

Отчет о проверке
[Вернуться в кабинет](#)
Уважаемый пользователь!
Обращаем ваше внимание, что система Антиплагиат отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение. Также важно отметить, что система находит источник заимствования, но не определяет, является ли он первоисточником.
Информация о документе:

Имя исходного файла: _Диссертация_Шмарин.pdf
Имя компании: Южно-Уральский государственный университет
Комментарий: 2017_06_04SHmarinDisert
Тип документа: Прочее
Имя документа: 2017_06_04SHmarinDisert
Дата проверки: 04.06.2017 21:37
Модули поиска: Южно-Уральский государственный университет, Диссертации и авторефераты РГБ, Интернет (Антиплагиат), Модуль поиска ЭБС "Айбукс", Модуль поиска ЭБС "Лань", Университетская библиотека онлайн, Кольцо вузов, Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Коллекция юридических документов

Текстовые статистики:

Индекс читаемости: сложный
Макс. длина слова: в пределах нормы
Большие слова: в пределах нормы

 Тип отчета: Многоцветный О типах отчетов

Источники	Ссылка на источник	Коллекция/модуль поиска	Доля в отчете	Доля в тексте	Блоков в отчете	Блоков в тексте
1	ДиссертацияБелюсова	Южно-Уральский государственный университет	1,46%	1,46%	38	38
2	Белюсова, Евгений. Ви...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,06%	0,98%	3	31
3	Электронный журнал...	Интернет (Антиплагиат)	0,15%	0,72%	5	17
4	Башлыков, Александр ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,5%	0,57%	17	18
5	Сухов, Игорь, Сергеев ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,23%	0,55%	8	11
6	Григорьев, Максим Ан...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,03%	0,55%	3	22
7	ОстроуховДиссертация...	Южно-Уральский государственный университет	0,14%	0,53%	4	11
8	Донакин, Алексей. Ник...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,51%	0	11
9	Соломахо	Южно-Уральский государственный университет	0,05%	0,48%	3	11
10	Диссертация без титу...	Южно-Уральский государственный университет	0,17%	0,46%	3	10
11	Abstract2014_01_22.d...	Южно-Уральский государственный университет	0%	0,45%	0	14
12	ЭнергосбережениеВвод...	Южно-Уральский государственный университет	0,1%	0,45%	5	13
13	Дулин, ГрантИПРатап...	Южно-Уральский государственный университет	0%	0,43%	0	13
14	Горожанкин, Алексей ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,39%	0	8
15	Ано Редки Али Абд Эл...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,16%	0,38%	10	18
16	Автореферат	Южно-Уральский государственный университет	0%	0,38%	0	11
17	Ангин, Александр Се...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,15%	0,33%	5	7
18	Вейнштейн, Андрей ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,04%	0,3%	2	7
19	Полный текст диссер...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,3%	1	7
20	DisertProverka.docx	Южно-Уральский государственный университет	0%	0,27%	0	9
21	Григорьев, Максим Ан...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,27%	0	7
22	3-Elektrotehnika.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,06%	0,23%	4	10
23	Стационарные гидропн...	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0,14%	0,22%	7	9
24	228	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,22%	0	9
25	Кочагина, Вера Анат...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,21%	0	7
26	Полный текст диссер...	Интернет (Антиплагиат)	0,04%	0,18%	2	8
27	Сборник научных студи...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,18%	0	5
28	Фельдманко, Евгений ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,17%	0	6
29	37588	Университетская библиотека онлайн	0%	0,16%	0	5
30	TPU_VKR_55137.pdf	Кольцо вузов	0%	0,16%	0	2
31	Козаченко, Владимир ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,07%	0,16%	2	3
32	Вестник Иркутского Г...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,16%	0	4
33	Электротехника.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,15%	1	6
34	Текст диссертации	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,15%	1	5
35	Диплом Бычков	Южно-Уральский государственный университет	0,05%	0,13%	3	5
36	Скачать	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,13%	3	3
37	58757	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,13%	0	3
38	Известия Томского по...	Университетская библиотека онлайн	0%	0,11%	0	2
39	Диссертация f. data ...	Интернет (Антиплагиат)	0,05%	0,11%	3	6
40	sokolovskii o.g. e'l...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,11%	0	5
41	Автореферат Poklad.p...	Интернет (Антиплагиат)	0,07%	0,1%	1	2
42	Полхов, Владимир Ни...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,1%	0	6
43	Сухов, Игорь, Василь...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,1%	0,1%	2	2
44	49457	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,1%	0	1
45	Об УТВЕРЖДЕНИИ ВРЕМ...	Коллекция юридических документов	0,1%	0,1%	1	1
46	2015-РОАТ-ЭПШМЕДИН...	Кольцо вузов	0%	0,1%	0	1
47	Виноградов, Анатолий ...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,09%	0	2
48	TPU_VKR_54676.pdf	Кольцо вузов	0%	0,09%	0	2
49	Магнитонские матери...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,09%	0	2
50	Магнитонские матери...	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,09%	0	2
51	Мехатроника и робот...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,09%	1	1
52	58150	Университетская библиотека онлайн	0%	0,09%	0	2
53	скачать	Интернет (Антиплагиат)	0,05%	0,09%	3	4
54	Основы электротехни...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,06%	0,09%	2	1
55	44766	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,03%	0,08%	2	4
56	здесь	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,08%	0	3
57	EDE	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,08%	0	1
58	229238	Университетская библиотека онлайн	0%	0,07%	0	4
59	Об УТВЕРЖДЕНИИ ГОРО...	Коллекция юридических документов	0%	0,07%	0	1
60	231274	Университетская библиотека онлайн	0,07%	0,07%	1	1
61	226183	Университетская библиотека онлайн	0%	0,07%	0	3
62	22285	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,07%	0	2
63	62911	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,06%	0	1
64	TPU_VKR_61190.pdf	Кольцо вузов	0%	0,06%	0	1
65	252102	Университетская библиотека онлайн	0,01%	0,06%	2	3
66	139648	Университетская библиотека онлайн	0%	0,06%	0	2
67	ПравяковаАВ_11-336-...	Кольцо вузов	0%	0,06%	0	2
68	Диссертация на тему ...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,05%	0	1
69	253183	Университетская библиотека онлайн	0%	0,05%	0	3
70	Свойные полупроводни...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,05%	0	2
71	58766	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,05%	0	2
72	Белаяева З.Т. ж.до...	Кольцо вузов	0%	0,05%	0	2
73	скачать	Интернет (Антиплагиат)	0,05%	0,05%	3	3
74	Об УТВЕРЖДЕНИИ ПЕРЧ...	Коллекция юридических документов	0,05%	0,05%	2	2
75	Конструкции элемент...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,05%	0	2
76	электричество_2008...	Университетская библиотека онлайн	0%	0,05%	0	1
77	здесь (4.29 МВ)	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,04%	0	2
78	ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОЙ ...	Коллекция юридических документов	0%	0,04%	0	2
79	241070	Университетская библиотека онлайн	0%	0,04%	0	2
80	Основы электротривов...	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%	0	1
81	Баран, Евгений Ильич...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,04%	0	2
82	Основы электротривов...	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,04%	0	1
83	Металлорежущие станк...	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0,04%	0,04%	2	2
84	скачать	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,03%	1	1
85	22269	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,03%	0,03%	2	2
86	Комоненко, Константи...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,03%	0	2
87	Колмакьян, Павел Гр...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,03%	0	2
88	Васин, Игорь Михайл...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,03%	0	2
89	21814	Университетская библиотека онлайн	0%	0,02%	0	2
90	Электронические маши...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,02%	0	2

[Пересчитать](#)
[Другие действия](#)
[Печать](#)

Оригинальные блоки: 95,38%
 Заимствованные блоки: 4,48%
 Заимствование из "Белых" источников: 0,14%
 Итоговая оценка оригинальности: 95,52%

Министерство образования и науки Российской Федерации	
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования	
«Южноуральский государственный университет»	
(Научно-исследовательский университет)	
На правах рукописи	
Шварин Яков Алексеевич	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОБЪЕМНОГО ГИДРОНАСОСА МНОГОКОЛЕСНОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ	
Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»	
Диссертация на соискание ученой степени	
кандидата технических наук	
Научный руководитель –	
доктор технических наук,	
профессор Кожин В.Л.	
Челябинск – 2017	
2	
ОГЛАВЛЕНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ	4
1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ	10
1.1. Силовые агрегаты мобильной техники	10
1.2. Особенности электрогидравлических систем	11
1.3. Электропривод гидросистем	16
1.4. Объект исследования	20
1.5. Электропривод насосной станции объекта	25
1.6. Требования к системе электропривода гидравлической системы	28
1.7. Задачи исследования	33
1.8. Выводы по первой главе	34
2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	35
2.1. Математическая модель гидросистемы при регулировании скорости гидронасоса	35
2.2. Структурная схема и компьютерная модель электрогидравлической системы с СДПМ	41
2.3. Повышение эффективности гидросистемы ММТ с помощью комплексной модели электрогидравлической системы	44
2.4. Особенности СДПМ и соответствующих систем управления	48
2.5. Сравнение систем управления СДПМ	56
2.6. Выводы по второй главе	72
3. БЕЗДАТЧИКОВОЕ ЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СДПМ	74
3.1. Компьютерная модель СДПМ	74
3.2. Стабилизация СДПМ при скалярном управлении	79
3.3. Грубость системы частотного управления с применением разработанной методики наладки к вариации параметров	86
3.4. Регулирование напряжения статора	89
3.5. Разработка экстремального регулятора СДПМ	90
3.6. Компьютерная модель экстремального регулятора СДПМ	102
3.7. Выводы по третьей главе	109
3	
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 110	
4.1. Исследование модели стабилизированного U/I-управления СДПМ 110	
4.2. Экспериментальное исследование СДПМ с преобразователем частоты	114
4.3. Адаптация системы экстремального регулирования к СДПМ	118
4.4. Методика наладки СЭР для СДПМ	128
4.5. Энергоэффективность электропривода гидросистемы на базе СДПМ с СЭР	130
4.6. Выводы по четвертой главе	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
Библиографический список	135
4	
ВВЕДЕНИЕ	

Актуальность работы. В крупных многоколесных автодорожных платформах (МАП) для работы рулевого управления и работы подвески применяются гидравлические системы. Гидростанции на таких объектах приводятся в движение электроприводами.

Большинство электроприводов объемных гидросистем строится на базе асинхронных двигателей, которые обеспечивают вращение гидронасоса с одной угловой частотой. Однако у электропривода регулируемой гидросистемы МАП предъявляются особые требования по габаритам, энергоэффективности и грубости к изменению параметров, которые асинхронный электропривод не удовлетворяют. Электропривод постоянного тока также не является оптимальным. Синхронный электропривод видится наиболее подходящим для гидравлической системы МАП. Предприятием ОАО НПО «Электромашина» был разработан синхронный электродвигатель с постоянными магнитами ЭДБН-25 обладающий требуемыми характеристиками по указанным критериям. Электродвигатель ЭДБН-25 функционирует по типу вентильного электропривода и работает совместно со специально разработанным преобразователем (коммутатором) и датчиком положения ротора.

Согласно перспективному режиму работы МАП для повышения энергоэффективности гидравлической системы необходимо регулирование скорости в зависимости от давления. От электропривода требуется жесткое поддержание заданной скорости. Функционирование электропривода на автономном объекте обуславливает высокие требования по энергоэффективности. С учетом особенностей эксплуатации, важна простота наладки и обслуживания электропривода, грубость к изменению параметров. Анализ существующего электропривода показал, что при работе на заданной скорости, отличной от номинальной, возникает ошибка настроек угла коммутации, существенно повышающие потери в обмотках системы, вызывающие рост пульсаций и снижение КПД. В системе при работе

5 гидравлики могут возникать ударные нагрузки. Из-за разброса параметров объекта, настройки системы управления оказываются неоптимальными при изменении режима работы, а наладка электропривода на объекте невозможна. Также оказывается экономически неэффективной разработка и использование специального электронного коммутатора для работы ВДПТ. При указанных особенностях становится актуальной научно-техническая задача создания системы электропривода гидравлической системы МАП на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающего высокую энергоэффективность в рабочем диапазоне, простой и эффективный процесс наладки, нечувствительный к изменению параметров.

Степень научной разработанности проблемы. Электрогидравлические системы достаточно широко исследованы в науке и технике, как в советский период, так и в современных работах. Значительный вклад в исследование гидравлики и электрогидравлических систем внесли ученые Свешников В.К., Наземцев А.С., Гийон М., Жолтов В.А., Нейман В.Г., однако электрическая часть в таких системах рассматривается лишь с точки зрения управления электронными дросселями, распределителями, либо характеристиками объемного гидронасоса.

Система управления синхронными двигателями с постоянными магнитами также достаточно подробно изучена российскими и иностранными учеными. Вопросы регулирования синхронных электроприводов изучались Вейнберн А.М., особенности построения бездатчиковых систем управления двигателями с постоянными магнитами были изучены Yas R., Gieras F.J., Molipala S., Ивасюкова, Ч. Среди российских ученых условия устойчивого пуска и работы синхронного двигателя без демпферной обмотки были получены Коршуновым А.А. Система бездатчикового управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при скалярном управлении была исследована Peregа С., ил

6 предложен и теоретически обоснован метод стабилизации частоты вращения электродвигателя.

Вместе с этим, возможности повышения энергоэффективности при регулировании скорости электродвигателя в электрогидравлической системе недостаточно изучены, а существующие способы бездатчикового управления СДПМ требуют более точных методов реализации на практике. Объект исследования – электропривод гидросистемы многоколесной автодорожной платформы на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Предмет исследования – статические и динамические режимы работы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, приходящего в движение объемный гидронасос, при частотном управлении без датчика скорости.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы и наладки электропривода гидравлической системы МАП. Идея работы. Используя комплексную модель электрогидравлической системы уточнить требования к электроприводу для обеспечения энергоэффективной работы. Для обеспечения требований к электроприводу использовать частотное U/I-управление с дополнительным стабилизирующим блоком для обеспечения характеристик поддержания скорости и грубости системы к изменению параметров и автоматическим экстремальным регулятором амплитуды напряжения статора для обеспечения энергоэффективности электропривода.

Задачи исследования:

- разработать комплексную модель электропривода, объединенного с гидравлической системой;
- провести анализ систем управления СДПМ;
- сформулировать методику наладки блока стабилизации частоты вращения СДПМ;
- определить характеристики разработанного U/I-управления СДПМ;

7

- разработать алгоритм поиска наиболее эффективных режимов работы электропривода;
- разработать компьютерные модели для подтверждения адекватности методики и алгоритма;
- провести программное моделирование и экспериментальные исследования.

Методы исследований. В работе использовались методы теоретического и экспериментального исследований.

К теоретическим методам относятся теория электропривода и полупроводниковой преобразовательной техники, теория автоматического управления, методы математического моделирования, построение векторных диаграмм.

Экспериментальные методы исследования: наблюдения и измерения на испытательном стенде, который состоит из электропривода, устанавливаемого в последующем на реальный объект и нагрузки, которая соответствует реальным условиям эксплуатации.

Достоверность полученных результатов определялась обоснованностью принятых допущений, корректностью использования математического аппарата, подтверждением основных теоретических выводов на программных моделях и экспериментальным путем.

Научные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна

1. Разработана комплексная математическая и компьютерная модель синхронного электропривода гидросистемы, отличающаяся тем, что предусматривает управление параметрами гидросистемы многоколесной автодорожной платформы по каналу регулирования частоты вращения вала электродвигателя и алинии гидравлических параметров на нагрузочный момент электродвигателя.

2. Предложена методика наладки системы электропривода на базе СДПМ без демпферной обмотки с частотным управлением, отличающаяся тем, что выбор коэффициентов структурной схемы системы управления производится с помощью компьютерной модели, обеспечивающая требуемые показатели поддержания скорости и грубости к изменению параметров СДПМ.

3. Разработан алгоритм энергоэффективного управления СДПМ при работе в режиме скалярного управления, отличающийся применением принципов экстремального регулирования, обеспечивающий возможность автоматического выбора оптимального значения напряжения для различных рабочих точек.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложена комплексная математическая модель электрогидравлической системы МАП на базе электропривода с СДПМ, позволяет решать задачи синтеза систем автоматизированного электропривода и может быть положена в основу методики разработки регулируемого электропривода гидравлических систем;
- методика наладки системы электропривода на базе СДПМ и ПЧ может быть применена при разработке электроприводов промышленных механизмов, требующих бездатчиковый электропривод, и использующих общепромышленные преобразователи частоты что подтверждается актами о

выобрании. Результаты диссертационной работы нашли применение:

- и были приняты к внедрению в ОАО НПО «Электромашина» (г. Челябинск);
- в учебный процесс на кафедре электроприводов ФГАОУ ВО «Южноуральский государственный университет»;

Работа выполнялась в рамках государственного задания №12101-0424-13/00 от 01.11.2013 между ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) и ОАО «НПО Электромашина».

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедры.

9

- « Автоматизированный электропривод » ФГАОУ ВО « Южно-Уральский государственный университет », г. Челябинск.

Основные положения и результаты диссертационной работы

докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на:

XX Всероссийской научно-технической конференции « Энергетика: эффективность, надежность, безопасность », Томск, 2014г.;

X Международной научно-технической конференции « Энергия-2015 », Иваново, 2015г.;

VIII Международная научная конференция « Приоритеты мировой науки: эксперимент в научной дискуссии », Северный Чарльстон, США, 2015г.;

VI Международная научно-техническая конференция « Электроэнергетика глазами молодежи », Иваново, 2015г.;

Международная научно-техническая конференция « Тран-Ижжиниринг », Челябинск, 2016г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных статей, из них – 3 в авторских научных рецензируемых ВАК РФ, 2 входящих в систему цитирования Scopus, 8 докладов на конференциях, 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи исследования, разработке методов исследований, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [2,3,5-7] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента, в работе [8] разработана математических моделей и результаты моделирования; в публикациях [1, 4, 9,13] – ведущая роль в обосновании методов исследований; Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 150 страницах

применяется иной тип гидронасоса – объемный. В таких системах устанавливается нерегулируемый электродвигатель, либо двигатель внутреннего сгорания, а вопросы регулирования решаются с помощью гидравлических аппаратов. Возможности повышения энергоэффективности гидравлической системы за счет применения регулируемого электропривода оказываются недоиспользованными, в то время как качественные характеристики электродвигателей с течением времени значительно выросли, а также появились новые возможности в их управлении.

Требования к электроприводу, предъявляемые со стороны гидравлической системы, на текущий момент не самые жесткие. Основное требование – это соответствие мощности электропривода во всех технологических режимах. Часто в установках с гидравлическими системами рабочие механизмы функционируют с максимальной мощностью 18

непродолжительное время (иногда до 10% от времени технологического цикла), однако с точки зрения работоспособности всей установки электропривод должен обеспечивать также пиковый. В результате при проектировании электротехнической части приходится завышать установленную мощность оборудования, которая является избыточной для больших интервалов рабочего времени.

Требования по регулированию электропривода либо вообще не предъявляются – необходима работа с постоянной частотой вращения вала – либо предъявляются довольно грубо: часть времени технологического цикла электропривод работает, а часть находится в остановленном состоянии или требуется фиксированное количество скоростей (два – три) [110].

Регулирование технологических параметров гидросистемы осуществляется за счет гидравлической регулирующей аппаратуры, но сопровождается значительным количеством потерь мощности, кроме того часть пуски и остановки электродвигателя приводит к повышению износу большего числа элементов как электрической, так и гидравлической частей.

Еще один класс требований относится по большей части к системе управления и представляет собой всевозможные защиты, блокировки и элементы автоматизации и не выисчет особых трудностей.

Работы по оптимизации электрогидравлических систем встречается как в зарубежной, так и в отечественной литературе. Например, в работе [17] исследуется работа синхронного двигателя с постоянными магнитами в качестве привода двигателя гидронасоса рулевого управления автомобиля. В работе упоминается, что электропривод рулевого усилителя не всегда соответствует габаритам и может негативно сказываться на динамике управления от вибраций, вызванных пульсацией момента. Лучшие эксплуатационные свойства (относительно низкие массогабаритные показатели) можно достичь, применяя электрогидравлическую систему, однако требуется решение задач оптимизации режимов работы электродвигателя.

19 В другой работе [156] рассматривается электропривод компрессора холодильных установок, в которых в качестве привода двигателя применяется однофазный асинхронный двигатель (ОАД). В статье упоминается, что регулирование системы включением и выключением ОАД приводит к повышенному износу компрессора, вызываемому ухуждениями условий смазки при пуске, вызывает повышенный нагрев обмоток двигателя и колебания температуры холодильной установки. Также упоминается, о неполном использовании электродвигателя, рассчитанного на самые тяжелые условия эксплуатации. Показано, что применение регулируемого электродвигателя вместо ОАД позволяет изменить производительность компрессора и повысить эффективность холодильной установки. В исследовании, посвященному электроприводу компрессора системы кондиционирования воздуха [111], упоминается, что введение регулируемого электропривода обеспечивает повышение эффективности привоной системы. Система кондиционирования воздуха является одной из наиболее энергоемких систем и вместе с этим мощность, отбираемая силовой установкой современных самолетов гражданской авиации на обеспечение функционирования, заметно превышает необходимую мощность для работы. Использование регулируемого электродвигателя для привода компрессора позволяет приводить в соответствие мощность электропривода мощности необходимой для корректной работы системы кондиционирования, и позволяет снизить потери мощности до 30%, сократить массу трубопроводной системы и агрегатов на 20-30%, а также сократить расходы топлива.

В рассмотренных работах показаны результаты и возможности применения регулируемого электропривода в объемных гидросистемах, однако при разработке и исследованиях новых методов регулирования требуется использование соответствующих математических моделей. Существующие модели достаточно широко описывают гидравлическую часть, но часть электропривода не рассматривается и заменяется источником

20 постоянной скорости. Для исследования режимов работы электрогидравлической системы при регулировании скорости привоного двигателя требуется разработка комплексной модели, описывающей совместную работу гидравлики и системы электропривода.

1.4. Объект исследования

В рамках настоящего диссертационного исследования рассматривается электропривод гидравлической системы многокопесной автотранспортной платформы. Гидравлическая часть системы обеспечивает усиление рулевого управления, а также работу подвески платформы. Электрогидравлическая система состоит из исполнительных органов, трубопровода, гидравлических аппаратов регулирования, гидронасоса, электродвигателя, электрического силового преобразователя и системы управления.

Электродвигатель управляется электрическим преобразователем и приводит в движение объемный насос. В качестве объемного насоса используется аксиально-поршневой гидронасос (таблица 1), который сообщает энергию рабочей жидкости, обеспечивая необходимое давление и расход. Гидравлические аппараты – гидравкумулятор, переливные клапаны, предохранительные клапаны, распределители и т.д. – формируют необходимые значения расхода и давления, а также реализуют управление исполнительными органами. В качестве исполнительных органов применяются гидроцилиндры. При изменении положения распределителя (например, поворотного распределителя рулевого управления), изменяется структура трубопровода, а рабочая жидкость подается под давлением в рабочую полость гидроцилиндра, вызывая при этом его перемещение. Сигналы задания электрического преобразователя формируются на основе требуемого технологического процесса, а также с учетом сигналов обратной связи о гидродатные (давления, токов, напряжений, скорости, температуры, давления, уровня жидкости и т.д.).

21

Таблица 1.1. Рабочие характеристики насоса 313.2.28.390.5

VO
, см³
3
П,
Об/мин
р
ном
МПа
Pном,
кВт
Оном,
л/мин
КПД
подачи
КПД
полная
28 1920 20 18,5 51 0,95 0,90
В исследуемой системе частота вращения электродвигателя определяется из выражения
0
1000
0
Vn
Q
, (1.3)
где VO
– объем рабочей камеры гидронасоса, см³
3
; n – частота вращения вала,
об/мин; Q – фактическая подача, л/мин;
0
«объемный КПД насоса.
За требуемое значение подачи при расчете необходимой скорости электродвигателя по выражению (1.3) принимается максимальное значение расхода в исполнительных механизмах, однако, как было сказано ранее, в режиме максимального потребления мощности гидравлическая система работает лишь часть технологического цикла. Основываясь на статистических данных и экспертных знаниях специалистов, эксплуатирующих рассматриваемую гидросистему, можно построить временную диаграмму типлого технологического процесса (маршрута), на котором можно определить основные качественные и количественные соотношения при работе в системе. На временной диаграмме (рис. 1.2) представлены графики основных технологических параметров в электрогидравлической системе: перемещение исполнительного органа у (шток гидроцилиндра); подача насоса, полезный расход исполнительных органов гидросистемы и расход через переливной клапан OH
OH
OP
, OPper
, соответственно; давление гидронасоса
р; МПа; мощность, отбираемая исполнительными органами гидросистемы и мощность гидронасоса PHO
и PН,
кВт. Момент на валу электродвигателя и угловая скорость вращения ротора M, Nm и n, об/мин соответственно,
22
определяются давлением и подачей гидронасоса. Мощность гидронасоса пропорциональна мощности электродвигателя с учетом КПД насоса. Кривые технологических параметров на временных диаграммах приближенно определяются следующими ниже соотношениями.
Рис. 1.3. Диаграммы работы гидравлической системы
Давление в системе
0
(
)
р
р р Q к Q р
, (1.4)
где
0
() р0 - давление в системе при заданном значении подачи, которое определяется конфигурацией гидросистемы и регулируется гидравлическими аппаратами; к
р
– коэффициент определяемый структурой трубопровода;
р
- внешние возмущения в системе вызванные неровностями поверхности земли, электромагнитными возмущениями, действующими на электрогидравлические узлы (электромагнитные клапаны) и т.п.
Расход исполнительного органа можно определить производной от перемещения штока с учетом геометрических параметров гидроцилиндра
q
du
Qк
dt
, (1.5)
23
где k
q
– коэффициент, определенный геометрическими размерами гидроцилиндра и поршня. Также стоит отметить, что относительно насоса расход гидроцилиндра увеличивается при перемещении штока не зависимо от направления, поэтому производная берется по модулю.
Момент на валу электродвигателя определяется в соответствии с выражением (1.1), а скорость двигателя – из выражения (1.2).
Мощность на валу электродвигателя определяется выражением (1.2), а мощность, отбираемую исполнительными органами, используя значения, рассчитанные по (1.4) и (1.5), можно определить по формуле
П
Ю
60
р Q к
р
, (1.6)
где k
П
– коэффициент меньше единицы, характеризующий падение давления по длине трубопровода и в направляющих узлах гидросистемы.
Анализ диаграммы технологического цикла показывает, что при отсутствии перемещений исполнительного органа расход системы минимален и равен величине утечек в гидросистеме (qУТ
,) , а давление в системе равно заданному значению. В таком режиме мощность, отбираемая исполнительными органами, тоже минимальна, так как работа не совершается, однако мощность на валу электродвигателя, которая равна потребляемой мощности гидронасоса, близка к номинальному значению, так как частота вращения вала электродвигателя равна номинальной (определяется требуемой подачей). Момент на валу тоже близок к номинальному значению, что определяется необходимостью поддержания в системе заданного давления. Излишки рабочей жидкости, которые выдает объемный насос, переливаются в сливную линию через специальный клапан. В результате излишняя мощность тратится на непроизводительную перекачку жидкости через переливной канал.
В момент времени, когда исполнительный орган начинает движение, расход в системе резко увеличивается. Вместе с увеличением расхода происходит некоторая просадка давления, объясняемая «инерстостью»
24
напорной характеристикой гидросистемы. В режиме движения исполнительного механизма отбираемая мощность увеличивается до максимальных значений, а мощность на валу электродвигателя практически не изменяется. Рабочая жидкость при этом протекает по основному напорному каналу гидросистемы, через направляющие распределители и гидроцилиндры.
Различного рода возмущающие ускоря, вызванные как внешними факторами относительно исполнительного органа, так и внутренними, вызывают определенные колебания давления (шум), которые вызывают кратковременные ударные нагрузки на валу электродвигателя.
Со стороны технологического процесса для качественной работы

исполнительного органа от электрогидравлической системы требуется как можно более точное поддержание давления, энергоэффективность, надежность и минимальные габариты. Однако в рассматриваемом объекте можно найти ряд неиспользованных возможностей, относительно указанных критериев. Из диаграммы видно, что наибольшая эффективность системы достигается при перемещении исполнительного органа, во время которого повышается полезная мощность, отбираемая рабочим механизмом, а мощность на валу электродвигателя значительно не меняется. Однако длительность таких режимов, на основании имеющихся статистических данных, составляет не более 30% от длительности технологического цикла (движения по маршруту). Для повышения точности поддержания давления существует много способов [45, 87], но дополнительные регулирующие гидравлические аппараты увеличивают габариты и вес всей системы и снижают надежность.

Обеспечить изменение мощности на валу объемного насоса и привести ее в соответствие с отбираемой мощностью возможно за счет регулирования частоты вращения вала электродвигателя. Применением регулируемого электропривода должно повыситься энергоэффективность всей электрогидравлической системы, снизить массогабаритные показатели,

25 повысить надежность и гибкость системы управления гидравлическими параметрами путей сокращения элементов гидравлической части.

1.5. Электропривод насосной станции объекта
В рассматриваемой системе в качестве электропривода объемного насоса применяется синхронный двигатель с постоянными магнитами в источнике бесколлекторного двигателя постоянного тока. Бесколлекторные **двигатели постоянного тока (БДПТ)** или вентильные **двигатели с постоянными магнитами** (в английской литературе Brushless DC-motor) представляют собой синхронную машину переменного тока с распределенной или сосредоточенной трехфазной обмоткой на статоре и с постоянными магнитами на роторе. Статор БДПТ подключен к трехфазному инвертору напряжения. В первый момент времени полупроводниковые ключи в преобразователе открыты таким образом, что потокоосцепление на статоре занимает определенную пространственную ориентацию по поперечному сечению машины. Взаимодействие потокоосцепления статора с потокоосцеплением постоянных магнитов ротора создает электромагнитный момент, под действием которого ротор начинает вращаться. Непрерывное вращение ротора обеспечивается системой управления инвертором напряжения. Несъемной частью БДПТ является датчик положения ротора, сигналы с которого поступают в инвертор и одновременно определяют состояние полупроводниковых ключей. При вращении ротора изменяется сигнал с датчика положения и ключи коммутируются таким образом, чтобы вектор потокоосцепления статора всегда опережал на определенный угол вектор потокоосцепления ротора. Скорость электродвигателя определяется значением напряжения на входе постоянного тока перед инвертором. Со стороны гидравлической системы к электроприводу предъявляются только требование стабильного поддержания скорости вращения вала объемного насоса, необходимой для технологического процесса.

26 Несмотря на то, что применяемое решение электропривода с БДПТ реализует поставленные задачи, существует ряд принципиальных проблем, которые возникли в процессе эксплуатации системы (Рис. 1.4.). Во-первых, это конструктивно-экономические факторы. Для реализации режима вентильного привода требуется специальный тип электрического преобразователя (коммутатора), который не производится серийно, а изготавливается на заказ наплатки, откуда вытекает относительно высокая стоимость и нестабильность качества изготовления. Другим фактором, связанным со стоимостью и надежностью системы является датчик положения ротора и соответствующие соединительные кабели, при неисправности которых электропривод оказывается неработоспособным.

Рис. 1.4. График набора нагрузки электропривода на базе БДПТ
Этот же фактор влияет на скорость ремонта, так как настройка датчика положения в рабочих условиях является трудоемкой. Во-вторых, БДПТ имеет значительную динамическую ошибку по скорости при удвоенном наборе нагрузочного момента (рис. 1.4.). Режим БДПТ позволяет довольно просто реализовывать систему подчиненного регулирования и

27 соответствующие принципы управления, которые предназначены для двигателей постоянного тока, однако при таком способе управления теряется одно из самых значительных преимуществ синхронного двигателя – абсолютно жесткая механическая характеристика. Для исключения статической ошибки по скорости требуются контуры регулирования тока и скорости, которые усложняют процесс проектирования и наладки системы. Некорректная настройка регуляторов системы управления приводит к тому, что изменения задания по скорости или возмущающие воздействия вызывают неэффективный режим электропривода, а иногда колебательность скорости, что негативно сказывается на технологическом процессе. При сбросе нагрузки из-за появления динамического момента и мягкости естественной механической характеристики электропривода скорость увеличивается, выход регулятора скорости изменяет задание практически до нуля с запаздыванием, регулятор скорости не формирует отрицательного значения и торможение происходит за счет оставшегося момента сопротивления. При снижении скорости до определенного значения ниже установленного возникает резкое задание на регулятор тока, что вызывает резкое возрастание скорости выше установленного и процесс повторяется. Колебательные процессы снижаются при наиболее оптимальной настройке регуляторов, но на объекте процесс наладки является одним из самых проблемных. Настройка электропривода производится в лаборатории на идеализированные средние параметры объекта. Но при интеграции с реальными установками проявляется расхождение в параметрах объекта управления, гидравлических аппаратов и т.д., а корректировка настроек регуляторов неадекватна в виду их аппаратной реализации. В итоге при эксплуатации объекта могут возникать нежелательные процессы с колебаниями технологических параметров (рис. 1.5.).

28 Рис. 1.5. Временные диаграммы работы насосной станции
В-третьих, для обеспечения наилучшей энергоэффективности, датчик положения ротора настраивается на работу в оптимальной точке, т.е. выставляется необходимый угол коммутации. При изменении скорости вращения ротора изменяется значение оптимального угла коммутации и энергоэффективность значительно сокращается и выходит за допустимые пределы.

Сформулированные проблемы и анализ объекта исследования указывают на необходимость разработки, с одной стороны, системы электропривода, которая, исключая недостатки существующей системы, обеспечивала бы реализацию технологических процессов и конструктивных требований, с другой стороны, наладки электрогидравлической системы, позволяющую расширять электропривод и параметры гидравлики в одном комплексе.

1.6. Требования к системе электропривода гидравлической системы
Реализация электрогидравлической системы, в которой решаются выделенные проблемы, сопровождается рядом технических требований. В первую очередь необходимо выделить требования по наладке и установке. Ввиду конструктивных особенностей конечного объекта, электродвигатель должен обеспечивать электромагнитный момент 95 Н*м,

29 при этом вписываться в установленные габариты, соответственно необходимо определить возможный тип электродвигателя.

Среди типов электродвигателей, которые в настоящее время получают широкое распространение в промышленности и в машиностроении, можно отметить асинхронные двигатели (Induction Motors), двигатели с постоянными магнитами (Permanent Magnet Motors), вентильно-индукторные двигатели (Switched Reluctance Motors), синхронные реактивные машины (Reluctance synchronous motor). Двигатели постоянного тока все реже применяются во вновь проектируемых регулируемых электроприводах, из-за их низкой надежности и невысоких показателей КПД.

Асинхронные электродвигатели являются наиболее распространенным типом двигателей в промышленности, доля их количества среди всех электродвигателей, по некоторым оценкам, составляет не менее 80%. Среди преимуществ асинхронных двигателей высокая надежность, экономичность, прочность, возможность достижения высоких качественных показателей за счет совершенствования систем управления, относительно высокое значение КПД, который в современных сериях асинхронных двигателей по стандартам NEMA (National Electrical Manufacturers Associations) в некоторых исполнениях превышает 90% [4, 24, 40, 43, 59, 67, 76]. Ограничивают применение асинхронных двигателей требования по частоте вращения вала двигателя, изменение критического момента при изменении скорости, инерционности и потери вызванные наличием обмотки на роторе.

Синхронные реактивные машины имеют достаточно большую историю (работы Кройшечка в 1871, Костюк в 1923), однако до недавнего времени не получали широкого распространения. Благодаря совершенствованию электрических преобразователей и технологий производства синхронные реактивные машины демонстрируют ряд преимуществ, такие как: простота и надежная конструкция ротора, достаточно высокая эффективность благодаря отсутствию обмотки в роторе, относительно низкий момент инерции ротора и широкие возможности регулирования. Вместе с этим, синхронные

30 реактивные машины отличаются низким коэффициентом мощности и ограничениями по скорости вращения ротора, а также необходимостью завышения мощности инвертора [8, 25, 38, 58, 99].

Также приобретает актуальность во многих промышленных отраслях Вентильно-индукторный двигатель (ВИД), который привлекает своей достаточно простой конструкцией и технологией производства, что обуславливает надежность данного типа двигателей [10, 68, 84]. Он также обладает потенциально низкой стоимостью и возможностью реализации сравнительно высоких скоростей вращения ротора, ввиду отсутствия обмотки и магнитов на роторе. Вместе с этим, для обеспечения качественного управления моментом и скоростью ВИД необходима

31 достаточно сложная высокопроизводительная цифровая система управления, стоит отметить также значительную нелинейность характеристики момента по отношению к току статора, высокие показатели шума и пульсации момента при работе электродвигателя.

Двигатели с постоянными магнитами широко известны как БДПТ и как синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). Несмотря на некоторые различия этих двигателей (в первом случае двигатель имеет трапециевидную форму ЭДС, а во втором – синусоидальную) их

32 преимущества и недостатки практически одинаковы [1, 5, 7, 12, 14, 17, 21, 27, 93]. СДПМ характеризуются высокими удельными показателями крутящего момента, высокими показателями КПД и коэффициентом мощности, широкими возможностями регулирования (высокие статическая точность и динамические показатели), а также большим диапазоном скоростей. К недостаткам СДПМ относятся относительно высокая стоимость, зависимость значения потока постоянных магнитов от температуры, сложность технологии изготовления и ремонта, затруднительное регулирование магнитного потока (только для определенного типа СДПМ).

Анализ ряда работ по сравнению различных типов машин в промышленных установках или объектах, в которых требуется высокая

33 энергоэффективность, наые габариты и высокие динамические характеристики показывает, что на текущий момент имеют преимущество синхронные двигатели с постоянными магнитами. Так, в статье [93] упоминается о преимуществах СДПМ (в пределах 80% рабочего диапазона КПД выше, чем у асинхронного двигателя на 1-2%) и приводятся примеры его использования в железнодорожном и автомобильном транспорте. Например, СДПМ использовались на электропоезде TGV V150 компании Alstom, установившего в 2007 мировой рекорд скорости колесного состава; упоминается об использовании СДПМ в двухэтажных поездах SBB TWINVIX Bombardier (Швейцария), трамвай-поезде SNCF Citadis Dualis Alstom (Франция), низкопольных трамвайных вагонах типа 1ST Škoda (Чехия), электропоездах серии 16000 Kawasaki метрополитена Токио (Япония) и др.

В работе [21] посвященной электроприводам в гибридном электропоезде изучается энергопотребление при различных стандартных тестах вождения. Показано, что вентильно-индукторный электропривод обладает преимуществами на высоких скоростях, но для использования таких преимуществ, требуется редуктор с высокой передаточной функцией, и предположение все-таки отдается СДПМ. В другой статье [40] также

34 исследуется электропривод гибридных автомобилей и сравниваются четыре типа электродвигателей: двигатель постоянного тока, асинхронный двигатель, вентильно-индукторный двигатель и СДПМ. Приводятся примеры применения асинхронных электродвигателей производства General Motors в США и Германии, однако всецело производители используют СДПМ. В

35 результирующем сравнении СДПМ имеет лучшие характеристики по удельным показателям и эффективности, хоть и проигрывает по технологичности и стоимости. Кроме сравнений в применяемых в гибридном электропоезде есть работы посвященные сравнению СДПМ и АД в гидравлических системах [7]. Показано, что в качестве электродвигателя погружных насосов одинакового типоразмера СДПМ имеет лучшие показатели КПД. Как в зарубежной, так и отечественной литературе [2, 8, 15, 20, 27, 58, 61, 74] отмечаются преимущества СДПМ перед другими типами электрических машин в установках, где требуется высокая энергоэффективность и малые габариты.

36 Таким образом, в целях удовлетворения технических требований, в рамках работы исследуется электропривод объемного насоса гидравлической станции МЛП на базе СДПМ. Более того, в существующей системе электропривода гидравлической станции МЛП двигатели с постоянными магнитами указанного типа уже эксплуатируются (ЭДЕН25 производства НПО «Электроншина», г. Челябинск).

С учетом анализа объекта и существующего электропривода можно выделить следующие требования к системе:

- минимальные габариты электропривода и конструктивное исполнение. Данное требование сводится к применению в составе электропривода существующего электродвигателя ЭДЕН25;
- исключение электропривода без датчика скорости и положения ротора. Необходимо для повышения надежности, скорости наладки и обслуживания;
- эффективность реализации. При совершенствовании электропривода необходимо, по возможности, использовать существующие в промышленности устройства в элементную базу. То есть в первую очередь адаптировать общепромышленные преобразователи. При невозможности применения общепромышленных преобразователей, разработка специального устройства должно осуществляться при минимальных затратах временных и финансовых ресурсов;
- регулирование скорости. При использовании нерегулируемого насоса подача будет определяться частотой вращения вала электродвигателя. Изменение подачи насоса в соответствии с отбираемой мощностью может повысить энергоэффективность установки. Электропривод должен обеспечивать диапазон скорости от 0,2n

n

до 1,2 n

n

;

– КПД электропривода в номинальной рабочей точке не ниже 90%, при регулировании скорости не ниже 85%. Для многоскоростных

37 авторемонтных платформ вопрос экономичности и длительности цикла

эксплуатация является особенно важным, поэтому необходимо добиться максимально возможной энергоэффективности во всем диапазоне регулирования скорости;

- поддержание скорости с нулевой статической ошибкой, динамическая ошибка не более 0% в номинальной рабочей точке. Стабильность поддержания скорости вращения электродвигателя позволяет поддерживать постоянную подачу объемного насоса, но так как насос работает на систему трубопровода и гидродвигателей, которые обладают собственными натуральными характеристиками, колебания подачи вызовут колебания давления, которые негативно сказываются как на технологическом процессе, так и на долговечности гидросистемы;

- робастность системы по отношению к изменению параметров, простота и скорость наладки. Наладка системы электривода невозможно

произвести на реальном объекте, поэтому целесообразно совершать ее с минимальным количеством операций. Нечувствительность к изменению параметров объекта позволит снизить необходимую точность в настройке системы управления.

1.7. Задачи исследования

Повышение энергоэффективности, разрешение практических и технологических проблем в существующей системе предполагает два блока задач. Первый блок касается связи электромеханической и гидравлической частей в комплекс и исследование взаимовлияний в частях МАП, а второй – исследование и разработка удовлетворяющего техническим и технологическим требованиям электропривода гидросистемы. На предварительном этапе предполагается, что обеспечить требования к электроприводу можно используя частотную систему управления СДПМ. Таким образом, требуется решение следующих задач:

34

- проанализировать и выбрать систему управления СДПМ, удовлетворяющую требованиям к электроприводу;
- разработать комплексную модель электропривода, объединенного с гидравлической системой;
- сформулировать методику наладки блока стабилизации частоты вращения СДПМ;
- определить условия повышения эффективности электропривода на базе СДПМ;
- разработать алгоритм поиска наиболее эффективных режимов работы электропривода;

- провести программное моделирование и экспериментальные исследования для подтверждения результатов исследования.

1.8. Выводы по первой главе

В настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:

- установлено, что существующее описание процессов взаимодействия между электроприводом и гидравлической частью недостаточно для проектирования регулируемого электропривода объемных гидросистем;
- установлено, что существующий электропривод на базе БДПТ имеет недостатки: наличие датчика положения ротора, недопустимое снижение КПД при регулировании частоты вращения ротора, чувствительность системы управления к изменению параметров объекта и регуляторов;
- сформулированы технические требования к электроприводу, которые обуславливают применение в составе электропривода СДПМ, а в качестве системы управления – частотный метод управления СДПМ.
- сформулированы задачи диссертационного исследования, обеспечивающие повышение эффективности работы и проектирования электропривода гидравлической системы МАП.

35

2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Математическая модель гидросистемы при регулировании скорости гидронасоса

Для исследования системы электропривода необходима информация об объекте управления: формируемые моменты в зависимости от скорости вращения вала рабочего органа, инерционные характеристики, требуемые скорости обеспечения технологического процесса и т.д.

Существующие модели гидравлической системы [45, 56, 79, 80, 92] разрабатываются в основном для исследования гидравлических процессов – анализа характеристик систем. Приводные двигатели (ДВС, электродвигатели) гидронасосов не включаются в математические модели, так как принимаются в качестве источников постоянной угловой скорости, не участвующих в процессах управления. Однако возможности современного электропривода позволяют реализовать дополнительный канал управления гидравлической системой, что требует расширения математического аппарата. При интеграции электропривода и гидравлики в одну электрогидравлическую систему требуются математические модели, которые позволят проводить анализ, в том числе, и со стороны электромеханической части. Такие модели позволяют сформировать новые методики управления гидросистемами по каналу электропривода и оптимизировать поведение гидравлической системы.

Для реализации задач объемного регулирования путем изменения скорости приводного электродвигателя гидронасоса необходима математическая модель гидросистемы, обеспечивающая исследование соотношений между гидравлическими параметрами, скоростью приводного двигателя и моментом на валу гидронасоса.

Гидравлическую схему рулевого управления упрощенно можно представить в соответствие с рис. 2.1.

36

Рис. 2.1. Упрощенная гидравлическая схема рулевого управления МАП

На гидравлической схеме блок 1 – объемный гидронасос; 2 – переливной клапан; 3 – поворотный распределитель, который имеет вращающуюся втулку и золотник; 4 – гидроцилиндр; 5- механическая связь гидроцилиндра и распределителя.

Указанная система представляет собой сложную гидравлическую систему. Объемный гидронасос обеспечивает постоянную подачу рабочей жидкости в систему. Поворотный распределитель связан механически с гидроцилиндром таким образом, чтобы при определенном отклонении руля о угол поворота втулки B, определенный отсчетом штока гидроцилиндра, поворачивало задние рули. Причем различие между отклонением руля и поворотом втулки – у определяет скорость движения штока гидроцилиндра. Соответственно угол φ определяет сечение окна распределителя, через которое протекает рабочая жидкость и приводит в движение поршень гидроцилиндра. Поворотно клапан ограничивает давление в системе. Так как в исходном состоянии угол φ ($\varphi=0$) равен нулю, то и расход рабочей жидкости системы ОС

равен нулю, однако подача гидронасоса не равна нулю, что свидетельствует о невыполнении уравнения расходов и теоритически вызвало бы непрерывный рост давления в трубопроводе. На практике рост давления будет вызывать рост утечек и достижение равновесного состояния, но при значительной перегрузке трубопровода и гидронасоса. Для ограничения давления в системе применяются переливные клапаны,

37

открывающиеся при достижении в системе определенного значения давления и обеспечивающие дополнительный расход рабочей жидкости. Изменение угла руля ϕ приводит к появлению рассогласования u и открытию распределителя. Рабочая жидкость начинает протекать через трубопровод к определенной камере гидроцилиндра. Изменение положения гидроцилиндра вызывает поворот втулки распределителя до угла задания ($0-\phi$). При открытии окна распределителя давление в системе снижается, и переливной клапан 2 закрывается, при этом большая часть подачи насоса идет на перемещение поршня гидроцилиндра. В установившемся режиме давление опять повышается и открывается клапан.

Процессы в системе можно представить в виде структурной схемы изображенной на рисунке 2.2.

Рис. 2.2. Структурная схема гидравлической части

При составлении математической модели принималось, что жидкость является несжимаемой, стенки трубопроводов абсолютно жесткие,

38

рассматриваются системы с короткими трубопроводами, т.е. отсутствуют потери по длине трубопровода.

Входом системы является угловая частота вращения приводного электродвигателя. Подача насоса определяется угловой частотой вращения вала и объемом рабочей камеры насоса. Поэтому передаточную функцию W1 можно записать из выражения для подачи

3

```
HO  
10  
V  
Q V n  
,  
3  
11  
( ) 10  
V  
W р V k  
(2.1)  
где n  
V  
– объемный КПД насоса.  
Первый сумматор характеризует уравнение расходов системы. Подача насоса равна сумме расходов рабочей жидкости через гидроцилиндр, через переливной клапан и утечки в системе и определяется уравнением  
H C C1 y1  
Q Q Q Q . (2.2)  
где ОС  
– расход через систему гидроцилиндров; ОСП  
– расход через переливной клапан; Оут  
– расход, определяемый утечками в системе.
```

Перемещение поршня гидроцилиндра определяется интегралом расхода рабочей жидкости и геометрическими параметрами гидроцилиндра, что можно определить как

```
1  
C  
ц  
yO  
A  
,  
1,  
C  
ц  
Q  
у  
Ap  
, 2  
2  
1  
( ) W р  
Tr  
, (2.3)  
где Aц  
– площадь поршня гидроцилиндра; T  
2  
– постоянная времени второго звена.  
Звенo W3  
определяет механическую связь между рабочим органом и поворотным распределителем, а представить его можно коэффициентом усиления, зависящим от геометрических параметров связи
```

```
33  
( ) W р k . (2.3)  
Коэффициент k  
3  
имеет размерность м  
-1  
так как связывает угловое перемещение распределителя с линейным перемещением штока.  
Динамическая составляющая давления в системе определяется уравнением движения поршня гидроцилиндра и его массовыми
```

```
39  
характеристиками, а статическая составляющая – натурной характеристикой гидросистемы и регулируется переливным клапаном. Уравнение движения поршня можно представить в виде  
( )  
ц п по  
pA m m y u , (2.4)  
где  $\lambda$  – коэффициент вязкого трения в звене гидроцилиндра; mп  
– масса подвижных частей; mрр  
– приведенная к поршню масса масла в трубопроводах, соединяющих гидропривод с цилиндром. Тогда передаточную функцию четвертого звена запишем
```

```
4 4 4  
( ) ( ) ( ) W р k T р r , (2.5)  
где коэффициент усиления  
ц  
с A ; постоянная времени  
( )  
п пр  
T m n .
```

Моделирование возмущающих скачков давления в системе, вызванных неровностями поверхности движения платформы, и неидеальной работой гидравлической системы производится с помощью параметра P0

Натурная характеристика системы представляется в виде произведения сигналов звена 5 и 6. Направление потока рабочей жидкости определяется распределителем, поэтому, представив его в виде звена с натурной характеристикой, зависящей от рассогласования между отсчетом задания и фактическим поворотом рулевого механизма, можно получить значение падения давления в системе при полностью открытом распределителе и при изменении угла рассогласования. Передаточную функцию звена 5 представим в виде квадратичной зависимости так, что

```
2  
55  
p k Q ,  
5  
( ) ( ) W р f Q , (2.6)  
Работу распределителя можно представить произведением выхода пятого звена на коэффициент, определенный выходом шестого звена и зависящий от рассогласования. Передаточную функцию шестого звена представим в виде коэффициента
```

40

56

*

6

1
 () W p k
 k
 (2.7)
 коэффициенты усиления k
 5
 и k
 6
 в выражениях (2.6), (2.7) определяются
 эмпирически так, чтобы при рассогласовании равному нулю падение
 давление в системе было максимальным, а при максимальном
 рассогласовании падение давления Pn
 в системе соответствовало параметрам
 распределителя.
 Заенон семь представлена характеристика переливного клапана. Клапан
 работает таким образом, что не пропускает рабочую жидкость при давлении
 ниже, чем определенное установившееся значение, а затем с ростом давления
 расход через клапан линейно нарастает [140]. Заенон также можно
 представить утечки, которые присутствуют в системе в виде линейной
 зависимости от величины давления. Поэтому клапан можно представить
 системой уравнений
 7.1
 7.2 7.3
 , если
 , если
 С1 Ут 3
 Q Q к P P P
 Q Q к P P P
 (2.8)
 где k
 7.1
 – коэффициент, определяющий утечки в системе при росте
 давления; k
 7.2
 – коэффициент, определяющий изменение подачи через клапан
 в зоне давлений выше заданного; k
 7.3
 – коэффициент определяющий точку
 соприкосновения двух прямых роста расхода.
 Для получения момента на валу электродвигателя необходимо
 использовать значение давления и в соответствии с выражением (1.1)
 передаточную функцию можно будет записать как
 0
 88
 ()
 2
 M
 V
 W p k
 (2.9)
 Таким образом, структурная схема, изображенная на рисунке 2.2 и
 представленная уравнениями (2.1)-(2.9) позволяет определить моментные
 нагрузки на валу электродвигателя и исследовать зависимости между
 41
 технологическими параметрами гидросистемы и параметрами
 электропривода.
 2.2. Структурная схема и компьютерная модель
 электрогидравлической системы с СДПМ
 Уравнения СДПМ вытекают из общезвестных уравнений для
 обобщенной двухфазной машины в системе координат d-q.
 Так как система управления на предварительном этапе принимается
 скалярной, изменение угла нагрузки при постоянной амплитуде напряжения
 статора можно учесть, записав проекции вектора напряжения через синус и
 косинус угла нагрузки.
 Угол нагрузки определяется интегралом разности угловой скорости на
 валу электродвигателя и угловой частоты вращения магнитного поля статора.
 Используя уравнения для СДПМ в форме Коси, уравнения для задания
 напряжения и угла нагрузки получим систему уравнений
 0
 0
 0
 0
 11
 sin
 11
 cos
 3
 ()
 2
 ()
 sd s
 s sd эл sq
 sd sd sd
 sq
 s
 s sq эл sd
 sq sq sq
 sd sd sd PM
 sq sq sq
 эл p sd sq sq sd
 эл C
 эл p
 эл
 P
 dI R
 UI
 эл L L L
 dI R
 UI
 эл L L L
 LI
 LI
 M Z I I
 d
 J M M
 эл
 Z эл
 2
 (2.10)
 где
 sd
 I,
 sq
 I
 - проекции тока статора на оси d и q;
 sd
 -
 sq
 - проекции
 потокоцепления статора на оси d и q;
 PM
 - потокоцепление создаваемое
 42
 постоянными магнитами;
 s
 R - активное сопротивление обмотки статора;
 sd
 L,
 sq
 L - индуктивности по продольной и поперечной осям; ш0эл
 – угловая
 частота переменного напряжения статора электродвигателя; Z
 p
 – число пар
 полюсов; Mэл
 – электромагнитный момент создаваемый электродвигателем;
 MC
 – статический момент, создаваемый технологическим объектом; J –
 суммарный момент инерции; β – коэффициент характеризующий упругость
 электромагнитной связи статора и ротора; Ω – угловая частота вращения вала
 электродвигателя.
 Объединяя структурные схемы гидравлической системы (рис.2.2)
 структурную схему электродвигателя (система уравнений 2.10) получим
 структурную схему электропривода гидравлической системы (рис.2.3).
 Рис. 2.3. Структурная схема комплексной модели электрогидравлической
 системы на базе СДПМ
 43
 Разработанная комплексная модель электрогидравлической системы
 позволяет на этапе проектирования исследовать связи электрической и
 гидравлической части и заранее определять параметры составных элементов
 систем для обеспечения технических и технологических требований. В
 отличие от существующих гидравлических моделей скорость вала
 гидронасоса не принимается постоянной, а зависит от частоты вращения
 электродвигателя. С другой стороны, для точного проектирования
 электропривода, модель позволяет определять нагрузки, при которых
 функционирует электропривод. Висель разработанная структурная схема
 позволяет создать компьютерную модель и количественно оценивать
 технологические процессы.
 На основании структурной схемы комплексной математической модели
 электрогидравлической системы (рис.2.3) была разработана компьютерная
 модель в программном приложении Matlab Simulink (рис. 2.4.).
 Рис. 2.4. Компьютерная модель электрогидравлической системы
 44
 Компьютерная модель позволяет формировать определенную программу
 движения МАП путем изменения задания угла поворотного механизма
 (руля), но при этом есть возможность воздействия на задание частоты
 вращения приводного электродвигателя. К основным выходным
 координатам, которые компьютерная модель позволяет фиксировать
 относятся: угол поворотного механизма (колеса), давление и расход рабочей
 жидкости, момент сопротивления и угловая скорость электродвигателя.
 Модель позволяет регулировать коэффициенты характеризующие параметры
 гидродинамики, переливного клапана, напорной характеристики
 гидросистемы.
 2.3. Повышение эффективности гидросистемы МАП с помощью
 комплексной модели электрогидравлической системы
 Работа электрогидравлической системы представлена на рисунках 2.5-
 2.7. При номинальной частоте вращения вала электродвигателя (рис. 2.5)
 система работает следующим образом. В момент разгона электродвигателя
 происходит быстрое заполнение системы гидравлической, затем в момент
 времени 2с происходит руление: угол задания руля отклоняется до
 номинального значения. Открывается поворотный распределитель и рабочая
 жидкость начинает протекать по исполнительному органу, создавая полезное
 усилие. В момент времени с 2 до 2.5 с, видно, как изменяется расход через
 переливной клапан и через исполнительный орган. Также можно
 зафиксировать изменение давления в системе при движении исполнительных
 органов и, соответственно, изменение момента нагрузки электродвигателя.
 На диаграмме мощности видно, что большую часть работы механизма,
 когда не происходит руления, система практически не выдает полезной
 мощности, но потребленная мощность при этом близка к номинальной.
 45
 Рис. 2.5. Работа гидросистемы при номинальной скорости двигателя
 При пониженной скорости электродвигателя (рис. 2.6) система работает
 по схожему алгоритму, но изменяется скорость отработки задания по углу
 отклонения поворотный механизм сильнее – отстает от руля, что негативно
 сказывается на эксплуатационных характеристиках. Кроме этого, в момент
 руления происходит провал давления в системе, что также негативно
 сказывается на работе МАП. Однако при пониженном задании частоты
 снижается мощность снимаемая с электродвигателя и соответственно
 интегральной КПД за рабочий цикл повышается.
 Рис. 2.6. Работа гидросистемы при пониженной скорости двигателя
 46
 На основе анализа временных диаграмм работы эксплуатируемой
 системы и сопоставления их с приведенными результатами моделирования,
 можно сделать вывод о соответствии процессов моделирования процессам,
 проходящим в эксплуатируемой системе.
 С помощью разработанной компьютерной модели можно показать, что
 при такой характеристике электродвигателя возникает смена подачи
 рабочей жидкости, что может приводить к дополнительному износу
 гидрооборудования. Учитывая особенности работы системы при
 номинальной и пониженной скорости электродвигателя, логичным
 оказывается переход к регулированию его частоты вращения, что обеспечит
 повышение энергоэффективности системы в целом. Разработанную модель
 можно использовать при исследовании и разработке методов регулирования
 частоты вращения электродвигателя в гидросистеме.
 Для исследования потенциала компьютерной модели и проверки идеи
 повышения эффективности с помощью регулирования скорости
 электропривода был создан релейный регулятор давления. В регуляторе
 устанавливается требуемый уровень поддержания давления, для значения
 скорости – при давлении выше заданного значения и ниже, и для значения
 темпа изменения скорости – при изменении задания с пониженной скорости
 на повышенную и наоборот.
 На рисунке 2.7 представлена работа гидросистемы при регулировании
 скорости. В первоначальный момент времени давление в системе быстро
 возрастает и двигатель переходит на пониженную скорость, но при нагрузке
 давление падает, и задание на электродвигатель увеличивается. Давление
 вновь выходит на заданный уровень. Необходимое давление поддерживается
 на всем интервале руления с номинальной скоростью в отличие от системы,
 работающей с пониженной скоростью (рис. 2.6). КПД системы в неактивных
 режимах работы повышается: потребляемая мощность двигателя – 3,5 кВт в
 неактивном режиме против 11 кВт в системе без понижения скорости.
 47
 Рис. 2.7 Работа гидросистемы при регулировании частоты вращения насоса
 Вариация задания скорости вращения может позволить повысить
 эффективность электропривода гидросистемы, но практически не изучена в
 существующей литературе. Отсутствуют методики, которые определяли бы
 правила регулирования скорости с учетом динамических моментов разгона и
 торможения электродвигателя. На диаграммах (рис. 2.7) видно, как при
 работе гидродвигателя возникает колебания давления и подачи в
 системе, что на двигателе отразится в колебаниях скорости и момента
 сопротивления. Представленная модель позволяет сформулировать условия и
 методику регулирования скорости электродвигателя в составе гидросистемы.
 Стоит отметить, что выявленное преимущество в регулировании скорости
 затрудняет применение существующего электропривода. Согласно

подаваемых напряжений, состоящих из тридцати шести ячеек.

На вход релейного регулятора подается требуемое расчетное значение электромагнитного момента. Значение потокоуспления, которое подается на вход соответствующего регулятора, определяется выражением

$$i = I_{\text{н}} \cdot \left(\frac{U_{\text{н}}}{U} \right)^2 \cdot \left(\frac{M}{M_{\text{н}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 \quad (2.14)$$

Каждый из шести возможных векторов напряжений способствует увеличению или снижению магнитного потока и электромагнитного момента. Если заданное значение больше или меньше оцененного значения, то на выходе релейных элементов формируется комбинация, определяющая требуемый вектор напряжения статора.

Электропривод с прямым управлением моментом обеспечивает лучшие динамические показатели по сравнению с векторным управлением благодаря непосредственному воздействию на электромагнитный момент и потокоусплнению синхронного двигателя. Кроме того электропривод обеспечивает высокое значение момента на малых скоростях. В ряде работ отмечается, что ПУМ обладает более низкими потерями переключений силовых ключей и требует меньше вычислительных затрат чем векторное управление. Однако стоит отметить, что из-за приложеня вектора напряжения с фиксированной амплитудой при ПУМ появляются большие

пульсации момента, которые могут ухудшать энергетические характеристики электропривода [5, 28, 31, 33, 42].

Существует вариант системы управления двигателями с постоянными магнитами при его питании источником постоянного напряжения, при этом двигатель работает как бесколлекторный двигатель постоянного тока. Для работы в режиме БДПТ двигатели с постоянными магнитами изготавливаются с сосредоточенной обмоткой на статоре и трапецидальным полем, что обуславливает применение специального коммутатора для управления.

Физически для управления БДПТ используется такой же инвертор напряжения, как и для синхронного двигателя, однако принципиально отличается управление ключами: импульсы управления формируются непосредственно от сигналов датчика положения ротора, что позволяет реализовать принцип самосинхронизации ротора. Управление и основные соотношения в БДПТ практически соответствуют двигателю постоянного тока, только функция коллектора выполняет электронная схема или микропроцессор.

Как и в двигателе постоянного тока, скорость вращения ротора определяется напряжением на заеме постоянного тока и нагрузкой на валу. Механическая характеристика БДПТ не является абсолютно жесткой как у синхронного двигателя [14].

ЭДС двигателя и Φ электромагнитный момент как и в двигателе с постоянным током пропорциональны соответственно скорости электродвигателя с коэффициентом пропорциональности k

$$E = k \cdot \omega$$

В произвольном положении ротора ось его вектора потокоуспления направлена в соответствии с расположением постоянных магнитов. Электронный коллектор (коммутатор) строится таким образом, чтобы сигнал с датчика положения ротора обеспечивал включение таких ключей силового инвертора напряжения, при работе которых вектор потокоуспления статора

будет отклонен от вектора потокоуспления ротора на определенный угол δ соответствующий, так называемому углу коммутации (электрический угол отклонения ротора от первоначального положения, при котором происходит смена состояний силовых ключей инвертора). В зависимости от требуемого направления вращения ротора одному и тому же положению ротора могут соответствовать две комбинации включения силовых ключей.

Учитывая сложность БДПТ с двигателями постоянного тока, несложно реализовать систему управления двигателем по принципу подмененного регулирования с замкнутым контуром по току и скорости. Также одним из преимуществ такого способа управления является относительная простота регулирования скорости двигателя, отмечается также довольно широкий диапазон регулирования скорости – максимальный момент электрическая машина может развить уже с нулевой скорости. Однако в связи со скачкообразным изменением вектора подаваемого напряжения у БДПТ наблюдаются значительные пульсации тока и, как следствие электромагнитного момента. Пульсации электромагнитного момента вызывают ухудшение энергетических показателей электропривода, а также могут вызывать вибрации и повышенный износ оборудования.

2.5. Сравнение систем управления СДПМ
Для решения задач диссертационного исследования необходимо выбрать систему управления для СДПМ, которая наилучшим образом удовлетворяет работе технологического объекта. Выбор произведен на основании следующих критериев:

- надежность;
- стоимость;
- диапазон регулирования скорости
- быстрействие;
- энергоэффективность;

Известно, что надежность это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Так как надежность является комплексным свойством, включающим безопасность, долговечность, ремонтопригодность, сохранность, для характеристики той или иной технической системы могут потребоваться разные составляющие надежности. Например, для неремонтопригодных систем основным свойством надежности становится безотказность [113]. Надежность систем является вероятностной характеристикой и поэтому изучается с помощью теории вероятностей и математической статистики. Показатели надежности определяются аналитически на основании логических формул и по результатам испытаний и наблюдений. Так как надежность необходимо оценить еще до реализации и эксплуатации систем, оценка надежности на этапе проектирования производится на модели реальной системы. Модель системы не обязательно полностью отражает все ее свойства, но помогает с определенной точностью оценить надежность всей технической системы, используя определенные соотношения между надежностью ее элементов.

Для сравнения надежностей систем можно использовать коэффициентный метод надежности, при котором надежность элемента системы определяется выражением

$$R_i = 1 - \lambda_i \cdot t \quad (2.15)$$

где λ – интенсивность отказов i -го элемента; λ

– интенсивность отказов базового элемента (интенсивность отказов которого достоверно известна).

При коэффициентном методе подразумевается, что все факторы, влияющие на надежность системы, действуют одинаково на все элементы, поэтому интенсивности отказов λ

изменяются пропорционально.

Оценку надежности технического объекта можно произвести на основании выражения

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.16)$$

где n – число элементов системы; R_i – число элементов с коэффициентом надежности k

Для приближенной оценки надежности системы управления электроприводом можно построить упрощенную модель, состоящую из

определенного количества последовательно или параллельно включенных функциональных блоков. Функциональным блоком или элементом системы может являться как аппаратное средство, так и программное обеспечение [147, 148].

Очевидно, что если принять интенсивности отказов элементов системы управления электроприводом одинаковыми при различных исполнениях самой системы управления (например, датчик тока примененный как при векторном управлении, так и при ПУМ), то надежность системы управления электроприводом можно будет оценить на основании количества элементов ее составляющих и отраженных в модели.

Модель надежности системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами строится на основании функциональных моделей этих же систем (рис. 2.10). Однако принципы построения моделей надежности несколько отличаются: если выход из строя элемента приводит к неработоспособности всей системы – такой элемент нужно считать соединенным последовательно. Если же выход из строя элемента не нарушает работоспособность системы – можно считать такой элемент включенным параллельно (элемент имеет резервирование). Для точного

определения надежности системы управления необходимо досконально определить все узлы и элементы, но в целях качественного сравнения в модель оценки надежности включались только основные блоки. Во всех моделях на вход подается сигнал задания частоты вращения двигателя, а последним блоком является формирователь импульсов управления силовыми полупроводниковыми ключами.

Рис. 2.10. Модель надежности различных систем управления СДПМ. Векторное управление (а), управление по принципу БДПТ (б), скалярное управление (в), прямое управление моментом (г)

Исследования Ш/управления СДПМ без демферной обмотки [32] показывают, что при превышении частоты задания более 15-20% от номинальной наступает неустойчивый режим работы и двигатель выходит из синхронизма. Для коррекции неустойчивых режимов и обеспечения условий синхронизации применяются специальные блоки компенсации задания частоты, которые обеспечивают стабильную работу СДПМ при Ш/управлении, однако несколько усложняют систему управления. Для более адекватной оценки надежности в сравнении с другими СУ решено использовать именно скорректированную систему управления, подробнее о которой будет сказано ниже.

В модели в отличие от классического скалярного управления, которое чаще всего состоит только из задания частоты и функционального преобразователя ГЧ, присутствуют блоки датчика тока (ДТ) и формирователя сигнала задания по частоте (ФЧ) – блок коррекции сигнала задания), Формирователь напряжения (ФПЧ/У) определяет связь между сигналом задания частоты и сигналом задания амплитуды питающего напряжения. Блок пространственно-векторного модулятора (ПВМ) формирует импульсы управления ГЧ. Векторное управление также представлено набором последовательно соединенных элементов, составляющих систему управления. Датчик скорости (ДС) необходим не только для обеспечения контура регулирования, но и для реализации координатных преобразований. Регулятор скорости (РС), датчик тока (ДТ), регулятор тока (РТ) – являются стандартным набором функциональных блоков векторного управления. Также в модель включены блоки прямого (БКПЧ) и обратного (БКПО) преобразования координат из системы abc в систему фcd. В модели векторного управления необходим блок компенсации перекрестных связей, однако для наглядности он опущен. Блок ШИМ – широко импульсной модуляция формирует импульсы управления ГЧ.

Для реализации прямого управления моментом необходим датчик скорости (ДС) и регулятор скорости (РС) для формирования сигнала задания по моменту. Стоит отметить, что для функционирования оценщика потокоуспления и электромагнитного момента (СДУМ) требуется не только информация о токе статора (ДТ), но и о питающем напряжении (ДН). Контроллер электромагнитного момента (КМ) и потокоуспления (КУ) представляют релейные регуляторы. К ним также можно отнести блоки функциональной связи между потоком и моментом, блоки ограничения и т.д. Блок таблицы напряжений (ТН) формирует импульсы управления ГЧ в соответствии с пространственным расположением текущего вектора напряжения статора и сигналов с регуляторов потока и момента.

Система управления БДПТ тоже требует наличия датчика скорости (ДС). В самом простом случае для реализации БДПТ требуется только сигналы с датчика скорости и блок таблицы переключений (ТТ), формирующий импульсы управления инвертором, однако такая система управления демонстрирует относительно низкие качественные характеристики. Поэтому, представленная модель соответствует системе управления БДПТ по принципу подчиненного регулирования и включает также регулятор скорости (РС), датчик тока (ДТ) и регулятор тока (РТ). Во всех представленных моделях последовательность блоков принята условной и не точно соответствует логике работы системы, а лишь демонстрирует зависимость всей системы управления от надежности каждого элемента. Стоит отметить, что в схемах, где используется датчик скорости, этот блок можно заменить оценщиком скорости, который, используя сигналы с датчика тока и математическую модель, определяет значение скорости. Однако такая замена с точки зрения модели надежности существенно не изменит общую оценку. Во всех выше приведенных моделях не отражены различного рода вспомогательные блоки – фильтры, сумматоры, цифро-аналоговые преобразователи и т.д., которые важнее учитывать скорее при определении абсолютной надежности систем управления, чем при их сравнении.

С учетом того, что в рамках настоящего сравнения предлагается степень надежности оценивать по количеству элементов системы управления, можно сделать вывод о выигрышных позициях Ш/управления СДПМ, которое имеет в составе четыре основных блока, что является минимальным значением среди всех СУ. Несмотря на то, что режим БДПТ представлен моделью из пяти блоков, отличие от скалярной системы управления, всетаки, значительное, что объясняется наличием датчика скорости. Датчик скорости резко понижает надежность системы, так как по данным [114] интенсивность отказов датчиков скорости на несколько порядков превышает интенсивность отказов датчиков тока. Однако при количественной оценке

надежности оказывается, что различия в надежности систем невелики. Так, регуляторы и функциональные преобразователи реализуются программно,

потому набор этих элементов можно свести к надежности одного блока – программного обеспечения. В таком случае отличие систем управления от скалярного будет в одном блоке. Отметим только, что количество преобразований и информационных потоков, вычислений и подпрограмм для реализации других систем управлений несколько выше, чем для скалярного управления. Различия в надежности прямого управления моментом и векторного управления как видно из модели невелики. В конкретных исполнениях тот или иной тип управления может демонстрировать лучшие показатели надежности, тем не менее, в целом можно считать векторное управление несколько надежнее, чем ПУМ.

Сравнение стоимости систем управления производилось на основании открытых данных в сети интернет, а также путем непосредственной связи с топ-менеджерами представительств ведущих мировых производителей. Так как компаниями не реализуются системы управления отдельно, сравнивалась стоимость преобразователей частоты реализующих определенные способы управления.

Ведущие отечественные и зарубежные производители преобразователей частоты имеют среди своей продукции серии для использования с синхронными двигателями и включают либо векторное управление, либо прямое управление моментом, однако такие решения имеют большую стоимость, чем преобразователи частоты общепромышленной серии. Преобразователи частоты со специальными скалярным управления для синхронных двигателей не были найдены, но, как показали экспериментальные исследования, такой режим можно реализовать, используя ПЧ общепромышленной серии. Стоимость ПЧ, конечно, меняется, однако соотношения между специальными сериями и общепромышленными сериями остаются практически постоянными (рис. 2.11). Так, преобразователи частоты

63 отечественной компании «Овен» серии ПЧВ3 [123], обладающие возможностью работы с СДПМ имеют стоимость в среднем на 15% выше чем ПЧВ1/2 – для обычных двигателей. Преобразователи компании Schneider Electric серии ATV71 имеют стоимость выше на 20% [138] у фирмы ABB преобразователи серии ACS800 и ACS850, имеющих программные приложения для синхронных двигателей, дороже преобразователей общепромышленных серии ACS330 на 23% [122]. Дороже также и преобразователи компании Siemens серии Sinamics S120 [118-120]. Стоимость

электронных коммутаторов для БДПТ значительно выше, так как они не выпускаются серийно. Сравнительная диаграмма стоимости преобразователей различных серий и производителей на мощность 11 кВт представлена на рисунке 2.5 [121-126, 12]. Стоит отметить, что некоторые производители электротехнических изделий вообще не имеют преобразователь частоты для синхронных двигателей.

Рис. 2.11 Сравнение стоимости преобразователей различных серий
С точки зрения экономической эффективности использование даже самого дорого преобразователя, но который уже выпускается, будет экономически эффективнее, чем разработка нового, специального. Оценка регулирования скорости, по сути, представляет собой сравнение диапазона скоростей – регулирование вниз и вверх от номинальной скорости, а также оценку статической ошибки под нагрузкой.

64 На малых скоростях при скалярном управлении проявляется влияние активного сопротивления статора, что вызывает изменения потокоцепления и некоторое снижение электромагнитного момента при стандартном способе управления. Для исправления такой ситуации применяются специальные законы изменения напряжения на малых скоростях, но результат, тем не менее, не всегда отвечает необходимым требованиям. Регулирование вверх от номинальной скорости сопряжено с необходимостью повышать допустимое напряжение электрической машины, либо использовать

электроника в режиме ослабления поля или постоянного момента, что несколько ограничивает диапазон регулирования. Статическая ошибка по скорости в электроприводах с СДПМ и U/f-управлении отсутствует, так как ротор вращается синхронно с полем [50, 65]. При векторном управлении проблемы низких скоростей решаются за счет формирования потокоцеплений, соответствующих требуемому электромагнитному моменту. С другой стороны, на малых скоростях возникает некоторые трудности с точным определением положения ротора.

Для решения этой проблемы применяются датчики скорости большей разрядности и специальные методы оценки положения ротора при малых скоростях [3]. Ограничения максимальной скорости соответствуют скалярному управлению. Статические ошибки возможны в электроприводе при некорректной настройке регулятора системы управления.

При работе СДПМ с системой прямого управления моментом достигаются высокие показатели диапазона регулирования скорости благодаря непосредственному формированию момента в электродвигателе. Особенности регулирования выше номинальной скорости соответствуют векторному и U/f-управлению. Среди серийно выпускаемых СДПМ номинальные частоты вращения достигают 6000 об/мин.

В режиме БДПТ двигатель достигает наилучших показателей диапазона регулирования, в таком режиме существует возможность развития номинального момента с нулевой скорости и работой на упор (с учетом 65 токоограничения). Максимальная скорость электродвигателей достигает 30 000-40 000 об/мин, а некоторые микроавтоматы специальных назначений имеют максимальную скорость до 100 000 об/мин. Недостатком БДПТ является мягкая механическая характеристика электропривода и необходимость построения дополнительных регуляторов.

Быстротойствие электропривода на базе двигателя с постоянными магнитами при различных системах управления можно оценить, исследуя реакцию на сброс/наброс нагрузки и время переходного процесса разгона или реверса от нуля до номинальной скорости.

Существуют исследования работы, демонстрирующие преимущества и недостатки различных способов управления. Сравнение скалярного управления и векторного способа [32, 36] показывает, что динамическая ошибка при набросе нагрузки при скалярном управлении значительно больше, более длительным оказывается и время переходного процесса при скалярном управлении, сопровождающегося, к тому же, колебательностью. Темп разгона при скалярном управлении ограничен условиями выведения из синхронизма и не позволяет достигать таких показателей, как при векторном управлении.

Сравнения между векторным управлением и прямым управлением моментом также вызывают значительный интерес среди исследователей. Эти два способа обладают высокими показателями быстротойствия, однако в работах [22, 28, 42, 139] часто не отдается предпочтение тому или иному способу управления. Принято считать, что благодаря более точному формированию электромагнитного момента при прямом управлении моментом, процесс разгона и соответствие скорости сигналу задания выполняется с большей точностью и меньшими временными затратами.

Например, переходный процесс реверса при прямом управлении моментом занимает меньше времени на 30-40%. С другой стороны, реакция на наброс нагрузки лучше при векторном управлении. Так, динамическая ошибка по скорости может на 20-30% быть меньше чем при ПУМ.

66 Сравнения в части быстротойствия показывают, что управление в режиме БДПТ несколько проигрывает управлению в режиме СДПМ в части реакции на наброс нагрузки. Кроме того, экспериментальные исследования варианта электропривода ЭДВН-25 (НПО «Электромшина») демонстрируют эти недостатки.

В части разгона и реверса БДПТ, с другой стороны, показывает высокие результаты, сравнимые с векторным управлением и ПУМ, но высоко динамичное задание по скорости в виде синусоидального сигнала, электроприводом не обрабатывается.

Различия систем управления с точки зрения энергоэффективности не так значительны, однако существуют некоторые принципиальные особенности, обеспечивающие энергоэффективность той или иной системы управления.

Для достижения максимальной энергоэффективности требуется во всех режимах работы электропривода (разгон, стабильная работа, реакция на наброс нагрузки и т.д.) обеспечивать наиболее выгодные соотношения между векторами потокоцеплений. Для реализации наиболее эффективных энергетических режимов существует четыре принципа управления указанными векторами:

- постоянные угол нагрузки (В=90° - ПУМ);
- максимум момента на ампер (ММАА);
- единичный коэффициент мощности;
- постоянный магнитный поток.

Управление по принципу ПУМ обеспечивает угол нагрузки равный 90° за счет управления вектором проекции тока статора по продольной оси i_d.

Основная задача при таком управлении поддерживать ток i_d =0. В таком случае достигается наибольшая энергоэффективность, однако для СДПМ у которых существует выраженная явность такое управление становится не самым эффективным, так как не учитывается реактивный момент электродвигателя.

67 При ММАА угол нагрузки, обеспечивающий минимум тока статора выражается через уравнение для электромагнитного момента с учетом реактивного момента, создаваемого за счет неравенства между индуктивностями L_σ

и L_σ.

(2.11). Если дифференцировать выражение (2.11) и определить экстремум функции момента, то получим два значения угла нагрузки, при котором обеспечивается максимальное соотношение между моментом и током. Формулы при определенном электромагнитном моменте проекции токов i_d

и i_q так, чтобы поддерживался необходимый угол нагрузки можно добиться максимальной энергоэффективности СДПМ с явностью ротора.

Методы поддержания единичного коэффициента мощности и постоянного магнитного потока в электродвигателе также опираются на основные уравнения электромашин и сводятся к выражениям для угла нагрузки.

Таким образом, реализация того или иного принципа энергоэффективного управления обеспечивается управлением проекциями токов статора и поддержанием необходимого угла нагрузки. Наиболее полную такую возможность реализует векторная система управления, при которой проекции токов статора по продольной и поперечной осям регулируются непосредственно. Кроме того, при векторном управлении применяется система пространственно-векторной модуляции, формирующая управляющие импульсы на инвертор, а также обеспечивающая минимальные пульсации момента двигателя [42].

Прямое управление моментом несколько проигрывает векторному управлению из-за появления высших гармоник токов и относительно больших пульсаций моментов. При U/f-управлении также существует возможность реализовать вышеописанные принципы энергоэффективного управления, однако в переходных процессах изменения скорости или нагрузки влекут за собой изменения потокоцепления и электрическая машина может оказаться перевозбужденной или недо возбужденной, что

68 влечет за собой рост потерь мощности [36]. В режиме БДПТ энергоэффективность системы управления становится несколько хуже, чем при векторном управлении, что объясняется несинусоидальностью питающего тока и трапецеидальной формой ЭДС [22].

Учитывая выше сказанное, среди всех систем управления в плане энергоэффективности можно выделить векторное управление, однако в ряде работ [5, 26, 33, 139] отмечается, что энергетические различия довольно малы и при определенных коррекциях, например, при соответствующей системе импульсно-фазового управления инвертором или коррективной наладке и настройке регуляторов, один из способов управления может демонстрировать лучшие результаты.

Не смотря на большое количество работ посвященных системам управления СДПМ, реализовать работоспособную систему на практике не просто. Новые методы и тонкости систем управления доходят до внедрения в серийных образцах преобразователей частоты достаточно долго. Промышленные компании чаще всего используют проверенные и надежные способы управления.

Внедрение СДПМ в промышленные установки ограничивается, помимо стоимости самого электродвигателя, необходимостью использования специальных преобразователей с программными приложениями для синхронных двигателей. Кроме того, преобразователи для БДПТ серийно практически не выпускаются, а изготавливаются мелкими партиями к специальным двигателям [124, 125, 130, 131], что вызывает некоторые повышения конечной стоимости электропривода.

Реализация векторного управления или прямого управления моментом хоть и достаточно изучена с теоретической точки зрения, однако фактически могут возникать трудности с наладкой и интеграцией в систему датчика скорости. Например, для работы системы датчик скорости должен обеспечивать точность определения положения около 3-4°, в то время как некорректное позиционирование датчика на валу уже может вызвать погрешности

69 определения положения и ухудшить работу системы. Непросто также реализовать бездискретную систему управления и использованием алгоритмов оценивания скорости, при которых возможны программные сбои, программные задержки, нужно учитывать изменение параметров электрической машины и т.д. При реализации системы управления необходима тонкая настройка регуляторов. Сложность системы влечет за собой необходимость в больших настройках и, соответственно, чувствительность к изменению этих настроек.

В отношении практической реализации, электропривод по принципу БДПТ имеет несколько лучшие условия. Так, например, для реализации дуголюбого исполнения БДПТ достаточно будет датчика положения с разрешением в 60°, который может быть основан на датчиках холла и уже установленными в двигателе при изготовлении электрической машины.

Согласно теории сложности систем [131, 132], упрощенно сложность можно определять количеством элементов, входящих в систему. Если сравнивать количество элементов с учетом функциональных схем, представленных на рисунке 2.10 векторное управление и ПУМ сложнее скалярного управления более чем на 70%, а управления БДПТ на 20%. Повышенная сложность системы повлечет за собой необходимость в больших сроках разработки, высокой квалификации инженеров и соответственно временных и финансовых затратах. Оценка сложности разработки субъективна. Для групп инженеров, имеющих опыт в разработке определенных систем управления (например, векторного), сравнительная сложность разработки другого способа управления может оказаться выше. Вместе с этим, при бездискретных исполнениях в программном обеспечении обязательно требуются

70 дополнительные блоки оценивания скорости и адаптации переменных, что увеличивает количество элементов системы. На сложность реализации

векторного управления косвенным образом указывает на количество патентов [153]. Систему частотного управления потенциально можно реализовать практически с любым преобразователем частоты, осложняют реализацию

70 необходимость в дополнительных корректирующих блоках, которые, тем не менее, легко могут быть интегрированы в систему. Частотное управление также имеет больший потенциал к нечувствительности к изменению параметров.

Сравнение систем управления двигателями с постоянными магнитами показывает, что наилучшими качественными характеристиками обладают векторное управление и прямое управление момента, однако они достаточно сложны в плане реализации и отладки, требуют точного датчика скорости либо дополнительных программных алгоритмов оценивания скорости и адаптации параметров электропривода. Режим БДПТ также имеет достаточно высокие показатели характеристик, однако уступает режимам для СДПМ по энергетике и надежности. Скалярное U/f-управление СДПМ обеспечивает приемлемый диапазон регулирований, нулевую статическую ошибку при этом преобразователи с таким режимом имеют относительно низкую стоимость и простую реализацию. В сочетании с несколько лучшей надежностью и низкой чувствительностью к изменениям параметров становится наиболее подходящим для сформулированных технических требований.

Отсутствие необходимости в датчике положения ротора и определения угловой скорости вращения делает скалярное U/f-управление наиболее привлекательным и простым с точки зрения практической реализации. Такая система управления является проще, даже с учетом дополнительных блоков коррекции [32].

Как ранее упоминалось, в работе рассматривается система электропривода с двигателем ЭДВН-25 разработанным НПО «Электроншина». Как показали экспериментальные исследования, совместно с серийным преобразователем частоты и со стандартными приложениями векторного управления для синхронных двигателей указанный двигатель не работоспособен, что объясняется несинхронизацией ЭДС двигателя и несоответствием модели СДПМ в преобразователе частоты

71 реальному двигателю. При разработке преобразователей и системы управления в них предполагается работа с электродвигателем определенного диапазона параметров. Электродвигатель ЭДВН-25 не вписывается в предполагаемые параметры из-за чего в режиме векторного управления при котором алгоритмы ориентации на модель электродвигателя, электропривода оказываются не работоспособны. На основании экспериментальных исследований было установлено, что с приложениями U/f-управления двигатель демонстрирует не худшие показатели управляемости и энергетике относительно управления тем же двигателем, но в режиме БДПТ. При реализации U/f-управления не использовался датчик положения ротора, что является преимуществом такого типа управления перед БДПТ.

С точки зрения технических требований необходимо обеспечить работу электропривода по возможности используя существующие устройства и аппараты. Если реализовать электропривод не удается с использованием существующих устройств – разработка должна занимать минимальное количество временных и финансовых ресурсов. Поэтому вывод относительно сравнения систем управления делался в проекции текущей реализации и потенциального проектирования. С точки зрения текущей реализации управление БДПТ не удовлетворяет требованиям. Более того, при анализе комплексной электрогидравлической модели определено, что для повышения энергоэффективности гидросистемы необходимо регулирование скорости. Однако при регулировании скорости существующего электропривода с БДПТ происходит значительное снижение КПД до 60%. Экспериментальные исследования работы электродвигателя с общепромышленным преобразователем частоты (Schneider Electric Ativar 71) в режиме векторного управления обнаружили неработоспособность электропривода. Двигатель периодически не запускается, либо работа оказывается некорректной со значительным замедлением тока статора. При работе в скалярном режиме с тем же преобразователем частоты отмечалась высокая работоспособность:

72 поддержание скорости с нулевой статической ошибкой, незначительная динамическая ошибка, относительно высокое КПД в требуемом диапазоне регулирования скорости [95, 143]. Вместе с этим было обнаружено, что при определенной настройке на рабочую точку можно повысить эффективность работы электропривода. В проекции потенциальной разработки преобразователя наилучшими регулировочными и энергетическими свойствами обладает векторное управление, однако для объекта не менее важным оказываются требования по разработке, которые лучшим образом удовлетворяет скалярное управление. Векторное управление для исследуемого объекта обладает избыточными характеристиками качества. Кроме того, скалярное управление имеет потенциально меньшую чувствительность к вариации параметров («глубоость»), что дает дополнительное преимущество при выборе системы управления.

Таким образом, в дальнейшей работе исследуется скалярное, U/f-управление электродвигателем гидромосса. Для дальнейшего решения задач исследования необходимо, с одной стороны, определить алгоритмы наладки электропривода, обеспечивающие наилучшую энергоэффективность с использованием существующего ПЧ, с другой стороны, необходимо устранить недостатки скалярного управления для разработки специального преобразователя частоты.

7.6. Выводы по второй главе

В настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:
- разработана комплексная математическая модель электрогидравлической системы, учитывающая взаимовлияние гидравлической и электрогидравлической частей друг на друга, отличающаяся возможностью регулирования гидравлических параметров за счет скорости вращающего электродвигателя;

73 - разработана комплексная компьютерная модель электрогидравлической системы, обеспечивающая исследование режимов работы электропривода в составе гидравлической системы МАП, включающая релейный регулятор давления гидросистемы через канал изменения скорости электродвигателя. Компьютерная модель улучшает процесс наладки благодаря возможности прогнозирования реакции системы на изменения электропривода;
- проведено моделирование, показывающее возможность повышения энергоэффективности гидравлической системы. Для повышения эффективности гидросистемы необходимо, чтобы электропривод обеспечивал номинальную частоту вращения гидромосса в момент «руления», а при отсутствии нагрузки - вращение с пониженной скоростью;
- проведен анализ и определены преимущества и недостатки систем управления СДПМ с точки зрения надежности, стоимости, диапазона регулирования скорости, быстродействия, энергоэффективности, практической реализации;

- с учетом технических требований гидросистемы МАП для реализации электропривода гидросистемы реально использовать частотное U/f-управление СДПМ, которое обеспечит реализацию бездатчикового управления, относительно высокую надежность, доступность реализации, грубость к изменению параметров системы и возможность применения с существующими электродвигателями гидросистемы;

- для построения эффективного электропривода гидросистемы МАП необходимо устранить недостатки бездатчикового частотного U/f-управления СДПМ в части колебания скорости и выпадения из синхронизма, а также обеспечить возможность управления энергоэффективностью системы электропривода.

74

3. БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ СДПМ

3.1. Компьютерная модель СДПМ

Структура схемы электропривода гидросистемы представляет собой идеализированную систему. Как известно, без демпфирующих обмоток и при скалярном управлении два индугатора в прямом канале приводят к неустойчивому режиму. Однако в некоторых источниках отмечается теоретические способы формирования специальных корректирующих блоков для устранения нежелательных эффектов колебательности и выпадения из синхронизма. Практические методы и алгоритмы реализации таких устойчивых систем частотного управления не описываются.

В целях исследования и анализа неустойчивых режимов синхронного электропривода необходимо создать компьютерную модель соответствующую U/f-управлению СДПМ. Программная модель создавалась в приложении Matlab, с использованием стандартных блоков из пакетов Simulink и SimPowerSystem. Общий вид модели представлен на рисунке 3.1. В качестве модели электродвигателя с постоянными магнитами принимается базовая модель из библиотеки SimPowerSystem и обозначается на рисунке блоком PMSM EDBN25_Sin. Уравнения блока электродвигателя приведены в файлах модели и соответствуют уравнениям (2.10) [141]. Параметры, которые программируются в блоке электродвигателя, являются: активное сопротивление статора - 0,15 Ом; индуктивности по продольной и поперечной осям - 1,48, 1,92, Гн; коэффициент пропорциональности по ЭДС – 0,196;

В

об ин

; момент инерции ротора 0,24,

кгм

2

; коэффициент вязкого трения – 0,005, Нмс; число пар полюсов - 2.

75

Рис. 3.1 Модель синхронного электропривода СДПМ с частотным управлением

76

Блок, который моделирует работу преобразователя частоты (ПЧ), является блок Cont_Ld. Входом блока ПЧ является задание на угловую частоту вращения вектора напряжения статора (w) и задание на амплитуду вектора напряжения (U_nom). Для установки начального соотношения между векторами проекций напряжения статора на продольную и поперечную оси применяются блоки Ud, Uq. Данный блок можно использовать также в составе системы векторного управления, чем объясняется наличие входа задания углового положения вектора напряжения (Alpha). На выходе блока моделируется симметричное трехфазное напряжение соответствующей амплитуды и частоты (Ua, Ub, Uc). На рисунке 3.2 показано соответствие параметров линейного напряжения Uab заданным значениям частоты и амплитуды.

Рис. 3.2 Работа блока моделирующего ПЧ

77

Блок задатчика интенсивности (Zadatchnik1) формирует задание на угловую частоту вращения вектора напряжения статора с требуемым темпом нарастания сигнала. В базовой варианте модели задание на амплитуду напряжения статора формируется пропорционально частоте, реализуется закон управления U/f = const. Блокem Uq2 устанавливается значение напряжения при частоте 50Гц.

Нагрузку на электродвигатель можно формировать либо скачкообразным сигналом, с регулируемым темпом нарастания (Zadatchnik2), либо применяя плавное нарастание сигнала для снятия статических характеристик (Ramp). В значительной части модели присутствуют блок измерения сигналов токов статора (SimTeetz), который отображает ток-фазы А статора электродвигателя, а также проекции токов статора I

d

и I

q

на продольную и поперечную оси соответственно. Измерительный блок механической части (Mechanic) отображает совмещенные сигналы угловой частоты вращения ротора и задания угловой частоты вращения, совмещенное значение нагрузочного момента сопротивления и значение электромагнитного момента электродвигателя, совмещенные сигналы входной активной электрической мощности (P_m) и механической мощности на валу электродвигателя (P_out). Еще, формирующий сигналы электрической и механической мощности (Power mes), использует для вычисления значения тока статора по поперечной оси I

q

, значение проекций напряжения статора Ud и Uq, значения угловой частоты вращения ротора Ω и электромагнитного момента двигателя Мэм

Таким образом, представленная модель позволяет исследовать работу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами совместно с преобразователем частоты, используемого в режиме U/f-управления. Компьютерная модель гидравлической системы на текущем этапе не рассматривалась.

Как известно [50, 63, 65, 82], синхронные двигатели с постоянными магнитами без демпферной обмотки представляют собой неустойчивую систему и имеют повышенную колебательность и склонность к выпадению из синхронизма. Указанные эффекты подтверждаются и в предлагаемой проектной модели (Рис. 3.3).

Рис. 3.3 Работа СДПМ со скалярным управлением без демпферной обмотки. Задание 40Гц

В моделируемых процессах на электродвигатель подавалось задание частоты 40 Гц с темпом 1,5 с. В момент времени моделирования 3 с происходил скачкообразный наброс нагрузки. Из диаграммы работы видно, что после завершения процесса разгона угловая скорость ротора начинает колебаться и амплитуда колебаний с течением времени возрастает. Наброс нагрузки не меняет характеров колебаний и в момент времени моделирования 4,4 с двигатель выпадает из синхронизма. Устойчивость работы электропривода зависит от значения заданной скорости [32]. В разомкнутой системе диапазон задания по скорости значительно ограничен. Так, устойчивой работы без обратных связей можно добиться лишь при значении задания не превышающем 15-17 Гц. На рисунке

3.4 представлены диаграммы работы электропривода с заданием 17 Гц. Видно, что процессы колебания скорости затухают, тем не менее, присутствуют колебания электромагнитного момента и угловой скорости ротора. Угловая скорость и задание скорости Электромагнитный момент и момент сопротивления

79

Рис. 3.4 Работа СДПМ со скалярным управлением без демпферной обмотки. Задание 17 Гц

3.2. Стабилизация СДПМ при скалярном управлении

Неустойчивая работа СДПМ при скалярном управлении значительно ограничивает возможности их использования. На практике такой способ управления не встречается, а применяются более сложные системы управления. Вместе с этим, скалярный способ управления несет в себе значительные возможности бездатчикового управления, а синхронный характер вращения ротора с полюс статора обеспечивает высокую точность поддержания скорости инвариантно относительно нагрузочных моментов. В целях сохранения преимуществ бездатчиковой системы управления, необходимо обеспечить самосинхронизацию СДПМ. Стабилизация при разомкнутом U/f-управлении предложена в работе [32]. Основным идею стабилизации заключается в изменении сигнала на задание по частоте питающего напряжения в зависимости от параметров электропривода.

Сформировать сигнал коррекции задания частоты можно, используя данные о скорости вращения ротора, входной электрической мощности

Угловая скорость и заданности скорости
 Электромгнитный момент и момент сопротивления
 80

электродвигателя, либо сигнал тока в звене постоянного тока при использовании преобразователя частоты.

Первый метод пропалагает наличие информации о скорости ротора, что подразумевает либо использование датчика скорости, либо сложных оценщиком. Формирование сигнала коррекции, используя данные о мощности или о токе, требует наличие датчиков тока, которые часто уже предусмотрены системой управления. Для определенности в работе используется метод, основанный на значении входной мощности электродвигателя.

Формирование сигнала стабилизации скорости ротора основывается на уравнении баланса мощностей, которое можно записать как

2

$$P_{эл} = P_{мех} + P_{пот}$$

где $P_{эл}$ – электрическая мощность подводимая к двигателю, Р_{мех} – мощность потерь, Р_{пот} – изменения запаса электромагнитной энергии, последнее слагаемое – выходная мощность на валу электродвигателя.

В установившемся режиме первые два слагаемых из уравнения (3.1) можно считать несменяемыми, тогда изменения мощности будет вызваны последним слагаемым. При таком допущении и подстановке в последнее слагаемое уравнения (3.1) выражения для электромагнитного момента из системы уравнений (2.10) можно записать колебания мощности в виде

22

$$\Delta P_{эл} = \Delta M_{эл} \cdot \omega$$

где $M_{эл}$ – момент нагрузки в установившемся режиме.

Тогда, если вариация заданной частоты питающего напряжения пропорциональна колебаниям мощности, получим

02л р

$$\Delta \omega = k \Delta P_{эл}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

81
 Переменная составляющая мощности может быть получена с помощью высокочастотного фильтра первого порядка, тогда выражение для колебания мощности можно будет записать как

1

$$P_{эл} = P_{мех} + P_{пот} + P_{ф}$$

и значение амплитуды напряжения статора.

Активная мощность вычисляется в соответствии с выражением

3

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi)$$

2

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi) \cos(\alpha)$$

В качестве напряжения статора можно взять значение задания на амплитуду напряжения в преобразователе частоты. Коэффициент $\cos(\alpha)$

представляет собой активное значение тока статора. Если ортогональную систему координат 0-0 ориентировать по вектору напряжения, то значение активного тока статора будет соответствовать проекции тока статора на поперечную ось q

2 2 2

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\gamma)$$

3 3 3

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\gamma)$$

82
 Рис. 3.5 Функциональная схема стабилизированного СДПМ с U/f-управлением

Видея разработанная компьютерная модель стабилизированного частотного управления СДПМ (рис. 3.6) получена из основной модели (рис. 3.1) путем добавления корректирующего устройства (рис. 3.7.), которое состоит из идеального дифференцирующего звена, апериодического фильтра и коэффициента усиления. Измеритель мощности, который в основной модели используется для информативных целей, в стабилизированной системе непосредственно участвует в формировании выходного сигнала корректирующего устройства. Сигнал по коррекции задания угловой частоты поступает на сумматор перед моделью преобразователя частоты.

83
 Рис. 3.6 Модель стабилизированного СДПМ с U/f-управлением

Рис. 3.7 Внутренний вид модели корректирующего устройства

Вычисление мощности в блоке «Power lines» осуществляется в соответствии с выражением

22

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi)$$

22

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi) \cos(\alpha)$$

22

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi) \cos(\alpha) \cos(\beta)$$

22

$$P_{эл} = U_{эл} I_{эл} \cos(\varphi) \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\gamma)$$

Основными параметрами корректирующего устройства являются коэффициент усиления k и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

и постоянная времени T

du
st
при работе
сигнале будет отрицательной. Блок определения направления должен формировать информацию для последующих блоков о необходимости реверсирования при поиске экстремума, а также информацию о соотношении знаков между производными тока и напряжения по времени.

95
Следующим элементом СЭР должен быть блок, который непосредственно будет формировать сигнал коррекции напряжения и выполнять функции ФСУ. В процессе изменения амплитуды напряжения статора возникает соответствующее изменение тока статора, которое характеризуется производной. Эта производная будет отлична от нуля, пока напряжение изменится с определенным темпом и рабочая точка не достигнет экстремума. Однако если считать, что для нахождения экстремума, напряжение должно измениться до тех пор, пока есть производная тока, то ее можно будет использовать в качестве команды на приращение к заданию напряжения. В установившемся режиме производная тока будет близка к нулю и сигнал на изменение напряжения не поступит, поэтому при таком методе нужно «запустить» процесс поиска экстремума с помощью специального импульса – тестового приращения напряжения. Знак так называемого рабочего импульса и соотношение между производной тока и напряжения определяется как раз в первом блоке при подаче тестового импульса. При положительной производной тока, движение быть не должно и задание на приращение равно нулю. Если движение идет от точки А (рис. 3.13), то производная тока отрицательна, а приращение должно быть положительным, соответственно блок определения направления выдает команду на инвертирование сигнала. Если движение идет из точки Б, то производная тока как и производная напряжения имеет один знак, но в данном случае блок направления должен выдать команду на реверс.

Следующей необходимой составляющей СЭР должен быть блок ИТЭ, анализирующий нахождение в экстремальной точке. Блок должен выдавать сигнал о состоянии движения к экстремуму и достижении экстремума. Для «запуска» процесса поиска экстремума нужен еще один блок СЭР, который формирует тестовые и рабочие импульсы в определенных условиях. В текущем варианте СЭР для СДПМ принимается, что процесс поиска экстремума целесообразно начинать после изменения сигнала задания по скорости, либо при значительном изменении нагрузки.

96
На рисунке 3.14 представлена функциональная схема СЭР предназначенная для регулирования напряжения СДПМ. На схеме видно, что для работы СЭР достаточно сигнала с датчика тока на фазе электродвигателя, а выход системы СЭР суммируется с сигналом задания по напряжению. Блок анализатор состояния (АС) формирует тестовые и рабочие импульсы при изменении сигнала задания, либо при изменении нагрузки. Определитель направления (ОН) после команды АС подает тестовый сигнал и после анализа изменения тока статора формирует рабочий сигнал. ФСУ после подачи рабочего сигнала старта формирует приращения напряжения в зависимости от значения тока статора и поданной информации о направлении поиска с ОН. Информация о токе и об экстремуме (блок ИТЭ) требуется для корректной работы для всех блоков.

Рис. 3.14 Функциональная схема СЭР СДПМ
Алгоритм работы СЭР в системе управления СДПМ можно представить следующим образом:

- сразу после переходного процесса (изменение скорости или нагрузки) необходимо сформировать тестовый импульс du_t положительного направления, для оценки направления поиска экстремума;
- определить направление поиска экстремума с помощью тестового импульса. Пусть тестовый импульс всегда положительный, тогда если
 - 97
производная при тестовом импульсе отрицательная, то направление верное, рабочий импульс должен быть положительный, реверс не требуется, но в ФСУ необходимо подать сигнал о смене знака пропорциональности между производной тока и напряжения. Если сигнал производной тока после тестового импульса положительный, то требуется реверс, рабочий импульс должен быть отрицательный, производная тока и напряжения одного знака;
 - запустить процесс поиска экстремума путем подачи рабочего импульса верного знака. Рабочий импульс как бы выводит систему из равновесия и вызывает возникновение производной тока, но вместе с этим, производная тока поступает в качестве обратной связи в формирователь сигнала управления и, в свою очередь вызывает изменение du_t
 - поэтому после пропажи рабочего импульса система продолжит поиск экстремума до момента равенства нулю производной тока, что и укажет на минимум;
 - привести систему в исходное состояние после достижения экстремума. В процессе поиска экстремума возникает производная, как тока, так и напряжения, что для блока АС является знаком для начала поиска, поэтому СЭР должна контролировать ведется ли поиск или нет, чтобы корректно выдавать сигнал на очередной поиск.

Блок-схему описанного выше алгоритма можно представить в соответствии с рисунком 3.15. Строго говоря, рабочий импульс в ветви алгоритма после определения направления возникает только первый раз. В последующей работе импульс не требуется, так как производная тока автоматически вызывает увеличение управляющего воздействия.

Для более подробной реализации СЭР, основываясь на предложенном алгоритме и блок-схеме, необходимо сформировать систему уравнений. Из алгоритма ясно, что уравнения должны быть значительно нелинейными, с разрывами функций и с функциями запоминания сигнала.

98
Рис. 3.15 Блок-схема алгоритма работы СЭР для СДПМ
99
СЭР можно представить в виде обобщенной системы уравнений, представленной ниже

```

z
1 1 3
12
1 1 2
2 3 4 2
3 5 6
() , если () 0
() , если () 1
(), если ()
(), если ()
(), если ()
()()()
()()()()
()()
s
ss
ss
s
u t g t o e F j
u t c j t d f j
q t A h t
g t h t
g t A h t
d
h t s t j t
o e
j t t f i n
j t t f i s t
j t t i f
11
11
21
21
() 1, если () 0
() 1, если () 0
() 1, если () 0
() 1, если () 0
s
s
s
s
и
```

```

d
s t j t
o e
d
s t j t
o e
d
s t j t
o e
d
s t j t
o e
, (3.9)
здесь () Ue - сигнал приращения к заданию по напряжению; () d e - функция, определяющая изменение сигнала приращения напряжения;
() Jt - функция переключения между источниками приращений;
() Fj - функция от
1 - коэффициент усиления сигнала, создаваемого тестовым импульсом;
() Jt - функция тестового сигнала; A - коэффициент, определяющий темп изменения напряжения; () ht - функция, определяющая изменение напряжения при поиске экстремума; - коэффициент, определяющий зону нечувствительности изменений производной;
1
() st - функция, определяющая знак между производной тока и напряжения;
2
() Jt - функция, определяющая рабочий импульс;
1
()
s
fl,
3
()
s
fl,
5
()
s
fl,
2
()
s
fu ,
4
()
s
fu ,
6
()
s
fu - функции от тока статора и
100
напряжения статора, позволяющие сформировать рабочий, тестовый импульс и сигнал переключения;
2
() st - функция, определяющая знак реверса.
Первое и второе уравнение системы (3.9) содержит интегралы, что позволяет сохранить найденное значение напряжение в процессе последующей работы. Для корректного определения направления поиска экстремума, тестовый импульс подается на сумматор. Знак функции
1
() st и
() st определяется во время подачи тестового импульса и должны запоминаться в течение всего процесса поиска экстремума. Функции
1
() Jt ,
2
() Jt ,
3
() Jt - представляют собой импульсы, которые формируются при определенных условиях изменения тока и напряжения статора. Указанные функции могут быть получены из одного импульса, формирующего сигнал на старт работы СЭР, путем изменения времени запаздывания и длительности. Коэффициенты, с
1,
A , - позволяют регулировать работу системы влияя на быстроту реакции и устойчивость СЭР.
На основе системы уравнений можно сформировать уточненную функциональную схему СЭР (рис. 3.16). В целях надежности схемы модель СДПМ заменена звеном с ярко выраженной «экстремальной» формой (в виде параболы), кроме того, на текущем этапе важна именно эта характеристика электропривода. В реальном электроприводе кроме экстремальной зависимости необходимо будет учесть также нелинейность цепи статора. Как видно из схемы, первый канал, анализирующий сигналы тока статора и задание на напряжение, формирует импульсы по окончании переходного процесса, т.е. первая производная формирует сигнал о том, что происходит переходный процесс, а вторая производная указывает на старт и окончание переходного процесса. Так как информация о старте не требуется, отрицательный импульс оговаривается нелинейным звеном. Выпрямление сигнала между первой и второй производной необходимо, так как изменение задания и нагрузки происходит в обоих направлениях. Даже с помощью
101
```

Рис. 3.16 Уточненная функциональная схема СЭР для СДПМ
звеньев чистого запаздывания формируется еще два импульса через время t

```
1 и
т
2
, таким образом, чтобы сначала действовал тестовый импульс, затем
переключился ключ, а затем только последовал рабочий импульс, т.е. т
```

```
1
> т
2
Во время подачи тестового импульса активируется логико-запоминающее
устройство (ЛЗУ), в котором определяется знак функций
```

```
1
() st и
2
() st после
определения знака тестовый импульс исчезает, однако знать эти знаки
необходимо во время всего поиска экстремума, поэтому в данном блоке
реализована функция запоминания. Блок, реализующий функцию F()
3
)
```

позволяет изменить состояние ключа с приходом нового импульса
переключения. Строго говоря, для полноценной реализации СЭР требуется
блок, формирующий импульс сброса системы в исходное состояние. Этот
блок должен переводить ключ в нижнее состояние (реагирование на тестовый
импульс), переводить в исходное состояние ЛЗУ и прерывать процесс
реагирования формируемых импульсов на изменение тока во время поиска
экстремума (реакция должна быть только когда СДПМ работает в
102

```
1
установившейся точке). Из схемы видно также, что изменяя коэффициент с
1
можно влиять на чувствительность системы на тестовый сигнал, а изменяя
значение А можно изменить скорость поиска экстремума.
```

3.6. Компьютерная модель экстремального регулятора СДПМ
Реализация компьютерного прототипа системы экстремального
регулятора для СДПМ осуществлялась для функции, имеющей экстремум,
параболы вида

```
2
() ()
s s s
1 U к U В D . (3.10)
```

Программная модель была разработана в приложении Matlab, с
использованием стандартных блоков из пакета Simulink (Рис. 3.17). СДПМ на
текущем этапе моделируется, как было ранее отмечено блоком с
экстремальной функцией (Subsystem). В качестве задатчика напряжения
используется блок (Zadatchnik), который моделирует рагон электропривода с
обычным U/I-управлением. Имитация изменения заданной скорости
осуществляется блоком Load. Для реализации процесса поиска экстремума, в
соответствии с алгоритмом, необходимы блоки анализа нагрузки и заданной
скорости. Эти роли выполняет блок "Speed in" и "Load in". Если в случае с
анализом изменения заданной скорости (и, как следствие, напряжения) входом
блока является только заданное значение напряжения, то в блоке анализ
нагрузки (тока статора) входими служат и другие сигналы, которые
предоставляют поведению логических элементов блока. Значение тока статора
изменяется как в процессе разгона, так и торможения двигателя, поэтому при
отсутствии дополнительных ограничений, данный блок будет некорректно
закрывать процесс поиска экстремума. Блоки анализа скорости и нагрузки

```
103
Рис. 3.17 Программная модель СЭР
104
Формирует импульсы на блок "Extreme_starter", обеспечивающий
формирование тестового и рабочего импульсов, сигнала записи аналогов поиска
напряжения и сигнала переключения тумблера "Switch2".
Блок "Extreme_starter" обеспечивает создание импульсов в соответствии с
необходимыми временными задержками и длительностями импульсов (Рис.
3.18). Практически одновременно с импульсом старта возникает тестовый
импульс, обеспечивающий оценку направления поиска экстремума. Во время
тестового импульса формируется импульс записи, который поступает на блок
"Direction Define". Через определенное время формируется импульс
переключения. И в последнюю очередь, уже после переключения тумблера,
формируется рабочий импульс.
```

```
Рис. 3.18 Импульсы старта поиска экстремума
На входе блока "Direction Define" поступает значение производной тока,
поэтому во время тестового импульса в соответствии с последними четырьмя
уравнениями системы (3.9) формируются значения функций
```

```
1
() st и
2
() st , а при
поступлении сигнала записи эти значения сохраняются на весь период поиска
экстремума.
Импульс переключения поступает на блок функции F(), который
формирует сигнал переключения тумблера и задействует канал формирования
```

```
105
сигнала приращения напряжения через рабочий импульс и производную тока.
В исходное состояние, т.е. ожидание тестового импульса, тумблер
переключается импульсом, поступающим с блока "for search", который
формирует импульс в момент, когда производная тока становится равной
нулю, что означает достижение экстремума.
Канал формирования приращения напряжения включает: блок
производной "Derivative", блок умножения "Dot product1" для
формирования верного знака между производной тока и напряжения,
суматор обеспечивающий сложение с рабочим импульсом, делительные
элементы, реализующие характеристику в соответствии с блоками
функциональной схемы (Рис. 3.16), усилитель "Gain2" и интегратор
"Integrator1". В режиме ожидания ключ включен таким образом, что тестовый
импульс подается напрямую через усилитель на интегратор.
Проверка работоспособности схемы осуществляется тремя способами
изменения состояния СДПМ. Во-первых, запуск системы, который
характеризуется линейным изменением «напряжения» на входе
экстремального блока. Задание формируется таким образом, чтобы изначально
система оказалась не в точке минимума (рис. 3.13). Во-вторых, проверка
работоспособности системы при изменении задания. Задание следует также
изменить как вправо, так и влево от экстремума. В-третьих, следует оценить
работоспособность системы при изменении экстремальной характеристики,
т.е. при дрейфе координат точки минимума.
В первом случае (Рис. 3.19) имеем нарастание сигнала задания до значения
ниже точки экстремума, затем положительное изменение сигнала и затем
снижение экстремальной характеристики вправо по оси. Для определенности
моделирования уравнение (3.10) взято с коэффициентами
```

```
2
() 0,1 (50) 20
s s s
1 U U . (3.11)
```

Очевидно, что минимум функции (3.11) достигается в точке $U=50$, а
значение функции при этом I
 $I_{min}=20$, соответственно при любых изменениях

```
106
состояния системы СЭР должна формировать такое приращение к заданию
напряжения, чтобы ток статора стремился к значению  $I$ 
в момент
программного времени 0,1 с, начинается нарастание сигнала задания до
значения 40В. По окончании переходного процесса возникает тестовый
импульс, переключается состояние ключа и с рабочим импульсом начинается
поиск экстремума. Увеличенная диаграмма возникновения импульсов
показана на рисунке 3.20. Видно, что приращение напряжения равномерно
увеличивается (на вход интегратора подается постоянное значение) до тех
пор, пока производная не приблизится к нулевому значению. Переключатель
возвращается в исходное состояние с некоторым запаздыванием, чтобы не
«проскочить» точку минимума.
```

```
Рис. 3.19 Диаграмма работы СЭР при задании меньше точки минимума
107
Рис. 3.20 Увеличенная диаграмма работы СЭР при старте поиска экстремума
В момент времени 1с возникает изменение задания напряжения, которое
вызывает смещение рабочей точки с экстремальной позиции. После окончания
переходного процесса снова возникает тестовый импульс, а далее – рабочий,
однако из-за того, что изменение задания привело к смещению рабочей точки
вправо от экстремума (рис. 3.13) рабочий импульс уже должен быть
отрицательного знака, что и видно при работе системы.
В момент времени 1,5с возникает смещение характеристики вправо
(рис. 3.13) уже без изменения задания по напряжению. Значение напряжения
не соответствует минимальному значению (точка Э*, рис. 3.13), поэтому вновь
нужно запустить процесс поиска экстремума. На диаграмме рабочий и
тестовый импульсы одинакового знака, так как поиск требуется вести в сторону
увеличения напряжения.
```

```
В другом случае (рис. 3.21), первоначальное задание формируется таким
образом, что рабочая точка оказывается справа от точки минимума (0,1с),
изменение задания смещает рабочую точку влево от минимума (1с), а дрейф
характеристики влево (1,5с) переводит рабочую точку также влево. Рабочие
импульсы соответственно возникают с отрицательным знаком, когда рабочая
точка оказывается справа от точки экстремума, и с положительным знаком,
если рабочая точка – слева.
```

```
108
Увеличение диаграммы выхода экстремальной функции, «тока статора»
(рис. 3.22) показывает, что минимальное значение ( $I_{0A}$ ) достигается при
любых изменениях состояния с точностью выше 0,025%, что свидетельствует
о работоспособности системы.
```

```
Рис. 3.21 Диаграмма работы СЭР при задании больше точки минимума
Рис. 3.22 Диаграмма значения тока статора I
s
(t) при поиске экстремума
109
3.7. Выводы по третьей главе
В настоящей главе получены следующие результаты:
```

- разработана компьютерная модель бездатчикового частотного U/I-управления СДПМ со стабилизирующим блоком, позволяющая исследовать работу электропривода на базе СДПМ. С помощью модели подтверждено, что электродвигатель устойчиво работает при задании частоты от 10 до 130 Гц, и не выпадает из синхронизма, а при наборе нагрузки номинальным моментом динамическая ошибка составляет меньше 5%;
- предложена методика проектирования бездатчикового частотного U/I-управления СДПМ на основании разработанной компьютерной модели. Для выбора коэффициента стабилизирующего блока необходимо установить параметры электропривода в модель и провести анализ временных диаграмм работы системы. Методика позволяет обеспечить робастность системы при более чем шестикратном изменении параметров электропривода;
- разработаны алгоритм поиска оптимального значения напряжения статора СДПМ обеспечивающий автономический поиск такого напряжения статора, при котором ток статора оказывается минимальным;
- на основе разработанных функциональной схемы и системы уравнений экстремального регулятора разработаны прототип компьютерной модели экстремального регулятора напряжения статора СДПМ;
- с учетом стабилизирующего Блока, методики его наладки и возможности оптимизации энергоэффективности работы частотного управления СДПМ система удовлетворяет сформулированным техническим требованиям и способна обеспечить регулируемую работу гидравлической системы;
- для проверки адекватности методики построения системы СЭР для СДПМ необходимо провести адаптацию компьютерных моделей бездатчиковой системы U/I-управления СДПМ со стабилизирующим блоком, и экстремального регулирования напряжения статора СДПМ и провести исследования с помощью экспериментов и моделирования.

```
110
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
4.1. Исследование модели стабилизированного U/I-управления СДПМ
Представленная в третьей главе компьютерная модель U/I-управления
синхронного двигателя с постоянными магнитами, благодаря стабилизации,
позволяет исследовать поведение СДПМ при различных нагрузках и задании
скорости, изменять при этом параметры управления (амплитуду напряжения
статора и частоту).
В данном параграфе с помощью модели предполагается подтвердить
экстремальный характер зависимости тока статора от амплитуды напряжения
статора, уточнить характер зависимости и условия дрейфа экстремальной
точки.
В модели СДПМ (Рис. 3.6) блок "Uц
2
" позволяет изменять амплитуду
напряжения статора. По умолчанию в системе управления предусмотрено
пропорциональное соотношение между амплитудой питающего напряжения
и частотой, причем соотношение
U
const
f
, поэтому в указанном блоке
задается значение напряжения соответствующее 50Гц задания частоты, а
значение напряжения в любой точке F будет определяться пропорционально.
Нагрузку формируется блоком "Zadatchnik" и подается на моментный вход
электродвигателя в один и тот же момент времени. По истечению
переходного процесса измеряется амплитуда тока статора.
Для каждой рабочей точки статической характеристики необходимо
найти оптимальную точку регулировочной характеристики. Для этого будем
изменять задание частоты питающего напряжения от 10 до 60 Гц с шагом
10 Гц. Нагрузку будем изменять от 10 до 120 Нм с шагом 10 Нм. Для
возможных семидесяти двух точек необходимо, изменяя напряжение от 160
до 240 В с шагом 5 В, определять наличие экстремума и значение
напряжения, соответствующее минимальному току статора.
```

```
111
Моделирование проводится с помощью задания из рабочей области
программы Workarea. Проведение эксперимента осуществляется
следующим образом. Сначала задается необходимая скорость
электродвигателя, амплитуда напряжения при этом максимальная – 240 В,
затем по окончании переходного процесса увеличивается нагрузка на 10 Нм.
При такой нагрузке напряжение постепенно уменьшается с 240 В до 160 В с
шагом в 5 В, время через которое изменяется задание напряжения подобрано
таким образом, чтобы следующее изменение было не раньше окончания
переходного процесса по току. После достижения 160В задание напряжения
устанавливается обратно до значения 240 В, увеличивается нагрузка на 10Нм
и процесс изменения напряжения повторяется. Временная диаграмма
изменения нагрузки и напряжения на определенной частоте показана на
рисунке 4.1. Из рисунка можно определить значение напряжения,
соответствующее минимальному значению тока статора для любого значения
нагрузки из диапазона. Также на рисунке видно, что снижение напряжения
приводит к уменьшению тока лишь до определенного значения, после
которого дальнейшее снижение напряжения приводит к возрастанию тока.
```


определение знаков при этом не участвует.

Работа СЭР с модифицированной системой подачи рабочих импульсов показана на рисунке 4.9. На электропривод подавалось различное задание частоты вращения: пуск осуществлялся на скорость 30 Гц, далее с 4с по 5с программного времени скорость снижалась до 20 Гц, и далее с 7с по 8,5с скорость изменилась до 50 Гц. На временной диаграмме видно, что рабочий импульс в отличие от предыдущего исполнения СЭР возникает практически сразу после окончания переходного процесса, что значительно ускорило процесс поиска экстремума в среднем на 600-700 мс. На диаграмме рабочих импульсов видно, что процесс поиска запускался три раза и после каждого поиска система «находила» минимальное значение тока статора.

124
125

Рис 4.9 Работа модифицированной СЭР при изменении частоты вращения электродвигателя

На диаграмме дбавочного напряжения ДД(1) видно, что при старте второго переходного процесса, произошел сброс значения интегратора, что связано, как раз с усилением выпадения двигателя из синхронизма. Если посмотреть на таблицу 4.1 можно определить, что оптимальное напряжение повышается с ростом нагрузки и с уменьшением частоты вращения. Поэтому если при уменьшении угловой скорости или при увеличении нагрузки не изменять значения дбавочного напряжения – повышается вероятность выпадения из синхронизма. На рис 4.9 в момент времени 4с начинается снижение задания скорости. Блок анализа переходных процессов скорости и нагрузки это фиксирует и подает команду на сброс интегратора, обнуляя значения дбавочного напряжения. Тем самым, рабочая точка по напряжению вновь оказывается выше оптимального значения и, плавно уменьшая напряжение, можно «найти» оптимальную рабочую точку. При росте задания частоты «обнуление» дбавочного напряжения не происходит, так как оптимальная точка должна быть ниже и при окончании переходного процесса напряжение уменьшается уже с предыдущего значения.

При сбросе и набросе нагрузки также должен подключаться блок анализа переходных процессов. На рисунке 4.8 приведены диаграммы работы электропривода при работе на 30 Гц и изменении нагрузки. В момент времени 4с скачкообразно увеличивается нагрузка на 30Нм. На диаграмме дбавочного напряжения видно, что в момент возникновения нагрузки напряжение сразу возвращается к исходное состояние, что препятствует выпадению из синхронизма. При сбросе нагрузки обнуления дбавочного напряжения уже не происходит. В процессе изменения рабочей точки СЭР отыскивает минимальное значение напряжения такое же, как и было найдено в ручном режиме (таблица 4.1).

Работоспособность системы проверялась на всем диапазоне нагрузки и частоты вращения электродвигателя. Установлено, что даже при самом неблагоприятном случае низкой скорости и высокой скачке нагрузки анализатор переходного процесса «успевает» обнулить интегратор.

126
127

При наладке системы возникает вопрос о базовом значении напряжения, относительно которого происходит снижение при поиске оптимальной точки. Если рассматривать весь рабочий диапазон электропривода (таблица 4.1) видно, что приведенное к 50Гц оптимальное напряжение варьируется от 170 до 220 В. Если, например, базовое напряжение будет установлено на 200 В, то при росте нагрузки до 80Нм при 10Гц возникает вероятность выпадения электродвигателя из синхронизма или, как минимум высоких токов статора, даже не смотря на то, что интегратор снитает свое значение до нуля. Из этого следует, что для надежной работы электропривода во всем рабочем диапазоне в качестве базового напряжения нужно выбирать максимальное оптимальное напряжение из всех возможных рабочих точек.

При выборе максимального напряжения значения дбавочного напряжения будет снижаться до нуля всякий раз, когда будет увеличиваться нагрузка или уменьшаться заданная частота вращения. Этот факт хоть и обеспечивает работоспособность электропривода во всем необходимым рабочем диапазоне, однако вводит в систему некоторую избыточность. Так, например, при нагрузке 50 Нм и снижении заданной частоты вращения с 40 до 30 Гц оптимальное напряжение должно повыситься только на 5 В, а во время как СЭР сначала переведет в ноль выход интегратора (т.е. напряжение статора будет соответствовать 220В), а только затем будет плавно снижать и достигнет значения 190В. Тем не менее, вариант, при котором напряжение из рабочей точки будет плавно повышаться - недопустим, так как характер нагрузки в рассматриваемом технологическом процессе (а также во многих других технологических процессах) носит случайный характер и изменяется скачкообразно.

Возникающее «петляние» СЭР при изменении нагрузки, безусловно, повышает длительность переходных процессов и поиска экстремума, однако для повышения скорости переходных процессов можно сформулировать определенные методы.

128

Один способ ускорения поиска экстремума реализуется в процессе наладки электропривода и связан с ограничением рабочего диапазона. Например, если в процессе протестирования и наладке электропривода известно, что заданная скорость не опускается ниже 30Гц, то и максимальное напряжение допустимо установить 190В. В таком случае, при последующем возникновении переходного процесса, значение амплитуды напряжения статора повысится до 190В, а снижение до требуемого напряжения в рабочей точке из диапазона будет проходить быстрее.

Другой способ связан с анализом исходных данных об оптимальных точках рабочего диапазона и приводит к некоторому усложнению алгоритма СЭР. Из таблицы 4.1 видно, что для каждой частоты вращения при максимальной нагрузке оптимальное напряжение изменяется. Вместе с этим, в отличие от определения момента нагрузки, определить заданную частоту вращения не представляется затруднительным. Поэтому, в процессе наладки можно выделить определенные диапазоны частоты вращения и установить для каждого диапазона соответствующее значение максимального оптимального напряжения. Для определенной рабочей частоты вращения скачок напряжения сдвигается и повышается скорость поиска экстремума.

4.4. Методика наладки СЭР для СДПМ

Учитывая то, что при эксплуатации синхронных электродвигателей система экстремального регулирования ранее не применялась, необходимо сформулировать методику, которая позволяла бы применять предлагаемую систему регулирования к роботу СДПМ.

Как ранее отмечалось, проблемы при переходе от одного электродвигателя к другому заключаются в инерционности цепи статора и изменении этой инерционности в зависимости от частоты вращения двигателя. Различия в инерционности требуют выбора определенного темпа поиска экстремума и различные параметры стартового тестового импульса. Значительным фактором, оказывающим влияние на работоспособность СЭР,

129

является базовое напряжение, которое устанавливается перед запуском системы и относительно которого происходит поиск оптимального значения напряжения. На этот параметр влияют как собственные параметры электродвигателя, так и граница рабочей зоны. В ходе моделирования и экспериментальных исследований установлено, что расчет номинального максимального рабочего напряжения можно определить как значение ЭДС рассчитанное для номинальной скорости и увеличенное на 10%. По приведенной формуле значение базового напряжения для исследуемого двигателя составило 229В.

Для подтверждения рассчитанного значения базового напряжения целесообразно провести проверку. Эта проверка может заключаться в выходе на рабочую точку и пробной изменении напряжения вилк. Если значения тока статора уменьшается, то напряжение выбрано верно. При диапазоне скорости больше 1:2 целесообразно определить базовое значение напряжения для каждого диапазона

Скорость изменения приращения напряжения, т.е. постоянную времени интегратора при поиске экстремума стоит устанавливать исходя из инерционности статорной цепи. Так если инерционность вкорной цепи определяется как

s

s

s

L

T

R

, то с учетом правила симметричного оптимума постоянную времени необходимо выбрать 2...4

Us

TT

. При выполнении данного условия напряжение будет изменяться настолько медленно, чтобы изменения тока отсвечивались системой без опоздания. Длнна тестового импульса тоже зависит от инерционности вкорной цепи и определяется как 10...20

риб s

TT. Такая продолжительность связана с тем, что по окончании переходного процесса изменения скорости или нагрузки процесс поиска экстремума запускается с некоторым опережением, т.е. когда переходный процесс уже в некоторых заданных минимальных пределах, но еще не полностью окончен. На новый переходный процесс тока, вызванный рабочим импульсом, может «наложиться» предыдущая составляющая и 130 изменить знак производной тока, что приведет к преждевременной остановке поиска.

Чувствительность по производной тока должна подбираться таким образом, чтобы при изменении задания напряжения релейный элемент устойчиво срабатывал.

Таким образом, методику построения СЭР для СДПМ можно свести к следующим пунктам:

а) определить рабочий диапазон электропривода; б) определить количество «базовых» значений напряжения; в) определить расчетное «базовое» значение напряжения; г) проверить экспериментально значение «базового» напряжения; д) определить скорость изменения приращения напряжения в соответствии с выражением 2...4

Us

TT

е) определить длину рабочего импульса в соответствии с выражением 10...20

риб s

TT ;

ж) определить чувствительность системы к изменению тока статора.

4.5. Энергоэффективность электропривода гидросистемы на базе СДПМ с СЭР

Диаграммы работы СЭР показывают, что статорные токи значительно снижаются при выборе оптимального значения напряжения. На основании экспериментальных исследований и моделирования можно сделать вывод о том, что снижение статорных токов в определенной рабочей точке достигается снижением напряжения. Полная же мощность остается неизменной, так как момент не изменяется, а скорость жестко определяется частотой питающего напряжения. Изменения напряжения в процессе поиска экстремума вызывают снижение входной электрической мощности и, следовательно, повышение КПД всего электропривода.

131

На рисунке 4.9 видно, что по окончании переходного процесса разгона и после изменения нагрузки график входной электрической мощности начинает сближаться с графиком полезной мощности. Если использовать электропривод с частотным управлением без адаптации напряжения, то при определенной частоте вращения с изменением нагрузки КПД может снижаться до 70%. Если же в процессе технологического процесса предусматривается изменение частоты вращения, то КПД может оказаться еще ниже.

Рис. 4.9 Изменение потребляемой мощности СДПМ с применением экстремального регулятора напряжения

Более наглядным оказывается график изменения КПД вычисленный при работе системы электропривода с системой экстремального регулирования (Рис. 4.10). Из временных диаграмм видно, что процесс изменения значения приращения происходит два раза. Первый после выхода на установившуюся скорость, а второй после наброса нагрузки. Оба процесса поиска заканчиваются выходом системы на максимальный КПД (до 92%). Максимальный КПД, который удалось получить при работе электродвигателя по принципу БДПТ в узком диапазоне достигал 87%, но при отклонениях рабочей точки снижался до 65%. Полученная система обеспечивает наибольший КПД во всех рабочих точках электропривода.

132

Рис. 4.10 Нагрузочная диаграмма электропривода

4.6. Выводы по четвертой главе

По настоящей главе можно сформулировать следующие выводы:

- представлены результаты моделирования в целях поиска оптимального значения напряжения для каждой рабочей точки электропривода. По поверхности оптимальных значений напряжения видна нелинейная зависимость от изменения скорости и нагрузки;
- представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие зависимость тока статора от амплитуды напряжения статора;
- конкретная модель СЭР адаптирована с моделью стабилизированного СДПМ. С учетом инерционности статорной цепи СДПМ и направления поиска минимума сокращено время поиска экстремума;
- сформулирована методика, позволяющая проводить наладку СЭР совместно с системой безынерционного ШГ-управления СДПМ;
- с помощью компьютерной модели показано, что система обеспечивает автоматический поиск значения напряжения статора, при котором КПД оказывается максимальным. Значение КПД в разработанной системе достигает 92%, что на 5-25% больше, чем при работе электродвигателя по принципу БДПТ.

133

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача

повышена эффективность наладки и работы электропривода гидравлической системы МАР на базе СДПМ, обеспечивающего высокую энергоэффективность во всем рабочем диапазоне. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана комплексная математическая и компьютерная модель электрогидравлической системы МАР, в качестве входного воздействия рассматривается частота вращения вала электродвигателя, а выходные сигналы являются угол отклонения рабочего органа и механический момент на валу гидронасоса, отличающаяся тем, что нагрузочный момент электропривода формируется через канал гидравлической части, а задание по скорости электродвигателя формируется регулятором давления. Модель позволяет исследовать динамические и статические нагрузки, создаваемые гидросистемой при штатной работе регулевой системы и при регулировании давления. Показано, что применение регулирования скорости привоного двигателя позволяет снизить энергопотребление в накатных режимах на 60%. Адекватность математической модели проверялась с помощью компьютерного моделирования и сравнения с экспериментальными данными.

Винградов, А. Сибирцев, И. Калдин // *Силовая электроника* , №3., 2006. – с. 46-51

155. Ланграф, С.В. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, К.С. Афанасьев и др. // *Известия Томского политехнического университета*, 2010, Т. 317, № 4. – с. 120-123

156. Карлович, О.Я. Вентиляционно-индукторный электропривод с адаптивной системой управления для компрессоров малых холодильных установок / О.Я.Карлович, О.А.Онщенко // *Электромеханические и энергосберегающие системы.* – 2012. – №3(19). – с. 150-152.

Страницы: [123](#) Все