdot s n s + 1 - B \cdot s s n \cdot \Delta P_{с1н} .$$

(4.15)

Анализ выражений (4.13), (4.14), ( **7** 4.15) показывает, что при работе на

характеристике с пониженным напряжением увеличиваются потери в обмотке

ротора  $\Delta$ , но уменьшаются потери в меди статора  $\Delta$  и в стали статора  $\Delta$  .

Соотношение потерь таково, что общие электромагнитные потери  $\Delta$  при

работе на характеристике с пониженным напряжением оказываются меньше,

чем при работе на естественной характеристике. **6**

61

Рисунок 4.7 – Зависимости потерь в меди статора -  $\Delta$ , в стали статора -

$\Delta$ , в меди ротора -  $\Delta$  от скольжения s

Согласно источнику [5], при регулировании скорости изменением

напряжения для вентиляторной нагрузки, удастся снизить энергопотребление

в 1.5-2 раза. Экономия электроэнергии будет тем больше, чем меньше момент двигателя, по сравнению с номинальным, и чем больше работает двигатель с недогрузкой.

4.4 6 7 Имитационная модель электропривода с регулированием скорости изменением напряжения обмоток статора  
Схема набора имитационной модели электропривода центробежного насоса по системе ТРН-АД приведена на рисунке 4.9

В состав имитационной модели на рисунке 4.9 входят 23 суперблоки:

- источника питания (рисунок 4.10);
- модернизированный асинхронный короткозамкнутый двигатель, на вход двигателя возможно подавать отдельно активный и реактивный момент;
- блок формирования нагрузки вентиляторного характера, реализованный с помощью блока Fсп;
- S-образный задатчик интенсивности;
- СИФУ (рисунок 4.11);
- тиристорный мост с объединенной шиной управления (рисунок 4.12);
- блок динамического торможения (рисунок 4.13);
- ПИД регулятор из стандартного набора библиотеки Simulink.

Параметры асинхронного короткозамкнутого двигателя в программной среде Matlab:

62

Рисунок 4.8 – Параметры асинхронного двигателя SM63BG/304

На вход S-образного задатчика интенсивности подаются сигналы задания. Параметры блоков задания приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры блоков задания Step

63

Step	Step time	Initial value	Final value	Sample time
------	-----------	---------------	-------------	-------------

Nзад.1	0	0	0.53	0
--------	---	---	------	---

Nзад.2	3	0	0.23	0
--------	---	---	------	---

Nзад.3	5	0	0.24	0
--------	---	---	------	---

Рисунок 4.9 – Схема набора имитационной модели электропривода с регулированием скорости изменением напряжения обмоток статора

65

65

4.4.1 Имитационная модель трехфазного источника питания

Рисунок 4.10 – Схема набора трехфазного источника питания

Параметры блоков формирования синусоидального напряжения приведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры блоков AC Voltage Source

Name	Peak amplitude (V)	Phase (deg)	Frequency (Hz)
------	--------------------	-------------	----------------

AC Voltage Source	$220 \cdot \sqrt{2}$	0	50
-------------------	----------------------	---	----

AC Voltage Source1	$220 \cdot \sqrt{2}$	-120	50
--------------------	----------------------	------	----

AC Voltage Source2	$220 \cdot \sqrt{2}$	120	50
--------------------	----------------------	-----	----

4.4.2 Имитационная модель СИФУ

Рисунок 4.11 – Схема набора синхронизированного 6-пульсного генератора

На рисунке 4.11 13 приведена схема модели импульсно фазового управления тиристорным преобразователем, разработанная в Simulink.

Линейно нарастающие (пилообразные) напряжения, синхронизированные питающей сетью, вырабатываются интегратором 45

66

Integrator1. Эти напряжения последовательно во времени сравниваются с напряжением, пропорциональным заданному углу управления. Как только напряжения сравниваются (для каждого канала в своё время), вырабатывается

логическая единица на выходе схемы сравнения Relational Operator1. Логическая единица формируется на выходе логической схемы AND (Logical Operator2), которая устанавливает нулевой уровень выходного напряжения соответствующего интегратора Integrator2. В это же время на выходе логической схемы AND (Logical Operator) появляется сигнал единичного уровня, используемый уже для управления тиристорным преобразователем. Длительность этого сигнала определяется величиной напряжения, подаваемого на вход Pwidth и соответствующего  $10...15^\circ$ . В данной схеме реализуется вертикальный принцип формирования угла управления.

Для управления тиристорным мостом необходимо одновременно подавать сигналы управления на два тиристора: первый – на тиристор катодной группы, второй – на соответствующий тиристор анодной группы. Только при этом условии в нагрузке будет протекать ток. Эту задачу выполняет логическая схема (рисунок 4.11), состоящая из логического элемента OR (Logical Operator1) и селектора (Selector). На рисунке 4.12 показаны временные положения сигналов управления тиристорами трёхфазного моста при угле управления  $\alpha = 120^\circ$ . На этой диаграмме показаны соответствующие сигналы управления тиристорами. Разводка управляющих сигналов g1...g6 на рисунке 4.16 произведена в соответствии с диаграммой, приведённой на рисунке 4.12.

Рисунок 4.12 – Управляющие сигналы на СИФУ

Существенным недостатком предлагаемой Simulink схемы СИФУ

67

Synchronized 6-Pulse Generator является одновременный запуск интеграторов Integrator1 и Integrator2 в начальный момент времени и одновременное формирование сигнала управления по нескольким каналам. Анализ показывает, что в начальный момент включения схемы

формируются импульсы управления по всем каналам одновременно. Это обстоятельство приводит к аварийному режиму работы преобразователя. Теоретически режим упорядочивания моментов включения интеграторов (процесс синхронизации) длится один период питающего напряжения 0,02 с. Практически введение блокировки формирования импульсов по входу Block на время 0,01 с исключает аварийный режим [8].

Рисунок 4.13 – Угол управления тиристорами  $\alpha$

Начальное значение угла управления выбрано  $180^\circ$ , что соответствует полностью закрытым тиристорам.

68

Рисунок 4.14 – Осциллограммы статорных напряжений

Выходные напряжения тиристорного регулятора напряжения не имеют чисто синусоидальный характер даже при минимальном угле задания. Чем больше угол задания в электроприводе ТРН-АД, тем наиболее ярко выражена токовая пауза [9].

Рисунок 4.15 – Осциллограммы статорных токов

При работе тиристорного регулятора напряжения на активно-

69

индуктивную нагрузку, каковой является асинхронный двигатель, минимальный угол управления при котором появляются характерные участки (токовая пауза) в осциллограммах тока составляет  $65-70^\circ$ .

Представленные на рисунках 4.14, 4.15 временные характеристики токов и напряжений, полученные на основе имитационной модели рисунок 4.9, имеют характерные особенности, обусловленные импульсно-фазовым

способом регулирования переменного напряжения в цепях с активно-индуктивной нагрузкой.

4.4.3 18 Имитационная модель тиристорного моста

Рисунок 4.16 – Схема набора тиристорного моста с объединённой шиной управления 13

Для исключения помех, возникающих в канале управления тиристорным мостом при включении в сеть, 13 SIFU блокируется на время 0,01с путём подачи 13 сигнала единичного уровня на вход Block. Работа 13 SIFU синхронизирована с питающей сетью подачей линейных напряжений, обозначенных на входах 13 SIFU [8].

4.4.4 Имитационная модель блока динамического торможения

70

Рисунок 4.17 – Схема набора блока динамического торможения

Для остановки электропривода в данной модели применяется динамическое торможение. Это вид торможения асинхронных электродвигателей, при котором обмотка статора отключается от сети переменного тока и включается на постоянное напряжение. Во время торможения обмотка статора создаёт постоянное неподвижное магнитное поле. При вращении ротора относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС ротора. При этом ток ротора будет зависеть от сопротивления в цепи ротора (если таковое имеется). Это приведет к изменению направления электромагнитного момента, то есть он станет тормозным и под действием этого момента происходит торможение. Кинетическая энергия вращающихся частей переходит в теплоту, выделяющуюся в цепи ротора за счет токов, индуцированных в ней неподвижным полем статора. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения либо сопротивление в цепи ротора, можно регулировать величину тормозного момента.

Расчёт тормозного 32 резистора.

$$P_{т.мах} = M_{т.мах} \cdot (n_1 - n_2) 9.55, (4.16)$$

где  $n_1 = 1.2 \cdot n_{ном}$  – 120% номинального момента двигателя;

$n_2$  – начальная скорость замедления, об/мин;

$n_{кон}$  – конечная скорость замедления, об/мин.

$$P_{т.мах} = 1.2 \cdot 2.04 \cdot (2850 - 0) 9.55 = 730.55 \text{ Вт.}$$

71

$$P_{эл.мах} = P_{т.мах} \cdot k \cdot \eta_n, (4.17)$$

где  $k = 0.25$  – коэффициент уменьшения для двигателей до 1.5 кВт;

$P_{ном}$  – номинальная мощность двигателя.

$$P_{эл.мах} = 730.55 \cdot 0.25 \cdot 0.610 = 578.05 \text{ Вт.}$$

$$P_{эл.т} = P_{эл.мах}^2, (4.18)$$

$$P_{эл.т} = 578.05^2 = 289.03 \text{ Вт.}$$

$$R_t \leq U_{ин}^2 / P_{эл.мах}, (4.19)$$

$$R_t \leq 220^2 / 578.05 \leq 83.73 \text{ Ом.}$$

$$I_t = U_{ин} / R_t, (4.20)$$

$$I_t = 220 / 70 = 3.14 \text{ А.}$$

Принимаем тормозной резистор BR300W070 с параметрами 70 Ом, 300 Вт.

4.5 Имитационные исследования электропривода по схеме ТРН-АД

Проверка работоспособности электропривода по схеме ТРН-АД проводилась в технологических режимах работы:

- пуск электропривода при разных заданиях на скорость;
- наброс 18 нагрузки;
- остановка электропривода.

Полный цикл работы электропривода представлен на 18 рисунке 4.18, в

которой области: А – пуск электропривода на скорость =160 18 рад/с ; В – 18

72

наброс 18 нагрузки; С – пуск электропривода на максимальную рабочую скорость; D – 18 остановка электропривода.

Рисунок 4.18 - Графики переходных процессов отработки электроприводом насоса по системе ТРН-АД заданного цикла

Как видно из рисунка 4.18 электропривод отрабатывает заданный цикл, наблюдаемые колебания момента являются следствием несинусоидальности напряжения подводимого к обмоткам статора асинхронного двигателя.

ПИД-регулятор представленный в имитационной модели на рисунке 4.9, был настроен, используя инженерный подход к синтезу ПИД-регуляторов, по методике Зиглера-Николса. Согласно данной методике вначале необходимо:

- а) коэффициенты и установить равными нулю, а коэффициент увеличивается до тех пор, пока система не потеряет устойчивость;
- б) определить предельное значение и обозначить его как, а период автоколебаний как ;

в) определить параметры ПИД-регулятора по следующим выражениям:

$k_p = 0.6 \cdot k_u, (4.21)$

$k_i = 1.2 \cdot k_{up}, (4.22)$

$k_d = 3 \cdot k_u \cdot p_u 40. (4.23)$

А В С D

73

Параметры ПИД-регулятора приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – PID controller parameters

Source Proportional, Integral, Derivative,  
internal 0.00335 0.02 5· 10-6

Рисунок 4.19 – Токи статора в процессе отработки электроприводом насоса заданного цикла

Рисунок 4.20 – Напряжение на статоре в процессе отработки электроприводом насоса заданного цикла

4.6 Анализ энергоэффективности систем управления ПЧ-АД и

74

ТРН-АД

Сравнительный анализ эффективности рассмотренных систем управления ЭП может быть выполнен по критерию минимума потребляемой двигателем полной мощности в установившихся режимах. Потребляемая мощность рассчитывается по выражению:

$P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi, (4.24)$

На рисунке 4.21 построены зависимости, потребляемой двигателем полезной мощности Р(ω) при управлении ЭП по системе ПЧ-АД – характеристика 1, и ТРН-АД – характеристика 2.

Таблица 4.4 – Данные о потребляемой мощности

No эксперимента ω, рад/с Р, Вт (ПЧ-АД) Р, Вт (ТРН-АД)

1 160 130.8 286.7

2 180 182.6 310.3

3 200 238.4 340.5

4 250 377.5 443.2

5 298 573.1 582.1

Рисунок 4.21 – Зависимость потребляемой двигателем насоса мощности от скорости в установившемся режиме: 1 – система ПЧ-АД;

2 – система ТРН-АД

Как видно из приведенных на рис 4.21 зависимостей потребляемая мощность при различных системах управления практически идентична в номинальном режиме работы. Это объясняется тем, что вентили ТРН в цепи

статора АД при этом полностью открыты, то есть двигатель работает практически в естественной схеме включения.

Разница проявляется при работе электропривода с частотой вращения ниже номинальной. При снижении скорости вращения рабочего колеса насоса (в диапазоне регулирования подачи), потери в приводе ТРН-АД резко возрастают. Эту зависимость можно оценить, как пропорциональную глубине регулирования скорости. При снижении скорости в 2 раза, мощность, потребляемая приводом ТРН-АД, увеличивается по сравнению с ПЧ-АД также в 2 раза.

75

#### Заключение

В диссертационной работе проведено исследование регулируемого электропривода центробежного насоса по схемам «**50** преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) и «тиристорный регулятор напряжения - асинхронный двигатель» (ТРН-АД).

1. В **34** процессе исследований использовался экспериментальный стенд, для которого проведены:

- определение параметров элементов - центробежного насоса, асинхронного двигателя, преобразователя частоты, механической части;
- расчёт естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя;
- построение семейств механических и электромеханических характеристик.

2. В ходе исследования были разработаны две имитационные модели в программном пакете Matlab/Simulink:

- имитационная модель «Электропривод по схеме ПЧ-АД»;
- имитационная модель «Электропривод по схеме ТРН-АД».

Адекватность моделей подтверждается сравнением результатов моделирования с известными теоретическими данными и данными физического моделирования. Поэтому полученные имитационные модели могут быть использованы для компьютерного моделирования различных технологических режимов механизмов центробежного действия.

3. Проведены экспериментальные исследования энергетических, электромеханических характеристик электропривода на физической и имитационной моделях.

4. Получено семейство механических и электромеханических характеристик системы «преобразователь-двигатель-центробежный насос».

Выполнена корректировка вольт - частотной характеристики для повышения пускового момента на малых скоростях до требуемых значений. **1**

Полученные результаты имитационных исследований **1** системы ПЧ-АД показали, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод **1** насоса при скалярном управлении с законом управления  $i = i_{st} + k \cdot \Delta \omega$  с корректировкой **2**

76

вольт-частотной **2** характеристикой обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты  $\omega = 5 \cdot 10^{-2}$  Гц и требуемый диапазон регулирования скорости насоса. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя **3**.

5. **1** По результатам имитационного моделирования схемы ТРН - АД

можно сделать вывод о том, что **72** электропривод способен отрабатывать управляющее воздействие от задатчика интенсивности и возмущающее воздействие от момента сопротивления нагрузки с **18** заданными точностью и быстродействием.

Проведен сопоставительный анализ исследуемых вариантов, показавший преимущества системы ПЧ – АД, потребляющей меньше электроэнергии при регулировании в заданном диапазоне.

## Список использованной литературы

- 1 Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учебное пособие. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
- 2 Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
- 3 Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
- 4 Герасимов В.Г. Электротехнический справочник: В 4т. Т.4. Использование электрической энергии / под общей редакцией профессора МЭИ Герасимова В.Г. и др. (гл. ред. Попов А.И.). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 696 с.
- 5 Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей под. ред. Л. Г. Мамяковца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с.
- 6 Ключев В.И. Теория электропривода. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 704 с.
- 7 Мустафин М.А., Мустафин Е.М. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов. – Алматы, 2009. – 248 с.
- 8 Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терехин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
- 9 Тимошкин В.В. Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД : дис. ... канд. техн. наук. - Томск, 2014. - 153 с.
- 10 Шубенко В.А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением [Текст] / В. А. Шубенко, И. Я. Браславский. - Москва: Энергия, 1972. - 200 с.
- 11 Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
- 12 Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Регулируемый асинхронный электропривод: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательство Лань, 2016. – 464с.
- 13 Онищенко Г.Б. Теория электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2015. – 294с.
- 14 Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
- 15 Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2014. – 208с.
- 16 Данилов П., Барышников В., Рожков В. Теория электропривода: учебное пособие. – М: Издательство Директ-Медиа, 2018. – 417с.
- 17 Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие для вузов / И. И. Алиев. — М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.
- 18 Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
- 19 Абакумов А.М. Электрический привод. Часть 2. Электроприводы переменного тока: учеб. пособ. / А.М. Абакумов, П.В. Тулупов, Ю.А. Чабанов.

– Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 130 с.

20 Л.С. Удуг, А.Ю. Чернышев, Н.В. Гусев Разработка и моделирование

асинхронных электроприводов со скалярным управлением // 30 Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет 72 30 Известия вузов.

Электромеханика. – 2015. - №3. – С. 43-49.

21 Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для

вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

22 Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для

вузов. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение 42 , 2000. – 496 с.

23 Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб.

для вузов. – М.: Энергоатомиздат 55 , 1992. – 544 с.

24 Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.:

Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

25 Козлова Л.Е. Разработка нейросетевого наблюдателя угловой

скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН-АД: 18 дис. ... канд. техн. наук. -

Томск, 2015. - 144 с.