

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: dissert_Zhuravlev_2016_10_17.docx
 Имя компании: Южно-Уральский государственный университет
 Комментарий: ДиссертацияЖуравлев
 Тип документа: Прочее
 Имя документа: ДиссертацияЖуравлев
 Дата проверки: 17.10.2016 12:43
 Модули поиска: Кольцо вузов, Южно-Уральский государственный университет, Диссертации и авторефераты РГБ, Интернет (Антиплагиат), Модуль поиска ЭБС "Лань", Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Коллекция юридических документов, Цитирования

Текстовые

статистики:
 Индекс читаемости: сложный
 Неизвестные слова: в пределах нормы
 Макс. длина слова: выше нормы!
 Большие слова: выше нормы!

Уважаемый пользователь!

Появление этого сообщения говорит о том, что нужно внимательнее отнестись к оценке данного документа. Документ содержит признаки, типичные для искусственного завышения процента оригинальности за счет особенностей форматов документов. Что делать: в первую очередь сравнить текст, содержащийся в отчете и в документе, отправленном на проверку. Если, например, в отчете есть текст, не видимый в исходном документе, или слова «склеены» или в слова вставлены посторонние буквы, это означает, что систему и вас пытались обмануть. В то же время, появление данного знака НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО свидетельствует от том, что попытка обмана была. Возможно, текст содержит слишком много иностранных или очень длинных или не найденных в словаре слов. Это часто встречается в работах, где используется много терминов (химия, юриспруденция и т.п.). В заголовке отчета дана информация, по какому критерию показан знак. НЕЛЬЗЯ ОРИЕНТИРОВАТЬСЯ ТОЛЬКО НА ПРОЦЕНТЫ И ПОЯВЛЕНИЕ ДАННОГО ЗНАКА, необходимо открывать отчет и внимательно просматривать его!

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] ДиссертацияБелоусов		Кольцо вузов	11,92%	11,96%	153	153
[2] ДиссертацияБелоусов		Южно-Уральский государственный университет	11,92%	11,9%	153	149
[3] Белоусов, Евгений Ви...	http://dlib.rsl.ru/rsl01007000000/rsl01007569000/rsl01007569...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,39%	10,26%	22	252
[4] Григорьев, Максим Ан...	http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006769000/rsl01006769...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,8%	7,67%	26	181
[5] Abstract2014_01_22.d...		Южно-Уральский государственный университет	0,31%	4,46%	21	92
[6] ЭнергосбережениеМоно...		Южно-Уральский государственный университет	0,09%	3,47%	4	65
[7] Дудкин, ГрантФЦП2этап...		Южно-Уральский государственный университет	0%	3,05%	0	51
[8] Григорьев, Максим Ана...	http://famous-scientists.ru/list/16936	Интернет (Антиплагиат)	0%	2,62%	0	43
[9] Горожанкин, Алексей ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004879000/rsl01004879...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,1%	2,18%	5	53
[10] Автореферат		Южно-Уральский государственный университет	0,01%	2,16%	1	61
[11] Виноградов, Констант...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003027000/rsl01003027...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,04%	1,91%	2	62
[12] Григорьев, Максим Ан...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002623000/rsl01002623...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	1,82%	0	55
[13] ГригорьевСтатьяЭлект...		Южно-Уральский государственный университет	0%	1,75%	0	47
[14] Doc2All.ru - Синхрон...	http://doc2all.ru/article/28112013_153660_griqorev/4	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,73%	0	49
[15] Реферат Отчет 73 с.....	http://netess.ru/3kniqi/1086979-1-referat-otchet-ch-ris-tabl...	Интернет (Антиплагиат)	0,01%	1,72%	1	47
[16] Электропривод механи...	http://www.dslib.net/elektrotex-kompleksy/elektroprivod-meh...	Интернет (Антиплагиат)	0,1%	1,61%	5	46
[17] DisertProverka.docx		Южно-Уральский государственный университет	0,1%	1,52%	7	39
[18] DisertProverka.docx		Кольцо вузов	0,1%	1,52%	7	39
[19] Бычков, Антон Евгень...	http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006738000/rsl01006738...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,07%	1,33%	4	49
[20] Вентильный электропр...	http://netess.ru/3elektrotehnika/368798-1-ventilnyy-elektrop...	Интернет (Антиплагиат)	0,01%	1,32%	1	33
[21] Doc2All.ru - Электро...	http://doc2all.ru/article/03082014_170298_belousov/2	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,31%	0	47
[22] УДЕЛЬНЫЕ МАССОГАБАРИ...	http://cyberleninka.ru/article/n/udelnye-massogabaritnye-pok...	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,13%	0	28
[23] Левин, Михаил Алекса...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002634000/rsl01002634...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,71%	0,78%	18	21
[24] ОстроуховДиссертация...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,73%	0	19
[25] 267609	http://e.janbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2560&p_f_...	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,71%	0	32
[26] Повышение эффективности...	http://tekhnosfera.com/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniy...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,71%	0	18
[27] Сергеев, Юрий Серге...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004928000/rsl01004928...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,03%	0,66%	1	18
[28] Поляков, Владимир Ни...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004659000/rsl01004659...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,01%	0,61%	2	18
[29] ОПТИМИЗАЦИЯ НОВЫХ ТИ...	http://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-novyh-tipov-e...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,55%	0	12
[30] Соломахо		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,52%	0	12
[31] Диссертация без титу...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,49%	0	18
[32] Козина, Татьяна Андр...	http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006517000/rsl01006517...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,07%	0,46%	3	14
[33] Валов, Артем Владим...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004382000/rsl01004382...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,44%	0	12
[34] 267612	http://e.janbook.com/journal/issue.php?p_f_journal=2560&p_f_...	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,34%	0	15
[35] Elektrotehnika.pdf	http://ispu.ru/files/Elektrotehnika.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,33%	0	7
[36] Скачать/bestref-9927...	http://www.bestreferat.ru/archives/73/bestref-99273.zip	Интернет (Антиплагиат)	0,26%	0,26%	6	6
[37] 2015-РОАТ-ТЭ-Мартыно...		Кольцо вузов	0,26%	0,26%	6	6
[38] Шишков, Александр Ни...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003379000/rsl01003379...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,04%	0,25%	2	11
[39] Надежность транзисто...	http://lektail.org/1-25606.html	Интернет (Антиплагиат)	0,24%	0,24%	4	4
[40] Глухов, Дмитрий Миха...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002947000/rsl01002947...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,24%	0	7
[41] Источник 41	http://ntpo.com/patents_electronics/electronics_6/electronic...	Интернет (Антиплагиат)	0,15%	0,23%	5	8
[42] Источник 42	http://window.edu.ru/resource/883/36883/files/stup109.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,21%	0,21%	4	4
[43] 4544	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=4544	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,13%	0,2%	5	8
[44] Виноградов, Анатолий...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005085000/rsl01005085...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,2%	0	3
[45] 38_Оценка показател...	http://ru.convdcs.org/docs/index-240097.html	Интернет (Антиплагиат)	0,2%	0,2%	4	4
[46] Источник 46	http://shr.receptdocs.ru/v3180/?download=file#2	Интернет (Антиплагиат)	0,09%	0,2%	3	6
[47] Зюзов, Анатолий Миха...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002748000/rsl01002748...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,04%	0,18%	3	8
[48] Библиотека НЕФТЬ-ГАЗ...	http://www.elek.oqlib.ru/bgl/7629/237.html#5	Интернет (Антиплагиат)	0,04%	0,18%	2	4
[49] 72285	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=72285	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,16%	0	3
[50] Постников, Сергей Ге...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002318000/rsl01002318...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,16%	0	5
[51] Фминов, Александр Ан...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002606000/rsl01002606...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,02%	0,12%	2	5
[52] Шатова, Ирина Владим...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003391000/rsl01003391...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,11%	0	4
[53] Электрические машин...	http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90476&type=utchposob%3Ac...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,1%	0	6
[54] 45691	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=45691	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,1%	0	4
[55] 2778	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=2778	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,03%	0,1%	1	3
[56] Основы электропривод...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=19177	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,09%	0	4
[57] Бычков, Михаил Григо...	http://dlib.rsl.ru/rsl01000000000/rsl01000259000/rsl01000259...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,09%	0	3
[58] Основы пневмопривода...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=18999	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,08%	1	2
[59] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ПЕРЕЧ...	http://online.lexpro.ru/document/2008464	Коллекция юридических документов	0,08%	0,08%	2	2
[60] 3813	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=3813	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,08%	0	3
[61] Современные техноло...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=19657	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,08%	0,08%	4	4
[62] 7659	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=7659	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,08%	0	4
[63] 44766	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=44766	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,03%	0,08%	2	3
[64] Научно-технический в...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=17607	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,07%	0	2
[65] Научно-технический в...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=17603	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,07%	1	3
[66] диссертация ... док...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003314000/rsl01003314...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,02%	0,07%	1	2
[67] Одномерные непрерывн...	http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=18836	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,05%	0	1
[68] 59517	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=59517	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,05%	0	1
[69] 72203	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=72203	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,05%	0	1
[70] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ГЛАВ ...	http://online.lexpro.ru/document/108533	Коллекция юридических документов	0,05%	0,05%	1	1
[71] 792	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=792	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,05%	0,05%	2	2
[72] Kopylov88_tom1.djvu	http://vmg.pp.ua/books/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,05%	0	2

<input checked="" type="checkbox"/>	[73] 72435	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72435	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,04%	0	3
<input checked="" type="checkbox"/>	[74] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ И ВВЕ...	http://online.lexpro.ru/document/95077	Коллекция юридических документов	0,04%	0,04%	1	1
<input checked="" type="checkbox"/>	[75] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ И ВВЕ...	http://online.lexpro.ru/document/87947	Коллекция юридических документов	0%	0,04%	0	1
<input checked="" type="checkbox"/>	[76] Вестник Иркутского Г...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=16625	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%	0	1
<input checked="" type="checkbox"/>	[77] Импульсно-векторное ...	http://www.dslib.net/elektrotex-kompleksy/impulsno-vektornoe...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,04%	0	1
<input checked="" type="checkbox"/>	[78] Современные технолог...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=19292	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,03%	0	2
<input checked="" type="checkbox"/>	[79] Электротехника. Прак...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=10611	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,03%	0	2
<input checked="" type="checkbox"/>	[80] Источник 80		Цитирования	0,03%	0,03%	1	1
<input checked="" type="checkbox"/>	[81] 72311	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72311	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,01%	0,02%	1	2
<input checked="" type="checkbox"/>	[82] 2669	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2669	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,02%	0	1

Оригинальные блоки: 83,11%
 Заимствованные блоки: 16,68%
 Заимствование из "белых" источников: 0,2%
 Итоговая оценка оригинальности: **83,32%**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Журавлев Артем Михайлович

УДК62-83::621.313.3

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВодОВ ОБЪЕКТОВ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальности: 05.09.03 – «**Электротехнические комплексы и системы**»

05.09.12 – «Силовая электроника»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –

доктор технических наук

Усынин Ю.С.

Научный руководитель –

доктор технических наук

Григорьев М.А.

Челябинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 2

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ 10

1.1. Обзор технологических объектов, питающихся от полупроводниковых преобразователей 10

1.2. Особенности работы электропривода эксгаустера кислородного конвертора 13

1.3. Обзор проблем в электроприводах эксгаустеров 16

1.4. Существующие пути повышения надежности полупроводниковых преобразователей и электрических приводов 21

1.5. Постановка задачи исследований 25

1.6. Выводы по главе 1 27

ГЛАВА 2. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 29

2.1. Анализ существующих методов повышения надежности показателей 29

2.1.1. Экономический подход обоснования надежности показателей электропривода 31

2.1.2. Анализ существующих методов увеличения времени безотказной работы электроприводов 36

2.1.3. Метод введения избыточности системы 42

2.1.4. Применение метода введения избыточности для преобразователей напряжения 44

2.2. Постановка задачи оптимизации полупроводниковых преобразователей 65

2.3. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей 68

2.4. Результаты оптимизации 75

2.5. Выводы по главе 2 80

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РАБОТАЮЩЕГО В ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ 82

3.1. Постановка задачи математического моделирования электроприводов, работающих в пускотормозных режимах 82

3.2. Обзор существующих математических моделей 83

3.3. Принятые допущения 88

3.4. Синтез математической модели 89

3.5. Оценка адекватности разработанной математической модели 92

3.6 Выводы по главе 3 94

ГЛАВА 4. ПРИМЕР ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ 96

4.1. Анализ основных причин отказов электрических машин 96

4.2. Методика синтеза схем силовых цепей электроприводов 104

4.3. Пример реализации методики синтеза электропривода с импульсно векторной схемой управления 110

4.3.1. Идеал импульсно-векторного способа управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением 122

4.3.2. Математическая модель импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением 130

4.3.3. Преобразование Кларка 135

4.3.4. Описание особенностей ввода резерва в схеме импульсно-векторного управления 142

4.4. Выводы по главе 4 144

Заключение 146

Литература 148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В современной металлургии за последние десятилетия существенно возросла значимость кислородно-конвертерного производства. Так, по данным металлургов, количество выплавляемой стали в кислородных конвертерах возросло с 431 до 811 млн. т. в год с 1996 по 2006 гг. что составило 65,5 % от суммарного мирового объема металла. В частности, на Южном Урале конвертерное производство широко представлено на крупных промышленных предприятиях: Челябинском металлургическом комбинате, Магнитогорском металлургическом комбинате.

В настоящее время в мире насчитывается около 280 кислородно-конвертерных цехов, которые производят порядка 70% от общего числа углеродистой, низколегированной и легированной стали в год. Примерно седьмая часть (35-40) таких цехов располагается на территории России. В каждом из цехов находится обычно 3 или 4 кислородных конвертера, каждый из которых в свою очередь оснащен промышленным дымососом – эксгаустером. Таким образом, в настоящий момент на территории нашей страны функционирует порядка 100 мощных эксгаустеров. Подавляющее большинство этих установок было создано еще в советские годы, лишь незначительная часть из них была введена в эксплуатацию в XXI веке. Этот факт говорит о том, что на сегодняшний день достаточно большой группе механизмов требуется модернизация.

По данным опроса специалистов ОАО ЧМК, отказы эксгаустера на кислородном конвертере случаются с частотой в среднем один раз в два месяца. Причиной остановок в настроенной системе электропривода служат отклонение преобразователя частоты по максимально токовой защите, а также отказы в системе возбуждения синхронного двигателя.

Существующие системы с преобразователями частоты решают проблему регулирования производительности, однако, часто имеют избыточные регулировочные возможности, большие капиталовложения, требуют высокой подготовки обслуживающего персонала, и, что самое главное, имеют относительно невысокие показатели надежности. Для механизмов, не требующих большой точности регулирования (к которым можем отнести и эксгаустеры), имеется потребность в простых, относительно недорогих, но отличающихся повышенной надежностью систем электроприводов. Одной из таких систем является импульсно-векторная система управления.

Одним из способов повышения надежности электропривода является применение синхронной реактивной машины с независимым возбуждением (СРМНВ), обладающей рядом преимуществ по сравнению с традиционными типами электрических машин. По этой причине задача создания новой системы управления, отличающейся повышенной надежностью, для перспективного типа электропривода является актуальной.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0154 от 28 ноября 2014 года (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0154).

Степень научной разработанности проблемы. Большой вклад в общую теорию синхронных реактивных машин внесли Weh, H., VaqatIA.,Lipot. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Горожанкин А.Н. и др.

Все большее внимание специалистов в области управления привлекают системы с импульсно-векторным формированием электромагнитного момента. Разработки таких систем управления для машин общепромышленной серии вели Давыдкин М.Н., Валов А.В., Басков С.Н. Больших успехов в создании и исследовании бездатчиковой системы с импульсно-векторным управлением асинхронным двигателем добилась Козина Т.А.

Однако, несмотря на большое количество исследований в этой области, вопрос создания надежного и недорогого электропривода на базе перспективной синхронной реактивной машины с независимым возбуждением для общепромышленных механизмов до конца не решен.

Объекты исследования – силовые полупроводниковые преобразователи и мощные электроприводы общепромышленных механизмов.

Предмет исследования – взаимосвязи между надежностными показателями полупроводниковых преобразователей, электроприводов и их параметрами, а также процессы в системах с импульсно-векторным управлением.

Целью диссертационной работы является повышение надежности силовых полупроводниковых преобразователей и электроприводов промышленных установок.

Идея работы. Повышение надежностных показателей в объектах исследования достигается за счет выбора рациональной схемы силовых цепей, резервирования узлов полупроводникового преобразователя и использования рациональных структур управления электроприводами.

Задачи исследования:

– уточнение и анализ требований технологического процесса к электроприводам промышленных дымососов;

– синтез методики оптимизации схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей;

– разработка математической модели электроприводов, работающих в пуско-тормозных режимах;

– оценка адекватности математической модели;

– разработка методики синтеза электроприводов по критерию надежности;

Методы исследований. В процессе выполнения работы использовались основные положения теории электрических машин, теории электропривода, теории полупроводниковой преобразовательной техники, частотные методы теории автоматического управления, методы математического моделирования систем на ЭВМ, метод конечных элементов, коэффициентный метод расчета надежности.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математических методов, обоснованностью принятых допущений, согласованностью экспериментальных данных и результатов моделирования исследуемых процессов.

Научные положения, выносимые на защиту и их научная новизна

1. Предложена методика оптимизации схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей, содержащая этапы выбора конфигурации схем силовых цепей по критерию минимума полупроводниковых ключей, выбора оптимальных количества фаз и резервных узлов, и отличающаяся принятым критерием – вероятностью безотказной работы. По сравнению с известной методикой синтеза по критерию суммарных годовых затрат разработанная методика позволяет снизить затраты на установленную мощность полупроводникового преобразователя.

2. Предложена математическая модель синхронных электроприводов, в которой параметры электрической машины представлены распределенными, полупроводниковый преобразователь – безынерционным звеном, и отличающаяся тем, что узел формирования фазных токов реализовывал пуско-тормозные режимы, что позволило уточнить осциллограмму тока при реализации интенсивных процессов пуска технологических объектов.

3. Разработана математическая модель электропривода на базе синхронной реактивной машины с независимым возбуждением с импульсно-векторной системой управления, обеспечивающая надежную работу электропривода, позволяющая выполнить расчёт различных режимов работы электропривода, отличающаяся тем, что для коммутации фазных токов цепи нагрузки используется всего один IGBT транзистор.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– предложенная математическая модель электропривода с импульсно-векторной системой управления СРМНВ с датчиком положения на валу двигателя, позволяющая решать задачи синтеза систем автоматического управления, анализа динамики систем управления, может быть положена в основу построения расчетной методики электроприводов, работающих с широким диапазоном регулирования скорости;

– методика синтеза силовой части и законов управления электропривода на базе СРМНВ для механизмов с пониженными скоростями вращения использована при разработке электроприводов промышленных механизмов и успешно применяется на производственных предприятиях, что подтверждается актами о внедрении.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

– и были приняты к внедрению в ООО НТЦ "Приводная техника" (г. Челябинск) при разработке электроприводов компрессорных установок;

– в учебном процессе на кафедре электропривода ФГАО ВО " Южно-Уральский государственный университет";

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

– "Электропривод и автоматизация промышленных установок" ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет", г. Челябинск;

– "Электропривод и электрооборудование" ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет".

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на следующих конференциях: XV научно-технической Международной конференции "Электроприводы переменного тока", Екатеринбург, 2012 г; VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012 г.; Международной конференции «Перспективные научные исследования», 2013г., София, Болгария; VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, из них –7 в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 - входящая в систему цитирования Scopus, 4 доклада на конференциях, 2 патента РФ на изобретение.

Личный вклад автора состоит в постановке задач научного исследования, разработке методов решения задач научного исследования, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [1, 3, 6] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента; в работах [12–17] разработка математических моделей; в публикациях[2, 4, 5, 7–11] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 163 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 12 таблиц, список используемой литературы из 139 наименований.

Соответствие научной специальности: исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и п. 1, 3 области исследования, приведенной в паспорте специальности 05.09.03 и – п. 3 (специальность 05.09.12).

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ

1.1. Обзор технологических объектов, питающихся от полупроводниковых преобразователей

Развитие экономики в индустриальном мире приводит к увеличению объемов промышленного производства, неотъемлемой частью которого является энергетика. Важное место в ней занимают полупроводниковые преобразователи напряжений, используемые во всех сферах производства передачи распределения и потребления электроэнергии. Основная доля производимых полупроводниковых преобразователей предназначена для осуществления питания и управления электрическими приводами (70-80% от общего числа преобразователей). Широкое распространение также получили полупроводниковые преобразователи для питания различных электротехнологических установок: электрические печи и электронагревательные установки, электросварочные установки, установки для электрофизической и электрохимической обработки металлов и др. Отдельно можно выделить полупроводниковые преобразователи, которые используются в качестве корректирующих устройств. Классификация полупроводниковых преобразователей по сферам применения приведена на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Классификация полупроводниковых преобразователей

Среди компенсирующих преобразователей наиболее перспективным видом являются динамические компенсаторы искажения напряжений (ДКИН). Функциональная схема такого преобразователя приведена на рис. 1.2.

Рис. 1.2. Функциональная схема динамического компенсатора искажения напряжений

Динамические компенсаторы применяются для обеспечения надежного и непрерывного электроснабжения потребителей в случае провалов напряжений в электрических сетях. ДКИН представляет собой полупроводниковый преобразователь напряжения (инверторный блок состоит из IGBT модулей), который подключен к сети питания потребителя и через вольтодобавочный трансформатор перераспределяет мощности таким образом, чтобы добавка напряжения на вторичной обмотке трансформатора полностью компенсировала провал напряжения при внешнем КЗ или просадке напряжения.

Диапазон мощностей существующих на сегодняшний день полупроводниковых преобразователей близок к 1012: от единиц кВт в приборных системах до десятков МВт для электроприводов насосов и компрессоров на перекачивающих станциях.

Полупроводниковые преобразователи широко применяются для питания электроприводов ответственных механизмов. Проблема надежности в таких установках стоит одной из первых. Стоит отметить, что с ростом удельных мощностей установок растет как их ответственность, так и величина последствий аварии при их отключении. На рис. 1.3. приведена гистограмма вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей.

Рис. 1.3. Гистограммы вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей

Анализ статистики, предоставленной специалистами отдела сервиса ООО НТЦ "Приводная техника", показал, что подавляющее число отказов (более 85%) полупроводниковых преобразователей происходит по причине выхода из строя силового транзисторного модуля. Причины отказов могут быть различными: токи короткого замыкания, перенапряжения, нарушение теплового режима, ошибки при проектировании и эксплуатации и др. модуль выпрямления и звено постоянного тока вместе приходится не более 15% отказов полупроводниковых преобразователей (см. рис. 1.4).

Рис. 1.4. Зависимость доли выходов из строя преобразователя напряжения по причине отказов узлов полупроводниковых преобразователей:

1 – силовой блок «транзистор – драйвер», 2 – узел выпрямления, 3 – блок емкостного фильтра

1.2. Особенности работы электропривода эксгаустера кислородного конвертора

В современной металлургии существенно возросла за последние десятилетия значимость кислородно-конвертерного производства. Так по данным [64] количество выплавляемой стали в кислородных конвертерах возросло с 431 до 811 млн. т. в год с 1996 по 2006 гг. что составило 65,5 % от суммарного мирового объема металла [57]. В частности, на Южном Урале конвертерное производство широко представлено на крупных промышленных предприятиях: Челябинском металлургическом комбинате, Магнитогорском металлургическом комбинате.

Преимуществом кислородно-конвертерного способа производства стали является высокая производительность процесса, простота устройства конвертора, отсутствие необходимости использования топлива для нагрева металла (вместо этого используется кислород), невысокие эксплуатационные расходы. Общий расход технического кислорода на получение 1 т. стали составляет 50 – 60 м³. Удельные капитальные затраты на выплавку одной тонны стали в конвертерных цехах в 1,5 – 2 раза ниже чем в мартеновских, а эксплуатационные расходы ниже на 28-45% [54].

Перед началом процесса плавки конвертор поворачивают в наклонное положение, загружают металлический лом и заливают жидкий чугун, имеющий температуру 1250 – 1400 °С. Затем конвертор ставят в вертикальное положение, загружают известняк, опускают водоохлаждаемую форму и подают кислород под давлением 1,0... 1,4 МПа. После окончания продувки конвертор снова наклоняют и производят слив годного металла. Продолжительность плавки в современном конвертере составляет 30 – 45 мин. Очередность и продолжительность операций приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Очередность и продолжительность операций плавки стали в кислородном конвертере

№ п/п	Операция
1	Продолжительность операции, мин.
1	Завалка лома и заливка чугуна
5-10	2
2	Продувка кислородом
12-17	3
3	Повалка, отбор проб, замер температуры
4-6	4
4	Слив металла и шлака
6-9	5
5	Осмотр футеровки, подготовка к следующей плавке
2-3	Итого
29-45	

На рис. 1.5 представлен внешний вид макета кислородного конвертора, механизма эксгаустера, системы электропривода эксгаустера, а также пеллеулавливающей системы.

При конвертерном способе производства стали происходит сильное пылеобразование, обусловленное обильным окислением и испарением железа. Это требует обязательного сооружения при конвертерах сложных и дорогих пылеочистительных установок [17]. Таким образом, роль эксгаустеров и дымососов в конвертерном производстве крайне высока.

Ниже приведены показатели работы кислородного конвертора, на которые оказывает влияние работа газочистительной системы.

Производительность. При недостаточном отводе образцованных при плавке газов повышается, содержащиеся в них, будут оседать на верхнем слое металла в конвертере, что приводит к увеличению доли шлака, а следовательно, уменьшению количества годного металла.

Рис. 1.5. Внешний вид макета кислородного конвертора, механизма эксгаустера, системы электропривода эксгаустера, а также пеллеулавливающей системы.

Качество плавки. Продувка осуществляется до тех пор, пока содержание углерода и примесей в стали не будет соответствовать требуемым значениям. При недостаточном отводе образовавшихся газов пыль, содержащаяся в них, будет возвращаться в конвертор, тем самым ухудшая качество получаемой стали. Энергосбережение. Температура конверторных газов достигает 1500—1700° [78]. Таким образом, они являются источником тепловой энергии, которую можно использовать в производственных нуждах.

Экология. Эксгаустеры засасывают продукты реакции окисления, которые содержат серу, фосфор, магний, и т.д. Все эти элементы, взвешенные в воздухе, при высокой концентрации вредны для здоровья человека. Необходима фильтрация этих газов в газоочистительной системе, одним из основных элементов которой помимо фильтров является эксгаустер.

Основным показателем работы кислородного конвертора является себестоимость выработки 1 т. стали. Все усилия по модернизации таких установок направлены на снижение этого значения.

1.3. Обзор проблем в электроприводах эксгаустеров

В настоящее время в мире насчитывается около 280 кислородно-конверторных цехов [64], которые производят порядка 70% от общего числа углеродистой, низколегированной и легированной стали в год. Примерно седьмая часть (35-40) таких цехов располагается на территории России. В каждом из цехов находится обычно 3 или 4 кислородных конвертора, каждый из которых в свою очередь оснащён промышленным дымососом – эксгаустером. Таким образом, в настоящий момент на территории нашей страны функционирует порядка 100 мощных эксгаустеров. Подавляюще большинство этих установок были созданы еще в советские годы, лишь незначительная часть из них была введена в эксплуатацию в XXI веке. Этот факт говорит о том, что на сегодняшний день достаточно большой группе механизмов требуется модернизация.

В большинстве своем на электроприводы эксгаустеров устанавливаются синхронные машины [39, 42, 34, 91]. Это обусловлено рядом факторов, важнейшим из которых является способность синхронных машин работать в режиме компенсации реактивной мощности. Поскольку эксгаустер должен работать на протяжении всей плавки, процесс возврата реактивной энергии в сеть происходит также длительный промежуток времени (остановки производят только в аварийных ситуациях и для проведения планово-предупредительных мероприятий), что заметно сокращает расходы на электрическую энергию всего производства. По данным энергетиков Челябинский цинковый завод за 2015 г. потребил 800 млн. кВт·ч электрической энергии стоимостью около 1,4 млрд. руб. На Магнитогорском Металлургическом комбинате за аналогичный период времени было использовано 7622 млн. кВт·ч, и затрачена сумма 13 млрд. руб. Параметры синхронной машины, установленной на эксгаустере кислородного конвертора ЧМК, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2.
Параметры электродвигателя ДСПУ-140/84-4-УХЛ4
№
Параметры электродвигателя
Величина
1
Тип синхронного двигателя
ДСПУ-140/84-4-УХЛ4
2
Номинальная мощность, кВт
2500
3
Синхронная скорость вращения, об/мин
1500
4
Номинальное напряжение статора, В
6000
5
Номинальный ток статора, А
280
6
Напряжение возбуждения, В
25
7
Ток возбуждения, А
400
8
Номинальный cos φ
0,9

Долгое время электропривод эксгаустера оставался нерегулируемым. Такая ситуация объяснялась недостаточным развитием полупроводниковой техники для создания мощных и надежных преобразователей и возбудителей для синхронных машин. На самом деле, если проанализировать работу кислородного конвертора, то можно заметить, что наибольшее образование газа в конверторе происходит во время продувки металла кислородом, что занимает почти половину времени процесса плавки [52,2]. Все остальные операции, а именно: завалка лома и заливка чугуна, повалка, отбор проб, замер температуры, слив металла и шлака происходят при меньшем количестве образованного вредного газа. В этой связи целесообразно переводить электропривод механизма газуловителя на пониженную скорость в указанные промежутки времени. Остановка электропривода эксгаустера во время вспомогательных операций экономически неэффективна, так как потери энергии при пуске очень велики (см. табл. 1.4). Полное отключение системы газоочистки невозможно также для предотвращения обратного выброса образовавшихся газов из коллектора в рабочее пространство цеха.

Произведем расчет потерь при различных видах пуска с различной нагрузкой.

Таблица 1.3
Исходные данные для расчета
№
Параметр
Значение
1
Номинальная мощность двигателя, кВт
315
2
Синхронная скорость, об/мин
1000
3
Номинальная скорость, об/мин
987
4
Активное сопротивление обмотки статора, Ом
0,0074
5
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом
0,0153
6
Момент инерции двигателя, кг·м2
3,48
7
Номинальный момент, Н·м
3047,9

Таблица 1.4.
Результаты расчета потерь в асинхронном двигателе при различных способах пуска с различными видами нагрузок
№
Режим
Величина потерь, Вт
Величина потерь, о.е
Прямой пуск
1
Холостой ход
27574
0,12
2
Номинальный момент
233601
1
3
Вентиляторный закон изменения нагрузки
101601
0,43
Частотный пуск
1
Холостой ход
108
0,005
2
Номинальный момент
21074
0,11
3
Вентиляторный закон изменения нагрузки
15349
0,065

Результаты расчетов сведены в табл. 1.4. Технологические требования, предъявляемые к электроприводам различных механизмов, сведены в табл. 1.5. В таблице выделены величины того или иного параметра для механизмов с вентиляторным типом нагрузки.

Таблица 1.5.
Технологические требования, предъявляемые к электроприводам различных механизмов
№
Точность поддержания момента
Характер момента
Быстродействие
Диапазон регулирования момента
Точность поддержания скорости
Наличие реверса
Быстродействие
Диапазон регулирования скорости
1
высокая
активный момент
высокое
большой
высокая
требуется
высокое
большой
2
средняя
реактивный момент
умеренное
ограниченный
средняя
не требуется
умеренное
ограниченный
3
не требуется
не требуется
не требуется
не требуется
не требуется
не требуется

Как можно видеть из табл. 1.5, все требования к параметрам электроприводов с вентиляторным типом нагрузки весьма невелики. Известно, что основным требованием, предъявляемым к механизму промышленного дымососа, является надежность. Повышение надежности работы газоочистительной системы будет способствовать увеличению количества годного металла, уменьшению брака и улучшению качества получаемой стали.

Существуют технологические механизмы (эксгаустеры кислородных конверторов, печей и т.д.), в которых остановка работы промышленного дымососа приводит к тяжелым последствиям, вплоть до остановки плавки и слива металла из котла конвертора. По данным опроса специалистов ОАО ЧМК, отказы эксгаустера на кислородном конверторе случаются с частотой в среднем один раз в два месяца. Причиной остановок в настроенной системе электропривода служат отключение преобразователя частоты по максимально токовой защите, а также отказы в системе возбуждения синхронного двигателя. Ниже приведен расчёт экономических потерь от простоя оборудования кислородно-конверторных цехов. Стоимость углеродистой стали на официальном рынке составляет примерно 500 долларов за тонну (по данным на 2015 г.). Вместимость современных конверторов варьируется от 100 до 250 т., существуют также сверхкрупные кислородные конверторы вместимостью 300-350 т. Четыре сверхкрупных конвертора расположены на территории России (Череповецкий, Магнитогорский, Новолипецкий и Западносибирский металлургические комбинаты).

Продолжительность плавки варьируется от 40 до 60 минут в зависимости от объема и качества выплавляемой стали. В среднем сутки простоя кислородного конвертора средней мощности порядка 200 т обойдётся в: 200 (т) · 24 (плавки) · 500 (\$) = 2,4 млн. долларов США убытков от не выпущенной стали. Помимо экономического вреда, остановка эксгаустера может нанести вред здоровью обслуживающего установку персонала, так как газы, образовавшиеся в процессе плавки, на 80-90% состоят из углекислого газа, содержат до 170 г/м пыли и имеют температуру 15001700° С.

В этой связи при модернизации данного типа электроприводов стоит учитывать два основных параметра системы: надежность и экономичность. Обеспечить регулирование скорости в заданном диапазоне и увеличить надежность системы электропривода можно при помощи установки преобразователей частоты. Помимо регулирования скорости, с помощью преобразователей частоты можно обеспечить плавные пуски двигателей в работу, что положительно отразится на энергетике рабочих процессов. Однако, как уже было отмечено выше, необходимость частых пусков и остановов электроприводов эксгаустеров отсутствует. В работе таких механизмов преобладают установившиеся режимы работы. Таким образом, частотные преобразователи имеют избыточные регулировочные возможности, за которые приходится платить завышенной стоимостью. В настоящее время нет оценки выгоды от применения более простых схем в системах управления электроприводов таких механизмов без ухудшения качества работы. В этой связи актуальной является попытка создания системы управления, которая характеризуется, с одной стороны, низкой стоимостью, а с другой – удовлетворяет большому количеству предъявляемых требований.

1.4. Существующие пути повышения надежности полупроводниковых преобразователей и электрических приводов
В наибольшей степени требованиям надежности отвечают электроприводы с новыми, нетрадиционными типами конструкций электрических машин. Такие электроприводы характеризуется большим разнообразием схем и решений. Электротехнические комплексы на базе вентиляно-индукторных электроприводов или реактивных машин получили широкое распространение в последние годы [10, 12, 28, 30, 48, 85, 100, 19,23]. Изученность вариантов таких схем электроприводов следует считать недостаточными для уверенного и успешного применения на практике, в частности в электроприводах металлургических механизмов, отличающихся тяжелыми условиями эксплуатации. Одним из примеров такой системы может служить импульсно- векторная система управления { ИВСУ} синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [74].

Рис. 1.6. Пример упрощенной схемы импульсно-векторного управления СРМНВ
Сама машина отличается простотой конструкции ротора и высокой технологичностью изготовления [100, 24, 56, 62, 65]. В исходном случае схема силовых цепей выполняется многофазной с индивидуальными источниками питания [66, 70, 71, 72,73]. Отказ от индивидуальных источников в пользу более простой схемы приводит к структуре с импульсно-векторным управлением [74] (см. рис. 1.6.). На рисунке L1…L6 – фазные обмотки машины, силовая часть полупроводникового преобразователя представляет собой трехфазную мостовую схему, выполненную на диодах, имеется всего один транзистор (независимо от фазности системы). Наличие в преобразователе всего одного IGBT транзистора приводит, в первую очередь, к повышенной надежности схемы (чем меньше количество элементов в схеме, тем она более надежна), а во вторую – к относительной дешевизне данной системы. Импульсно-векторная схема может обеспечить требуемый для механизма эксгаустера диапазон регулирования скорости 1:2 или 1:3. В настоящее время эксгаустрои эксгаустера реализован на частотно-регулируемом синхронном электроприводе [34]. Существующее решение, как уже было отмечено выше, имеет свои преимущества и недостатки. Вместе с тем, низкие показатели надежности частотно-токового управления синхронной машины открывают перед нами широкий простор для совершенствования электропривода эксгаустера.

Повышение надежности механизма электропривода предлагается произвести по двум направлениям: 1) изменение типа электропривода предлагаемой системы электропривода эксгаустера. За базовые величины приняты существующие показатели электропривода эксгаустера.

Таблица 1.6.

Сравнение различных систем электроприводов промышленного эксгаустера по критериям экономичности и надежности

Показатель
Частотно-регулируемый синхронный электропривод
ПЧ-АД
ИБСУ-СРМНВ
Надежность двигателя
1
1,1
1,2
Надежность силовых преобразователей
1
1,2
1,4
Стоимость двигателя
1
0,9
0,85
Стоимость полупроводниковых преобразователей
1
0,95
0,7 -0,8

Коэффициенты в этой таблице будут подкреплены результатами расчетов и экспериментов, освещенных во второй главе.

Ввиду конструктивных особенностей асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (отсутствие контактных колец на роторе, упрощение изоляции обмоток ротора, технологичность изготовления двигателя), его надежность относительно синхронного двигателя той же мощности будет несколько выше.

Надежность электромеханического преобразователя ИБСУ-СРМНВ повышается за счет конструктивных особенностей самой машины. В первую очередь у СРМНВ отсутствует необходимость подведения электрической энергии к вращающимся частям машины, т.к. на роторе отсутствуют обмотки, вследствие чего отсутствует коллектор. Ротор машины может выполняться монолитным, что повышает его механическую прочность, уменьшает деформации ротора эксгаустера.

Повышение надежности системы управления в ИБСУ достигается упрощением преобразователя напряжения, подаваемого на статор машины (один управляемый ключ вместо шести), а также исключением целого устройства в силовой части электропривода – возбудителя. Отказ от такого сложного элемента системы значительно увеличивает надежность системы порядка на 30% (статистика отказов по причине поломки или неисправности возбудителя экспертов с ЧМК и специалистов ООО «Приводная техника»), позволяет снизить трудозатраты обслуживающего установочного персонала, уменьшить эксплуатационные затраты.

При внедрении предлагаемого электропривода неизбежной становится проблема согласования напряжений. В преобразователе имеется IGBT транзистор на номинальный ток 1000 А и напряжение 600 В. Существующее энергообеспечение осуществляется по внутриводской сети от собственной понизительной подстанции на 6 кВ. Таким образом, для питания нашей машины необходимо будет организовать пониженное напряжение 600 В. С другой стороны, снижение напряжения электроустановки приведет к снижению требований к квалификации эксплуатирующего и ремонтного персонала, т.к. в установках с напряжением до 1000 В допускается электротехнический персонал с II и выше группой электробезопасности.

1.5. Постановка задачи исследований

На сегодняшний день в связи с развитием элементной базы в преобразовательной технике наблюдаются следующие тенденции:

- рост единичной мощности преобразователя;
 - снижение стоимости полупроводниковых преобразователей;
 - появление интегральных модулей «IGBT ключ – драйвер» в едином корпусе, что позволяет снизить габариты устройств, обеспечить эргономичность и удобство проектирования и эксплуатации преобразовательных устройств.
- Однако, при всей положительной динамике, стоит отметить некую инерционность в промышленном производстве полупроводниковых преобразователей. Крупным компаниям-производителям силовой преобразовательной техники требуется значительное количество времени для разработки, производства и «обкатки» новых технических решений. Так, например, линейка преобразователей частоты компании ABB ACS800 вышла на рынок в начале 2000-ых годов. Следующий продукт компании, в котором были исправлены все недостатки, усовершенствованы алгоритмы управления и установлены силовые ключи нового поколения, ABB ACS880 появился лишь спустя десятилетие в начале 2010-ых годов. Идентичная ситуация в компании Siemens с ее последними линейками преобразователей Simovert, вышедших в начале XXI века, и современных преобразователях Sinamics, появившихся на рынке несколько лет назад.

В полной мере раскрыть все потенциальные возможности полупроводниковой техники могут менее крупные промышленные компании, имеющие меньшую инерционность производства, и обладающие способностью гибко подходить к ситуации на рынке. Челябинский НТЦ «Приводная техника», являясь такой компанией, занимается разработкой и производством полупроводниковых преобразователей. Применение последних новинок в полупроводниковой технике и использование нетрадиционных схемных решений позволяет осуществлять прорывные разработки в области полупроводниковых преобразователей, таких, как трехуровневых преобразователей частоты «Momentum» и динамический конденсатор искажения напряжения на базе современных IGBT модулей.

Проанализировав требования **технологического процесса к электроприводу** промышленного дымососа, были **сформулированы следующие задачи для достижения поставленной цели работы** – повышение надежности показателей электропривода эксгаустера кислородно-конверторного производства:

- сравнение различных систем электроприводов по критериям экономичности и надежности;
- разработка математической модели электропривода с импульсно-векторной системой управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением;
- оценка адекватности математической модели;

– разработка методики синтеза силовой части и системы управления электропривода;

Сравнение существующих систем электроприводов должно производиться по наиболее важным для механизма эксгаустера показателям – надежности и экономичности. Для анализа необходимо использовать статистические данные наработок на отказ различных устройств, входящих в систему электропривода.

Разрабатываемая математическая модель должна наиболее полно описывать работу импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной с независимым возбуждением, иметь простую структуру, содержать несколько блоков для возможности проверки адекватности каждого из них. В составе модели наиболее подробно должны быть представлены электрический и электромеханический преобразователи, т.к. от работы именно этих устройств наиболее сильно зависит надежность всего комплекса.

Оценку адекватности модели необходимо производить при сравнении работы составляющих ее элементов и работы реальных устройств, входящих в состав системы электропривода.

Методика синтеза силовой части электропривода и системы управления должна отвечать требованиям простоты и при этом однозначно приводить к результату. При составлении методики необходимо учитывать новые возможности электроприводов, выполненных на базе нетрадиционных типов электрических машин. **Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения** характеризуются простотой конструкции (вследствие чего достигаются повышенные надежность показатели), имеют большую перегрузочную способность, а также высокие регуляторные показатели, что может быть успешно использовано **при синтезе системы** электропривода.

1.6. Выводы по главе 1

1. Анализ требований и условий ведения технологического процесса электропривода эксгаустера кислородного конвертора позволил определить наиболее узкие, с точки зрения надежности, места существующей системы электропривода, к которым следует отнести: наличие возбудителя синхронной машины в силовой части электропривода, большое количество управляемых полупроводниковых элементов в схемах силовых цепей преобразователя напряжения, наличие контактного двигателя в электроприводе, работающем в тяжелых условиях.

2. Обзор существующей научной и технической информации по надежности работы кислородно-конверторных агрегатов, и их электроприводов [54, 78, 104,51] подтверждает мнение автора работы о том, что безаварийная работа эксгаустера кислородного конвертора исключает такие тяжелые последствия, как: остановки плавки и слива металла из котла конвертора, что в свою очередь приводит к многомиллионным убыткам, риск нанесения вреда жизни и здоровью персонала сталеплавильного цеха.

3. Предложенные автором в сотрудничестве с **работниками кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных комплексов» Южно-Уральского Государственного Университета [74]** способ и устройство импульсно-векторной системы регулирования скорости электропривода с СРМНВ, характеризуется рядом положительных качеств (бесконтактность и простота конструкции двигателя, малое число управляемых полупроводниковых элементов, относительная простота и дешевизна системы управления). Вместе с тем, в силу своей новизны требует более глубокого изучения в плане решения следующих вопросов: энергетика электропривода, величины предельных моментов и факторы, их ограничивающие, уровень пульсаций момента и тока, габаритные размеры двигателя и преобразователя, устойчивость замкнутой системы и выбор типа регуляторов.

ГЛАВА 2. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

2.1. Анализ существующих методов повышения надежности показателей

Надежность электрической системы – это свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих требуемым режимам и условиям использования.

Надежность является комплексным свойством, кот **ФФ**рое, в зависимости от назначения электрического привода и условий его эксплуатации, включает в себя такие свойства системы, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств. В современной литературе [21, 107,13] при описании надежности системы часто пользуются понятием вероятности безотказной работы P(t)– вероятности того, что в пределах заданного времени t работки системы не возникнет ни одного отказа.

Для системы электропривода эксгаустера необходимо сочетание всех названных четырех свойств. Тогда под надежностью электропривода эксгаустера будем понимать функцию P(t)=B(t)+Д(t)+Рем+С(t), где B(t) – произведение вероятности безотказной работы всех элементов; Д(t) – долговечность – параметр, заваемый фирмой-производителем; Рем – ремонтопригодность – свойство, зависящее от унификации и сложности элементной базы устройства, а также квалификации и технической оснащенности персонала эксплуатирующего предприятия; С(t) – свойство машины сохранять исправное и работоспособное состояние в течение всего гарантийного срока службы после хранения и транспортирования.

Вероятность безотказной работы системы Рис есть произведение вероятностей безотказной работы всех элементов, входящих в систему Pi. Основными элементами системы электропривода, определяющими надежность всего комплекса, являются двигатель и преобразователь. Именно для них и имеет смысл считать вероятность безотказной работы.

Расчетный срок службы асинхронных двигателей - не менее 15 лет при наработке 40 тыс. часов или 4,5 года непрерывной работы (мощности асинхронных двигателей серии 4А от 0,37 кВт до 400кВт). Наробotka обмотки статора - не менее 20 тыс. часов, расчетная наработка подшипников - не менее 14 тыс. часов. Вероятность безотказной работы РАД электрического асинхронного двигателя промышленного исполнения - не менее 0,9 за 10 тыс. часов наработки. Другими словами, это означает, что с вероятностью 0,9 за время работы 10000 часов асинхронный двигатель ни разу не выйдет из строя [20].

Удовлетворительным значением показателя вероятности безотказной работы РП для преобразователя является 0,9 в течение 10000 часов. [47].

Из классификации Правил Устройства Электроустановок [75] известно, что по степени надежности все электроустановки делятся на три категории: первая категория, из состава которой выделяют особую группу, вторая и третья категории электроприемников.

Воздуходувки, насосы, компрессоры, вентиляторы относятся, как правило, к первой категории надежности, а на ряде производств, (металлургических, химических) – к «особой» группе той же категории. Эксгаустеры кислородно-конверторного производства относят к категории особых электроприемников, так как их бесперебойная работа необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров.

Примером электрооборудования из «особой» группы по электробезопасности и, соответственно, надежности, может служить электропривод трубопроводной арматуры на атомных электростанциях. В табл. 2.1 приведены количественные значения вероятности безотказной работы механизмов трубопроводной арматуры АЭС [101].

Таблица 2.1.

Количественные значения вероятности безотказной работы механизмов трубопроводной арматуры АЭС №

Наименование

Вероятность безотказной работы за период до капитального ремонта, не менее

1	Арматура запорная систем нормальной эксплуатации, в том числе:
2	электроприводная и с ЭМП
0,95	
3	электроприводная с промежуточным редуктором
0,93	
4	с ручным управлением
0,98	
5	с ручным управлением с промежуточным редуктором
0,96	
6	с ручным дистанционным управлением
0,96	
7	с ручным дистанционным управлением с промежуточным редуктором
0,94	
8	Арматура регулирующая:
9	систем безопасности
0,96	
10	систем нормальной эксплуатации, важных для безопасности
0,94	
11	других систем нормальной эксплуатации
0,9	
13	Арматура (кроме регулирующей) систем безопасности
0,995 на 25 циклов	
14	Электроприводы и ЭМП арматуры систем безопасности
0,998 на 25 циклов	
15	Электроприводы и ЭМП арматуры других систем
0, 98	

Можно подчеркнуть, что в современной промышленности надежность производства выходит на передний план и является одним из определяющих факторов работы электропривода наряду с производительностью и экономичностью.

2.1.1. Экономический подход обоснования надежности показателей электропривода
Устранение причин, снижающих надежность функционирования оборудования, производят на всех стадиях жизненного цикла его существования: проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Эксплуатационная надежность оборудования зависит не только от базовой надежности, которая создается на первых трех стадиях, но и от уровня его эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Повышение надежности является не самоцелью, а средством достижения эффективности функционирования оборудования. Теоретически, возможно достижение уровня надежности, близкого к единице, однако затраты для обеспечения этого показателя могут свести на нет целесообразность его применения.

На рис. 2.1 приведены экспериментальные данные Жиркина Ю.В. [32], отражающие зависимость затрат на создание и эксплуатацию промышленного оборудования от уровня надежности. Экспоненциальная форма кривой зависимости затрат от вероятности безотказной работы обусловлена экспоненциальным (нормальным) законом распределения вероятности безотказной работы.

Проанализировав зависимость, можно сделать ряд выводов. Исходя из формы кривых общего уровня затрат, все промышленные электрические установки можно условно разбить на три категории. В I зоне находятся электроустановки неотвественных производств, где экономически более выгодно сделать новое дешевое и малонадежное устройство, чем производить дорогостоящее надежное оборудование или обеспечивать модернизацию и ремонт старого. Во II зоне располагаются общепромышленные механизмы, надежность которых лежит в пределах от 0,5 до 0,8. Таких показателей надежности можно достичь относительно невысокими затратами на техническое обслуживание и ремонт, а также увеличенным количеством средств на создание объекта. Объекты в III зоне обладают повышенной надежностью и применяются на производствах, где существует угроза жизни и здоровью людей при отказе оборудования. К объектам третьей категории можно отнести металлургическое производство, в том числе механизм эксгаустера кислородного конвертора.

Рис. 2.1. Зависимость уровня затрат на создание и эксплуатацию

оборудования от надежностиP; 1 – затраты на создание,

2 – затраты на техническое обслуживание и ремонт,

3 – затраты на модернизацию,

4 – общие затраты с учетом модернизации,

5 – общие затраты без модернизации

Из анализа взаимосвязи уровня надежности и всех видов затрат видно, что с увеличением базовой надежности затраты на создание оборудования возрастают. Особенно значительен этот рост при величине надежности 0,8 и выше. Оптимальную эксплуатационную надежность, равную 0,8...0,9, следует считать средней заданной величиной надежности металлургического оборудования. Обычно этот уровень лежит в пределах 0,8...0,95. Для особо ответственных изделий гамма-процентный ресурс достигает 99,9 % (например, для пилотируемой космической техники).

Судя по кривой общих затрат, оптимальный уровень надежности без модернизации составляет всего 0,7-0,8, что не соответствует требованиям металлургического производства.

Характер кривых в зонах повышенной надежности 0,95...1 можно объяснить следующим образом. Устраняя негативное воздействие основного фактора, влияющего на надежность системы, большее влияние на надежность начинают оказывать прочие, ранее малозначимые факторы, на снижение влияния которых также требуется затрачивать средства. Так, например, у электрических двигателей наибольшее число отказов (90%) происходит по причине выхода из строя обмоток машины. Если произвести комплекс мероприятий, сделать изоляцию обмоток из новейших материалов, улучшить отвод тепла от греющихся элементов, повысить качество вентиляции и охлаждения, то на передний план выйдут отказы по причине выхода из строя подшипников, хотя до модернизации доля отказов машин по этой причине составляла небольшую долю, лишь 5...8%. Если теперь основной упор мероприятий по увеличению надежности машины делать на совершенствование подшипников и добиться здесь хороших результатов, то неудовлет**ФФ**рительными (но уже на более высоком уровне) вновь окажутся показатели изоляции обмоток, что приведет к новому витку модернизации и кратному удорожанию объекта совершенствования.

Еще одним объяснением асимптотического вида кривых затрат при приближении к значению единичной надежности является то, что при таких высоких показателях надежности (0,99 и выше) очень велика роль эксплуатационных факторов, человеческого фактора, а также форс мажорных ситуаций. Определение оптимальной долговечности оборудования основано на экономическом подходе [82,110]. На рис. 2.2 приведены зависимости себестоимости продукции от срока службы. Суммированием всех затрат получают общую зависимость себестоимости продукции от срока службы машины. Она имеет четко выраженный минимум Spin, который соответствует определенному сроку службы. Срок службы машины, при котором достигается наименьшая себестоимость единицы продукции, считают оптимальным сроком Топт ее службы по физическому износу.

Существуют такие устройства, которые некоторую часть времени

Рис. 2.2. Зависимость себестоимость продукции С от срока службы Т;

1 – сумма затрат; 2 – эксплуатационные расходы;

3 – амортизационные отчисления

эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не выполняют свои основные задачи. Для таких устройств наибольшая часть отказов связана с коррозией, вредным воздействием грязи, пыли, температуры и влаги. Для устройств, большую часть времени использующихся по назначению для выполнения полезной работы, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов объекта значительно ниже, чем в рабочем состоянии. Так, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30 [32].

Подводя итог выше сказанному, следует сделать вывод о необходимости соблюдения баланса между показателями надежности электропривода и капитальными затратами на его создание и эксплуатацию, исходя требований, предъявляемых к конкретному механизму в конкретных условиях.

2.1.2. Анализ существующих методов увеличения времени безотказной работы электроприводов

При рассмотрении надежности электропривода больше внимание стоит уделить надежности двух основных элементов системы, а именно – электрического преобразователя и электромеханического преобразователя. Статистика отказов [79, 22, 111,93] говорит о том, что именно по причине выхода из строя этих элементов происходят отказы систем электропривода на производстве.

Производители часто скрывают реальные показатели надежности своего продукта. Чуть ли не единственным параметром, который можно встретить в паспорте или шильдике электрического устройства, является гарантированный срок службы. Лучший способ оценить показатели надежности объекта – это экспертный (или экспериментальный) способ.

Согласно [21], средний срок службы наиболее распространенных на производстве асинхронных двигателей общепромышленной серии составляет 15 лет при наработке 40000 часов непрерывной работы. При этом наработка активных частей обмотки статора – не менее 20000 часов, наработка подшипников – не менее 10000 часов. Таким образом, вероятность безотказной работы асинхронного двигателя серии 4А средней мощности составляет 0,9 при 10000 ч наработки. По экспертным оценкам, в 95% случаев отказы происходят из-за повреждения фазных обмоток машин, и порядка 5% электродвигателей отказывают из-за повреждения подшипников [18]. Около 35% отказов происходит из-за низкого качества изготовления двигателей. Порядка 50% отказов происходит по причине нарушений условий эксплуатации, например, неудовлетворительной тепловой защиты. Остальные 15% отказов приходится на несоответствие конструктивного исполнения электродвигателей условиям эксплуатации.

Как уже было отмечено выше, наиболее «слабым местом» с позиции безотказной работы электрической машины являются обмотки. С точки зрения надежности изоляцию обмоток асинхронных двигателей можно рассматривать как систему, состоящую из последовательно соединенных звеньев. Такими звеньями являются изоляция пары соседних проводников, пазовая изоляция, межфазовая изоляция в лобовой части, а при двуслойной обмотке появляется необходимость учитывать надежность изоляции между секциями. Поскольку отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, то надежность (вероятность безотказной работы) обмотки может быть определена согласно теореме умножения вероятностей [18,14] по формуле:

$$P_{обт} = \prod_{i=1}^n P_{пары} \prod_{i=1}^n P_{паз} \prod_{i=1}^n P_{межф} \prod_{i=1}^n P_{секци}$$

Необходимо отметить, что в приведенной формуле не все сомножители равноценны. Наименьшее значение имеет первый сомножитель (надежность межвитковой изоляции пары проводников), который в основном и определяет надежность обмотки. Это объясняется двумя факторами: относительно низкой надежностью межвитковой изоляции, т.к. на малых и средних мощностях проводники имеют относительно маленькие размеры, 0,1...1 мм² в сечении, что делает задачу создания надежной изоляции таких проводников сложной, а вследствие этого дорогостоящей задачей; и значительным числом проводников в одной ветви в асинхронном двигателе. Статистика отказов электрических машин по причине выхода из строя какого-либо типа изоляции следующая: межвитковые замыкания – 93%, пробой пазовой изоляции – 2%, пробой межфазной изоляции 5%. Низкий процент отказов пазовой и фазной изоляции объясняется технологичностью их изготовления. Таким образом, можно сделать вывод о том, что, увеличение или уменьшение количества фаз в машине, а вследствие этого изменение площади фазной изоляции не приведет к серьезному изменению надежности изоляции обмоток машины.

Помимо вероятности безотказной работы, для описания надежности применяют также показатель наработки на отказ. Нарботка – это продолжительность или объем работы объекта, измеряемый в часах, мото-часах, гектарах, километрах пробега, циклов включений и др. Измеряется статистически, путём испытания множества приборов или вычисляется методами теории надёжности:

$$T = 1/m * \sum t_i$$

где t_i – наработка i -го объекта между отказами; m – число отказов.

В табл. 2.2 приведены значения наработки на отказ преобразователей напряжения различных производителей, указанные самими производителями в каталогах [121].

Таблица 2.2.

Значения наработки на отказ преобразователей напряжения различных производителей

№	Производитель
1	Заявленное значение наработки на отказ, ч.

1	Siemens
2	400000
3	ERMAN
4	280000
5	ESD-TCL
6	50000
7	4
8	Триол
9	15000

Замечено, что на долю ошибок проектирования систем электроприводов приходится до 40...50% всех отказов преобразователей. Отказы из-за ошибок (дефектов) производства возникают в 20...30% случаев. На долю ошибок оператора приходится примерно 25...35% всех отказов.

Надежностные свойства микропроцессорных систем, используемых в преобразователях напряжения, не зависят от мощности и фазности преобразователя, поэтому в дальнейших расчетах примем их за константу и этими составляющими преобразователя при расчете его надежности будем пренебрегать. Основными элементами силовой части полупроводниковых преобразователей частоты являются: выпрямитель, который чаще всего выполнен на неуправляемых полупроводниковых элементах – диодах, инвертор, выполненный на IGBT-транзисторах и звено постоянного тока – конденсатор. При составлении картины надежности преобразователя необходимо иметь представление, какова доля отказов, произошедших из-за неисправностей того или иного элемента.

Как у диодов, так и у транзисторов отказы могут быть вызваны короткими замыканиями (теплоэлектрической пробой), обрывами и изменениями параметров. Статистика отказов приведена в [113]. Например, для диода 2Д522 минимальная наработка составляет 80000 часов, а в облегченном режиме – около 100000 часов.

Интенсивность отказов транзистора составляет примерно

$$\lambda_T = 1 * 10^{-7} \cdot \gamma - 1 \text{ или порядка } 50000 \text{ часов безотказной работы при } P = 0,95 [120].$$
 Этот показатель может сильно варьироваться в зависимости от номинального рабочего тока, технологии изготовления и производителя.

Интенсивность отказов для транзисторов рассчитывают по зависимости:

$$\lambda_z = \lambda_{бсг} \cdot K_p \cdot K_{дн} \cdot K_{ф} \cdot K_n \cdot K_{э} \cdot K_{к},$$

где λ_z – значения эксплуатационной интенсивности отказов; $\lambda_{бсг}$ – значения базовой среднетемпературной интенсивности отказов; K_p – коэффициент режима, $K_{дн}$ – коэффициент динамической нагрузки; $K_{ф}$ – коэффициент функциональности; K_n – коэффициент нагрузки; $K_{э}$ – коэффициент жесткости условий эксплуатации; $K_{к}$ – коэффициент качества изготовления. Значения коэффициентов берутся из соответствующих таблиц и справочных материалов [112].

Вероятность отказа двух последовательно соединенных транзисторов равна $P_2 = P_1 \cdot P_1 = 0,95 \cdot 0,95 = 0,9025$. С увеличением количества последовательно соединенных транзисторов вероятность их безотказной работы падает по экспоненциальной зависимости.

На рис. 2.3 приведены зависимости количества термоциклов транзистора от рабочей температуры. На рис. 2.4 приведена зависимость наработки на отказ микросхемы от температуры кристалла.

Чаще всего в преобразователях частоты применяются электролитические конденсаторы. С прогрессом современных технологий показатели долговечности всех элементов, применяемых в электронике и электротехнике, возрастает. Так, например, срок службы ниобиевых конденсаторов составляет порядка 250000 часов [114]. Возможными причинами выхода из строя конденсаторов являются чаще всего высыхание, перегрев, нарушение герметичности. Чем больше емкость конденсатора, тем больше его объем, т.е. больше площадь корпуса, соответственно, возрастает вероятность нарушения герметичности, с другой стороны, повышается теплоотдача.

Рис. 2.3. Зависимость количества термоциклов $N_{fот}$ от средней температуры T_t и градиента dT ; 1 – $T_t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T_t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$,

3 – $T_t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, 4 – $T_t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, 5 – $T_t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

По наблюдениям специалистов ООО НТЦ «Приводная Техника», долгое время эксплуатирующих частотные преобразователи, применяемые на сегодняшний день, в электроприводах электролитические конденсаторы могут служить 10 и более лет. Основываясь на многолетнем опыте, можно сказать, что надежность конденсаторов, используемых в современных электроприводах, значительно превышает надежность транзисторов. Следовательно, при расчете надежностных показателей преобразователя, вероятность безотказной работы конденсаторов мы учитывать не будем.

Рис. 2.4. Зависимость гамма-процентной наработки до отказа Тумикросхемы от температуры кристалла $T_{кр}$; 1 – $\gamma = 97,5\%$, 2 – $\gamma = 99\%$

Таким образом, наиболее «узким местом» с позиции надежности в преобразователе будем считать силовые транзисторы. По этой причине все предпринимаемые усилия по повышению надежности преобразователей будут направлены на повышение надежности применяемых полупроводниковых элементов либо на сокращение их количества в силовой схеме.

Существует два основных метода повышения надежности любой системы [5, 41, 32,18]: а) введение внутренней избыточности системы; б) переход к принципиально новым элементам системы, обладающим повышенными надежностными показателями.

Первый путь снижения потока отказов является наиболее простым: необходимо выбирать элементы, рассчитанные на работу с большей нагрузкой и использовать их в системе, нагруженной меньшими усилиями. Очевидно, что для увеличения срока безотказной работы двигателя необходимо выбирать его с запасом по мощности. Еще один вариант повышения надежности электрической машины – это увеличение количества фаз двигателя, что приведет к снижению среднего тока, приходящегося на каждую фазу, что, в свою очередь, снизит нагрузку на изоляцию, а это, как уже было отмечено выше, благоприятно отразится на продолжительности эксплуатации двигателя.

Второй и наиболее перспективный путь повышения надежности системы электропривода – применение новых, нетрадиционных технических решений как для силовых цепей, так и для релейной машины.

В данном параграфе выделены «слабые места» электроприводов с позиций надежности работы, и показаны пути устранения недостатков в этих местах двумя способами, подробнее о которых сам пойдет ниже.

2.1.3. Метод введения избыточности системы

Существует несколько методов расчета надежности системы [5, 41, 32,18]. Наряду с экспериментальным методом, одним из самых точных является коэффициентный метод [83]. Этот метод расчета надежности прост в использовании и не требует знания значений интенсивности отказов элементов, входящих в систему. Необходимо иметь сведения о коэффициентах надежности элементов и знать абсолютное значение интенсивности отказов лишь одного базового.

Интенсивность отказов численно равна числу отказов в единицу времени, отнесенному к числу узлов, безотказно проработавших до этого времени:

$$\lambda_T = n(t) / N_{ср} \Delta t = n(t) / [N \cdot t] \Delta t = f(t) / P_t,$$

где N – общее число рассматриваемых изделий; $f(t)$ – скорость отказов – количество изделий, отказавших к моменту времени t в единицу времени; $P(t)$ – количество изделий, не отказавших к моменту времени t ; $n(t)$ – число отказавших образцов в интервале времени $t - (\Delta t/2) < t < t + (\Delta t/2)$; Δt – интервал времени; $N_{ср}$ – среднее число исправно работающих образцов в интервале Δt . Интенсивность отказов обратно пропорциональна времени и измеряется числом отказов в час.

Учет влияния режимов работы и условий окружающей среды на показатели надежности элементов может быть произведен с помощью поправочных коэффициентов, изменяющих значение параметра – интенсивности отказов. Эти безразмерные коэффициенты a_i являются функциями совокупности различных воздействующих факторов. Интенсивность отказов элемента с учетом условий работы и окружающей среды

$$\lambda_i = \lambda_{ни} = 1 \cdot n_{ai}$$

Надежность системы принято оценивать по показателю P – вероятности безотказной работы за промежуток времени t :

$$P_t = e^{-\lambda t}$$

При отсутствии данных о надежности отдельных элементов электрической машины используют обобщенные среднестатистические данные о надежности электрических машин в целом. Существенное влияние на надежность машины оказывает величина электрической нагрузки. Для понимания того, во сколько раз недогружена или перегружена машина, вводится коэффициент нагрузки, который определяется отношением рабочей мощности к номинальной мощности машины:

$$K_n = P_{раб} / P_n.$$

2.1.4. Применение метода введения избыточности для преобразователей напряжения

Наименее надежным элементом силовой части полупроводникового преобразователя принято считать силовые транзисторы. Для оценки анализа надежностных показателей преобразователей частоты были проведены экспериментальные и статистические исследования силовых транзисторов.

В первую очередь, используя коэффициентный метод расчета [83], были получены значения поправочных коэффициентов $a_{транз}$ определения вероятности безотказной работы транзисторов в зависимости от коэффициента нагрузки K_n для при температурах транзистора 200°C и 500°C (см. рис. 2.5).

Для транзисторов коэффициент электрической нагрузки определяется отношением фактической суммарной мощности, рассеиваемой на переходах в непрерывном или импульсном режиме, к допустимой мощности рассеивания.

$$K_n = P_{факт} / P_{доп}$$

Для построения данной зависимости (рис. 2.5) использовался каталог компании ABB – известного производителя полупроводниковых преобразователей.

Рис. 2.5. Зависимость поправочного коэффициента $a_{транз}$ от коэффициента нагрузки транзистора K_n при различных температурах транзистора: 1 – $T_{транз} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T_{транз} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

При создании надежного преобразователя частоты или напряжения необходимо учитывать режимы работы готового преобразователя, и с учетом этого подбирать элементную базу. Нами были выполнены вычисления и произведен анализ полученных зависимостей величины безотказной работы транзистора, рассчитанного на номинальный ток 15 А от запаса по рассеиваемой мощности при различных температурах. Результаты расчетов приведены на рис. 2.6.

Рис. 2.6. Зависимость безотказной работы P транзистора при наработке 10000 часов, от запаса по рассеиваемой мощности P и температуры окружающей среды t :

$$1 - P_{факт} = P_n, 2 - P_{факт} = 1,35 P_n, 3 - P_{факт} = 1,6 P_n,$$

$$4 - P_{факт} = 2,3 P_n, 5 - P_{факт} = 2,7 P_n, 6 - P_{факт} = 3,3 P_n, 7 - P_{факт} = 4,1 P_n$$

При увеличении температуры транзистора на 800°C вероятность безотказной работы снижается до 0,5, что фактически означает равную вероятность рабочего и нерабочего состояний на протяжении отведенного на работу транзистора времени. При двукратном запасе транзистора по мощности на рабочих температурах 80-100 градусов наблюдаются относительно приемлемые показатели надежности 0,8-0,85 (см. рис. 2.6). Дальнейшее увеличение запаса мощности приводит к кратному удорожанию самого преобразователя, однако транзисторы становятся менее восприимчивыми к превышению температуры, так как рассчитаны они уже на большие токи.

Экономический эффект.

На данном этапе исследования выявлялась доля стоимости автономного инвертора от стоимости всего преобразователя. Информация об относительной стоимости силовой части преобразователей была получена от специалистов научно-технического центра «Приводная техника». Исходными данными для статистической обработки являлась выборка значений стоимости преобразователей с шестью IGBT-транзисторами в автономном инверторе и производилась у следующих фирм-производителей преобразователей частоты: Toshiba, Instart, Combarco, ABB, DeltaElectronics, GeneralElectric[117]. Исследования производились для различных моделей преобразователей в диапазоне мощностей от 1,1 до 160 кВт. С помощью методики, приведенной выше, были обработаны величины ΔC_t – относительной стоимости силовой части преобразователей. Диапазон мощностей был представлен двадцатью четырьмя величинами. Количество степеней свободы при такой выборке равно 23. С вероятностью в 95% регрессионная зависимость относительной стоимости силовой части q_2 является адекватной и достоверной, так как полученный квантиль Стьюдента $t = 1,88$ меньше критического $t_{КРИТ}$. Результаты статистической обработки относительной стоимости силовой части преобразователей частоты приведены в табл. 2.3.

Для того чтобы прийти к общему представлению о средней стоимости силовой части преобразователей, приведем обобщенную регрессионную зависимость (рис. 2.7).

Рис. 2.7. Регрессионная зависимость относительной стоимости силового полупроводникового моста с драйверами q_2 от номинальной мощности преобразователя P

Таким образом, можно сделать вывод, что с ростом мощности преобразователя доля стоимости силового IGBT моста увеличивается.

Надежность преобразователя зависит от схемы силовых цепей, количества фаз и мощностей.

Для анализа надежности преобразователя была создана модель n -фазного выпрямителя, нагруженного на активно-индуктивное сопротивление. Математическая модель была собрана в программном продукте MATLAB. Функциональная схема выпрямителя показана на рис. 2.8.

На модели производились следующие эксперименты. Последовательно увеличивали количество фаз n преобразователя. Контролировалось значение среднеквадратичного тока фазы преобразователя. Как можем видеть из графика на рис. 2.9, зависимость среднеквадратичного тока имеет линейный характер.

Таблица 2.3.

Результаты статистической обработки относительной стоимости силовой части преобразователей частоты

Параметр
P_n , кВт
ΔC_t
q_2
d
$d_2 \cdot 10^3$
Номер эксперимента
1
1,1
0,185
0,182
0,0025
0,00611
2
1,5
0,185
0,185
0,0004
0,00019
3
2,2
0,185
0,188
0,0037
0,01359
4
3
0,188
0,191
0,0037
0,01338
...
24
160
0,236
0,236
0,0001
0,00001
$sd = \sum d_2 - (\sum d_j)^2 / n - 1$
0,002
$t = d - j \cdot dsdn$
$t_{КРИТ}$
1,88
2,0687

Рис. 2.8. Функциональная схема выпрямителя в программном продукте MATLABSimulink.

Рис. 2.9. Зависимости среднеквадратичного тока нагрузки $I_{ср.кв.нагр}$, среднего тока нагрузки $I_{ср.нагр}$, среднеквадратичного тока фазы $I_{ср.кв.ф}$ и среднего тока фазы выпрямителя $I_{ср.фот}$ числа фаз m :

$$1 - I_{ср.кв.нагр}, 2 - I_{ср.нагр}, 3 - I_{ср.кв.ф}, 4 - I_{ср.ф}$$

Вторая серия экспериментов производилась на той же модели, но при поддержании постоянной мощности источника питания. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.10.

Рис. 2.10. Зависимости среднеквадратичного тока нагрузки $I_{ср.кв.нагр}$, среднего тока нагрузки $I_{ср.нагр}$, среднеквадратичного тока фазы $I_{ср.кв.ф}$

и среднего тока фазы выпрямителя $I_{ср.фот}$ числа фаз m

$$\text{при } P_{преобр} = \text{const}; 1 - I_{ср.кв.нагр}, 2 - I_{ср.нагр}, 3 - I_{ср.кв.ф}, 4 - I_{ср.ф}, 5 - U_{мах}$$

Теперь в схеме заменим диоды транзисторами и будем пропускать не все положительные полуволны тока и напряжения, а будем открывать транзисторы на определенную часть периода. На рис. 2.11 приведена зависимость тока от числа фаз при открытых транзисторных ключах на половину периода.

Рис. 2.11. Зависимости среднеквадратичного тока фазы $I_{ср.кв.ф}$

выпрямителя от числа фаз m при $T_p = 0,5 T$

На рис 2.12 приведена зависимость тока от числа фаз при открытых транзисторных ключах на четверть периода.

Рис. 2.12. Зависимости среднеквадратичного тока фазы I_{cr.kв.ф} выпрямителя от числа фаз и при Tr = 0,25 T

При проектировании преобразователя для увеличения срока службы силовых транзисторов их выбирают с запасом по рассеиваемой мощности.

Для оценки рассеиваемой мощности производилась серия экспериментов, задачей которых было определить влияние несущей частоты переключений IGBT транзисторов на величину тепловых потерь в силовом ключе. Эксперименты производились на лабораторном стенде, оснащенный преобразователем частоты SiemensSinamicsS120. Несущая частота варьировалась в диапазоне от 0 до 16 кГц. В настоящий момент ведущие производители преобразовательной техники позволяют пользователю самостоятельно выбирать величину несущей частоты отпирания ключей в своих устройствах. Исходя из задач регулирования, эксплуатирующий персонал может самостоятельно зайти в настройки привода и выбрать из списка нужный ему параметр. Как видно из рис. 2.13, наименьший перегрев транзистора, а соответственно, и потери в ключе, образуются на малых частотах порядка 4-8 кГц.

Аналогичный эксперимент производился на преобразователе фирмы ABB. Параметры преобразователя ACS 880: Pн=5,5 кВт, Iн=12,9 А, I_{max}=16 А, Uном=380В, P_{рассев} = 172 Вт. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.14.

Аналогичный эксперимент производился на лабораторном стенде, оснащенный преобразователем UnidriveSP с номинальным током I_н=10,5 А. При изменении напряжения ток менялся, а температура меняется незначительно на 1-2 ОС. При изменении частоты ШИМ в данном преобразователе, была получена зависимость, представленная на рис. 2.15.

Рис.2.13. Зависимость потерь в полупроводниковых преобразователях в функции несущей частоты ШИМ;

1 – 0 кГц, 2 – 1 кГц, 3 – 2 кГц, 4 – 4 кГц, 5 – 8 кГц, 6 – 12 кГц, 7 – 16 кГц

Рис.2.14. Зависимость температуры ключа Т от тока статора I при изменении напряжения f=50 Гц

Рис.2.15. Зависимость температуры транзистора Т от частоты ШИМ преобразователяf

Рис.2.17. Зависимость вероятности безотказной работы транзистора Р от относительной стоимости транзисторного модуля Св о.е. при увеличении запаса мощности для температуры 20 ОС в диапазоне мощностей от 75кВт до 250кВт

Рис.2.16. Зависимость вероятности безотказной работы Р транзистора при температуре 20 ОС в диапазоне мощностей преобразователя от 75 кВт до 250 кВт от запаса мощности преобразователя ΔР

Используя каталожные данные для транзисторов различных производителей [119] и коэффициентный метод расчета надежности, были рассчитаны и построены следующие зависимости вероятности безотказной работы транзисторов от запаса по мощности и от стоимости при различных рабочих температурах рис. 2.14 -2.17.

Если сравнить полученные зависимости с аналогичными зависимостями для двигателей, то можно заметить, что для увеличения надежности транзисторных модулей до требуемого уровня 0,95-0,9 необходимо увеличение стоимости не в 2-2,5 раза (как у двигателей) а 3,5-4 кратное увеличение. Надежность преобразователей при данном методе введения внутренней избыточности системы возрастает меньше, чем у электрических машин.

Рабочие температуры современных транзисторов находятся в пределах 50-600С, поэтому расчёт производится для рабочей температуры 500С. Максимально допустимая температура коллекторного перехода составляет 70-1200С для германиевых и 125-2000С для кремниевых транзисторов.

Рис.2.18. Вероятность безотказной работы Р преобразователя от запаса по мощности рассеивания P_{рас} при T=500С в разных диапазонах мощностей;

1 – 1,5-15кВт, 2 – 11-75кВт, 3 – 75-355кВт

Из рис. 2.18 видим, что при увеличении температуры транзистора достигнуть требуемых условий надежности становится еще труднее. Для достижения показателя вероятности безотказной работы 0,95 требуется уже пятикратный запас по мощности.

На рис. 2.18 приведена зависимость вероятности безотказной работы преобразователя при постоянстве рабочей температуры (T=500С) от коэффициента нагрузки равного отношению фактической мощности рассеивания ключа к допустимой мощности рассеивания рассматриваемого транзисторного модуля K_н=P_{факт}/P_{доп}.

Как мы можем видеть из рис. 2.17 и 2.18 базовая надежность преобразователя с ростом рабочей температуры падает (0,9 при 200С и уже

Рис.2.19. Зависимость вероятности безотказной работы Р транзистора в одном габарите транзисторного модуля при изменении коэффициента нагрузки K_н при рабочей температуре T=500С

0,77 при 500С). Интерес также вызывает изменение полученных зависимостей с ростом мощности самого преобразователя (см. рис. 2.19, 2.20).

Зависимость относительной мощности рассеивания P_{рас} от номинальной мощности преобразователя P_нран в относительных единицах представлена на рис. 2.21 для диапазона мощностей от 1, 5 до 250 кВт.

Рис.2.20. Вероятность безотказной работы Р транзистора от относительной стоимости С преобразователя при рабочей температуре T=500С для различных диапазонов мощностей; 1 - 1,5-15кВт, 2 - 11-75кВт, 3 - 75-250кВт

Рис.2.21.Зависимость мощности рассеивания в преобразователе P_{рас} о.е. от номинальной мощности преобразователя P_н о.е. для различных диапазонов мощностей преобразователей; 1 – 1,5-15 кВт, 2 – 11-75 кВт, 3 – 75-250 кВт

У транзисторов определяющее значения надежности имеет мощность рассеивания, так как характеристики транзисторов сильно зависят от температуры (то есть величины потерь), и номинальная мощность преобразователя здесь вторична. Так, например, обратный ток р-п перехода увеличивается в 2 раза при повышении температуры на 100 С.

Зависимость мощности рассеивания транзисторных ключей преобразователя ABBACS 880 5,5 кВт при изменении тока статора асинхронного двигателя представлена на рис.2.22.

Рассеиваемая мощность транзистора от температуры. При нагревании транзистор не успевает отдать тепло в окружающую среду и греется. Зависимость линейна.

Рис.2.22.Зависимость мощности рассеивания в преобразователе P_{рас} о.е. от величины тока статора I.

Были рассмотрен диапазон мощностей от 1 кВт до 4,5 МВт. Расчет производился для мостовой схемы силовых цепей. В расчете учитывалось количество силовых ключей и степень их загруженности (K_н) при заданной (500С) температуре. Результаты исследований приведены на рис. 2.23 (а. б. в, г).

Рис.2.23. Зависимость вероятности безотказной работы Р преобразователей от запаса мощности преобразователя P_в о.е. в мостовой схеме, для различного числа фаз и разных диапазонов мощностей; а) от 1,5 до 11 кВт, б) от 11 до 55 кВт, в) от 75 до 355 кВт, г) от 450 до 2800 кВт; 1 – двухфазные преобразователи, 2 – трехфазные преобразователи, 3 – шестифазные преобразователи, 4 – двенадцатифазные преобразователи

Используя информацию о стоимости преобразователей различных фирм производителей были рассчитаны и построены зависимости надежности преобразователей от отношения запаса мощности к цене.

Из рис. 2.24 видно, что приращение мощности (запас) на малых мощностях (1,5-7,5 кВт) обходится дешевле, чем на больших (сотни кВт). Коэффициент запаса мощности в относительных единицах к стоимости преобразователя в относительных единицах здесь выше. Коэффициент P/C дает представление о затратах на повышение надежности приводов разной мощности.

Также были построены и проанализированы зависимости вероятности безотказной работы преобразователей от увеличения стоимости при увеличении установленной мощности преобразователя. На рис. 2.25 а и 2.25 б построены множество кривых, отражающих зависимости при различном количестве фаз преобразователя. На рис. 2.25а представлено семейство кривых для диапазона мощностей от 11 до 55 кВт, на рис. 2.25 б. построены те же зависимости для диапазона мощностей от 185 до 1295 кВт. Характер кривых схож. Однако, стоит отметить, что на больших мощностях для достижения приемлемого уровня вероятности безотказной работы, необходимо затратить в 2-3 раза больше средств, чем на малых мощностях.

Максимальное количество стоек, подключенных в параллель в одной фазе преобразователя, зависит от его мощности, величины рабочего тока и фирмы производителя. Например, компания ABB выпускает преобразователи частоты мощностью 5,5 МВт. Собирается такой преобразователь из нескольких единичных модулей мощностью в 350 кВт. Таким образом, максимальное количество транзисторных модулей, подключенных в параллель равно 15, соответственно, 15 стоек силовых транзисторов подключаются параллельно друг другу. Компания Siemens производит транзисторные модули единичной мощности 185 кВт.

Рис. 2.24.Зависимость вероятности безотказной работыР преобразователей различных диапазонов мощностей от отношения запаса мощности к цене P/Стрехфазныхпреобразователей напряжения;

1 – 1,5-7,5 кВт, 2 – 11-55кВт, 3 – 75-355кВт

Рис. 2.25.Зависимостивероятности безотказной работы Р от относительной стоимости С преобразователя для м-фазного преобразователяв различных диапазоне мощностей; а) диапазон 11-55 кВт, б) диапазон 185-1295 кВт,

1 – 2 фазные преобразователи, 2 –3 фазные преобразователи,

3 – 4 фазные преобразователи,4 – 5 фазные преобразователи,

5–6 фазные преобразователи, 6–7 фазные преобразователи,

7 – 8 фазные преобразователи,8 – 9 фазные преобразователи,

9 – 10 фазные преобразователи,10 – 11 фазные преобразователи,

11 – 12 фазные преобразователи,

Ранее нами был сделан вывод о росте относительной стоимости силовой части преобразователя при увеличении мощности самого преобразователя. На данном этапе исследования появляется необходимость узнать зависимость увеличения относительной стоимости силового полупроводникового преобразователя от роста номинальной мощности преобразователя в различных диапазонах мощностей. На малых мощностях (0,75-7,5 кВт), ввиду малой доли стоимости силовой части в стоимости всего преобразователя, при десятикратном увеличении мощности преобразователя, цена увеличивается лишь в 2 раза (см. рис. 2.25 а). В диапазоне мощностей от 75 до 355 кВт увеличение мощности в 5 раз приводит к увеличению стоимости преобразователя в 5 раз.

На рис. 2.26 б) представлены те же зависимости, однако линия наибольшего диапазона мощностей (от 185 до 1665 кВт) сформирована за счет цен на преобразователи, выполненные в модульном исполнении. Такой способ изготовления преобразователей обходится дешевле, так как изготовление преобразователя из отдельных готовых элементов – транзисторных модулей – является более надежным и технологичным способом производства. Именно по этой причине линия 4 (185-1665 кВт) лежит ниже линии 3 (75 – 355кВт).

Рис.2.26. Зависимости относительной стоимости преобразователей P_{рас} от номинальной мощности преобразователя P_н в о.е. для различных диапазонов мощностей; а) 1 – 0,75-7,5 кВт, 2 – 11-55 кВт, 3 – 75-355 кВт, 4 – 400-2800 кВт, б) с учетом модульного исполнения приводов больших мощностей 1 – 0,75-7,5 кВт, 2 – 11-55 кВт, 3 – 75-355 кВт, 4 – 185-1665 кВт

Рис. 2.27. Зависимость относительных затрат С на полупроводниковый преобразователь от вероятности его безотказной работы Р для диапазона мощностей: 1 – (0,18– 1,1) кВт; 2 – (1 000 до 2 000) кВт

Были построены зависимости относительных затрат на полупроводниковый преобразователь от вероятности безотказной работы Р (см. рис. 2.27). Эти зависимости качественно совпадают с кривыми рис. 2.1, но при этом для обеспечения уровня надежности P=0,98 требуется увеличить относительные затраты С. Наиболее выразительно это проявляется для электроприводов больших мощностей (рис. 2, кривая 2.27). Объясняется это тем, что в суммарной стоимости установленного электрооборудования доля затрат на полупроводниковый преобразователь является существенной [26,25].

Рис. 2.28. Зависимость КПД преобразователей от номинальной мощности привода в диапазоне мощностей от 1,5 до 110 кВт;

1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

Рис. 2.29. Зависимость КПД преобразователей от номинальной мощности привода в диапазоне мощностей от 100 до 2800 кВт;

1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

При конструировании системы электропривода необходимо учитывать КПД (потери) силовых полупроводниковых преобразователей. Несмотря на высокие значения КПД преобразователей, на мощностях свыше 1 МВт даже 1% потерь мощности – это огромное количество энергии. На основе каталожных данных [118] были построены следующие зависимости КПД от величины номинальной мощности преобразователя в двух диапазонах мощностей: от 1 до 100 кВт (см. рис. 2.28) и от 100 до 2800 кВт (см. рис. 2.29).

КПД преобразователей, рассчитанных на большие фазные напряжения, выше, чем КПД преобразователей той же мощности, но меньшего напряжения. Это объясняется зависимостью потерь от квадрата тока. Соответственной с ростом напряжения и при сохранении мощности, ток преобразователя уменьшается, а соответственно во второй степени снижаются и потери. На рис. 2.30 а и 2.30 б построены зависимости относительной величины мощности потерь от полной мощности преобразователя для разных диапазонов мощностей.

Рис.2.30. Зависимости величины мощности потерь преобразователей ΔРот номинальной полной мощности преобразователей P_н различных диапазономощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт,1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В,

б) диапазон 110-2800кВт, 1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

На основе полученных данных о величине потерь электрического и электромеханического преобразователей можно произвести анализ потерь системы электропривода в зависимости от номинальной мощности. Результаты расчета потерь в системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель для различных диапазонов мощностей и величин напряжений приведены на рис. 2.31 – рис. 2.34.

Рис.2.31. Зависимости величины мощности потерь системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель ΔРот номинальной мощности двигателей P_н различных диапазономощностей и напряжений питания;

а) диапазон 0,75-110кВт,Uном=380 В, б) диапазон 132-560 кВт, Uном=3000 В

Как видим из рисунков, относительная доля потерь мощности в системах большей мощности снижается. Это объясняется тем, что наибольшие потери в системе электропривода присущи электрическим двигателям и, как уже было отмечено выше, потери в двигателях уменьшаются с ростом мощности.

Рис.2.32. Зависимости величины КПД системы преобразователь частоты – асинхронный двигательот номинальной мощности двигателей P_н различных диапазономощностей и напряжений питания;

а) диапазон 0,75-110кВт,Uном=380 В, б) диапазон 132-560 кВт, Uном=3000 В

На рис. 2.33 а и рис. 2.33 б для сравнения показаны зависимости КПД преобразователя и КПД системы электропривода.

На рис. 2.34 а и рис. 2.34 б представлены зависимости тепловых потерь от объема корпуса преобразователя для линейки преобразователей фирмы ABB. Вертикальные линии на графиках говорят о том, что в одном корпусе были выполненные преобразователи на разные мощности, которые имеют соответственно разные величины потерь.

Однако, для качественной оценки потерь от объема (габарита) преобразователя необходимо ввести понятие удельных потерь, т.е. отношение величины потерь к единице объема dP/V кВт/м³. На рис. 2.35 а) и рис. 2.35 б) приведены получившиеся зависимости для разных диапазонов мощностей.

Еще более корректной была бы зависимость величины тепловых потерь от площади теплоотводящей поверхности преобразователей. Эти зависимости отражены на рис. 2.36 а и рис. 2.36 а для различных диапазонов мощностей.

Рис.2.33. Зависимости величин КПД преобразователя и КПД системы электроприводот номинальной мощности преобразователейразличных диапазономощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт, 1 – система электропривода, 2 – преобразователь без двигателя б) диапазон 132-1400 кВт, 1 – система электропривода, 2 – преобразователь без двигателя;

Рис.2.34. Зависимости величин КПД преобразователя от объема корпуса V преобразователейразличных диапазономощностей;

а) диапазон 0,75-110кВт, б) диапазон 110-315 кВт, 1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

Рис.2.35. Зависимости отношения потерь в преобразователе ΔРк объему корпуса преобразователя Vот мощности преобразователейP различных диапазономощностей;

а) диапазон 5,5-110кВт, б) диапазон 132-2800 кВт, 1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

Рис.2.36. Зависимости отношения потерь в преобразователе ΔРк площади теплоотводящей поверхности корпуса преобразователя Sот мощности преобразователейf для различных диапазономощностей;

а) диапазон 5,5-110кВт, б) диапазон 132-2800 кВт, 1 – Uном=380 В, 2 – Uном=690 В

Таким образом, выбирая элементы «с запасом» или с так называемой внутренней избыточностью, надежность всей системы повышается. Важно отметить, что повышение надежности этим путем влечет за собой повышение стоимости составляющих в отдельных случаях в 3-5 раз. Однако, при увеличении затрат на изготовление, наблюдается снижение затрат на ремонт оборудования. Во многих случаях с экономической точки зрения выгодно делать более надежное изделие, даже в том случае, если к нему не предъявляются высокие требования безотказности по условиям эксплуатации.

2.2. Постановка задачи оптимизации полупроводниковых преобразователей

Вместе с развитием технологичного изготовления полупроводниковых элементов растут требования к полупроводниковым преобразователями со стороны потребителя. Эти требования могут отличаться в зависимости от сферы применения системы электропривода. При проектировании полупроводниковых преобразователей традиционно в качестве основного критерия эффективности выбирают энергетические показатели, такие, как КПД или cos. Это связано с широким распространением электроприводов насосов и компрессоров, в которых режимы пусков и торможений нечасты, а нагрузка носит равномерный характер. В связи с этим критерии, связанные с массогабаритными показателями или перегрузочными способностями, для таких систем не являются приоритетными. Однако, существует целый ряд механизмов, для которых на первый план выходят надежностные показатели системы электропривода, а точнее вероятность безотказной работы системы. В таком случае критерии по энергетической эффективности, удельным массогабаритным показателям и надежностным характеристикам могут оказаться противоречивыми. Например, при электроприводах на базе СРМНВ, для улучшения энергетических показателей прибегают к увеличению количества фаз [23], что, в свою очередь, положительно сказывается на надежности системы, однако, снижает массогабаритные показатели и неоднозначно может повлиять на показатель экономической эффективности системы в целом. В этой связи, решая задачи многокритериальной оптимизации необходимо находить компромиссные решения, удовлетворяющие условиям конкретной задачи.

Постановка задачи оптимизации полупроводникового преобразователя требует определения и обоснования критериев оптимизации, параметров оптимизации и ограничений.

Задача многокритериальной оптимизации в общем случае может быть сформулирована в виде обобщенной целевой функции

$Q = \max\{q_1, q_2, q_3\}$

Здесь Q – целевая функция, а q₁, q₂, q₃ – критерии оптимизации.

В нашем случае критерием оптимизации будет выступать величина P – вероятность безотказной работы преобразователя. Параметрами оптимизации, т. е. величинами, на которые мы можем оказывать воздействие, будут выступать:

– конфигурация схемы силовых цепей полупроводникового преобразователя;

– количество фаз в полупроводниковом преобразователе;

– температурный режим работы преобразователя;

– кратность резервирования;

Оценку максимума вероятности безотказной работы преобразователя будем производить в рамках наложенных ограничений на целевую функцию. Поскольку количество фаз является целым числом, то итоговая функция будет носить дискретный (шаговый) характер при переходе от одного количества фаз к другому. Вторым ограничением выступает цена на техническое решение. Экстремум функции, если таковой будет обнаружен, будем находить в условиях равенства цен для различных решений.

С ростом мощности преобразователей напряжения, начиная с определенной величины тока, полупроводниковые ключи в каждой фазе преобразователя уравниваются параллельно для уменьшения токовой нагрузки. В этой связи, выбор в качестве параметра оптимизации количество фаз преобразователя является наиболее естественным решением. С увеличением количества фаз возрастает и общее количество полупроводниковых ключей.

Основные элементы полупроводникового преобразователя подлежащие оптимизации представлены на рис. 2.37.

Рис. 2.37.Основные элементы полупроводникового преобразователя подлежащие оптимизации: I – схема силовых цепей преобразователя; II – количество фаз преобразователя; III – кратность резервирования.

2.3. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей

На первом этапе параметрической оптимизации строится зависимость отношения приращения цены полупроводникового преобразователя по сравнению с преобразователем, идущим следом линейке мощностей к цене на этот преобразователь, к отношению приращения рабочего тока (читай мощности) полупроводникового преобразователя к рабочему току (мощности) преобразователя, идущего следом в линейке мощностей от тока (мощности) преобразователя и рассчитывается коэффициент C относительной цены преобразователя к относительному номинальному току преобразователя:

$C = \frac{\Delta C}{C} \frac{\Delta I}{I}$

где C – коэффициент относительной цены преобразователя к относительному номинальному току преобразователя, ΔC – относительное увеличение цены на преобразователь, C_н – изначальная стоимость базового преобразователя, ΔI – относительное увеличение номинального тока преобразователя при переходе к преобразователю по мощности на одну ступень выше. I_н – номинальный ток базового рассматриваемого преобразователя.

Произведем расчет коэффициента C, воспользовавшись информацией из каталогов фирм производителей преобразователей ABB и Control Techniques для некоторых линейк преобразователей частоты. Полученные зависимости представлены на рис. 2.38.

Рис. 2.38. Зависимость коэффициента C относительной цены преобразователя от относительному номинальному току преобразователя от тока преобразователя для линейки преобразователей фирм производителей Control Techniques и ABB:

1 – ABB ACS800-07; 2 – ABB ACS800-07; 3 – CT SP; 4 – CT SE; 5 – CT Comm SX.

На следующем этапе оптимизации происходит оценка полученной зависимости и определение значения коэффициента C. При значениях C, меньших 1, М.А. Левиным обосновано применение методики выбора оптимального запаса мощности преобразователя по критерию суммарных годовых затрат.

Установлено, что наибольшее влияние на запас мощности оказывает интенсивность аварийных ситуаций и ответственность электропривода по технологическому ущербу при отказе полупроводникового преобразователя. Автор учел дискретность шкалы мощностей преобразователя и разработал рекомендации по выбору запаса мощности. При величине относительного ущерба у < 2 достаточно иметь запас в пределах выбранной ступени мощности; при 2 < у < 8 необходим запас на одну ступень; при у > 8 – запас на две ступени, где у – ответственность по технологическому ущербу:

$y = U \cdot Z_p$

где Y – размер ущерба, Z_p – затраты на капитальный ремонт.

Таким образом, автор учитывал влияние запаса мощности на величину экономического ущерба, образующегося при отказе двигателя, что не совсем справедливо для установок, отказ в работе которых может причинить вред здоровью или даже гибели людей.

В случаях, если коэффициент C превышает 1, необходимо в первую очередь произвести анализ существующих схемных решений.

Произведем анализ силовых схем полупроводниковых преобразователей и дадим оценку количества силовых транзисторов в функции количества числа фаз преобразователя и его мощности.

Для анализа надежности любой схемы силовых цепей необходимо знать количество полупроводниковых элементов, в нее входящих. Эта величина зависит как от схемы исполнения силовой схемы, так и от величины мощности, на которую эта схема рассчитывается. Для сравнения были выбраны наиболее широко распространенные на сегодняшний день схемы: мостовая и полумостовая схемы (см. рис. 2.39, 2.40, 2.42, 2.43).

Для удобства анализа и дальнейшего сопоставления схем в программном продукте MATLAB были построены поверхности (см. рис. 2.41 и 2.44.), отражающие зависимость количества ключей от количества фаз схемы и мощности нагрузки.

Показанные зависимости помогают выбрать оптимальное число фаз преобразователя в зависимости от мощности по критерию надежности. Так, например, в диапазоне мощностей от 2 до 3 МВт, самыми надежными являются 2, 3 и 6 фазные схемы, при мощностях от 4,5 МВт наиболее предпочтительно иметь 3, 6 или 12 фазный преобразователь, а 1 и 9 фазные в этом случае рекомендовать нельзя.

Относительная установленная мощность силовых полупроводниковых приборов и в мостовой, и в полумостовой схеме одинаковы, так как сокращение в два раза количества транзисторов и диодов в полумостовой схеме, по сравнению с мостовым вариантом, приводит к соответствующему уменьшению мощности нагрузки из-за уменьшения выходного напряжения. Для использования данной схемы с нагрузкой такой же мощности, что и у мостовой схемы, необходимо иметь транзисторы на токи, в два раза превышающие токи в мостовой схеме. Уменьшение количества полупроводниковых элементов приводит к увеличению надежности этого типа схемы, однако, увеличение амплитудных значений токов снижает вероятность безотказной работы.

Рис. 2.39. Упрощенная схема однофазного мостового транзисторного инвертора

Еще одним немаловажным фактором, снижающим надежность данной схемы, является емкостной фильтр. Поскольку частота первой гармоники пульсаций входного тока в полумостовой схеме в два раза ниже, чем в мостовой, требуемые величины емкости фильтра и в том, и в другом случае практически одинаковы, но в полумостовой схеме таких конденсаторов надо два. Таким образом, с точки зрения установленной мощности входного фильтра, полумостовой вариант схемы инвертора менее надежен и менее экономичен.

Рис. 2.40 Упрощенная схема трехфазного мостового транзисторного автономного инвертора

Рис. 2.41. Зависимость количества управляемых силовых ключей в мостовой схеме преобразователя от числа фаз и установленной мощности преобразователя

Рис. 2.43. Упрощенная схема однофазного полумостового транзисторного инвертора напряжения

Рис. 2.42 Упрощенная схема инвертора с выводом нулевой точки источника питания

Рис. 2.44. Зависимость количества управляемых силовых ключей в полумостовой схеме инвертора и схеме инвертора с выводом нулевой точки источника питания от числа фаз и установленной мощности преобразователя

На следующем этапе оптимизации строится график целевой функции, в нашем случае это зависимость вероятности безотказной работы преобразователя P от количества фаз m и рабочего тока I : $P=f(m, I)$. При построении поверхности в первую очередь строится зависимость P от количества фаз m для выбранной конфигурации схемы, а затем, на третьей пространственной оси откладываются величины рабочих токов (мощностей) полупроводниковых преобразователей.

Далее параметр надежности корректируется в зависимости от кратности резервирования k – отношения числа резервных элементов к числу основных элементов устройства. Как уже отмечалось выше, в нашем случае резервированию будет подлежать часть мощности преобразователя (количество фаз), а точнее, определенное количество IGBT модулей, приходящихся на одну фазу. Таким образом, резервированию будет подлежать $k=1/m$ фаз преобразователя. Для трехфазной мостовой схемы $k=1/3$ установленной мощности, что соответствует холодному резервированию одной фазы трехфазного моста.

Уточнение критерия оптимизации происходит по общеизвестной формуле:

$$P(t)_{рез} = 1 - 1 - P(t)^k + 1,$$

где $P(t)_{рез}$ – вероятность безотказной работы резервированной системы, $P(t)$ – вероятность безотказной работы системы.

После уточнения зависимости $P=f(m, I)$ с вводом резерва в систему необходимо произвести корректировку параметра P для конкретного температурного режима работы преобразователя. В этой связи, естественным является применение коэффициентного метода расчета надежности полупроводникового преобразователя, подробно описанного ранее. Привлекательной особенностью данного метода является отсутствие необходимости иметь сведения о коэффициентах надежности всех элементов, достаточно знать абсолютное значение интенсивности отказов лишь одного базового.

Отличительной чертой применения данного метода к оценке вероятности безотказной работы лежит учет температурного режима преобразователя. В зависимости от рабочих температур преобразователя значения поправочных коэффициентов $апр$ будут изменяться, а соответственно подвергнется корректировке исследуемый параметр P .

Описанная методика представлена для удобства в виде алгоритма и изображена на рис. 2.45.

Рис. 2.45. Методика параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей

2.4. Результаты оптимизации

Полученную методику применим для параметрической оптимизации традиционного преобразователя частоты выполненного по m -фазной мостовой схеме в качестве примера обобщенной многофазной схемы, и для ДКИН в качестве частного случая полупроводникового преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме. Построим зависимости $P=f(m, I)$, и скорректировав их с учетом ввода резерва и температурного режима проанализируем получившиеся результаты.

Применим методику параметрической оптимизации полупроводникового преобразователя по критерию надежности для m -фазного ПЧ выполненного по мостовой схеме. В первую очередь необходимо рассчитать коэффициент C отношения относительной цены к относительному току. Данный расчет был произведен выше при описании методики оптимизации. Для построения данной зависимости необходима каталожная информация фирм производителей полупроводниковых преобразователей. Из полученной зависимости необходимо вычислить величину коэффициента C и сравнить с единицей. Стоит отметить что при номинальных рабочих токах преобразователя больших 500...600 А, там где коэффициент C больше 1, наиболее рационально применение предлагаемой методики оптимизации, так как при расчете традиционным методом по наибольшему вероятному ущербу, увеличение надежности путем выбора преобразователя с избыточным запасом мощности будет экономически не эффективно.

Далее, используя коэффициентный метод расчета и учитывая тепловой режим, строим зависимость вероятности безотказной работы преобразователя от количества числа фаз для различных величин токов (рис. 2.46). Стоит отметить, что с ростом мощности полупроводниковых модулей, увеличивает площадь поверхности, от которой отводится тепло в окружающую среду от греющихся элементов. В свою очередь, на мощностях свыше 1 МВт, достаточно часто прибегают к системам жидкостного охлаждения полупроводниковых преобразователей. Перечисленные факторы несколько увеличивают надежность систем большой мощности относительно систем выполненных по той же схеме и с тем же количеством фаз. В этой связи происходит корректировка величин вероятности безотказной работы.

Рис. 2.46. Зависимость $P=f(m, I, T)$ с учетом температурного режима работы преобразователя

При увеличении количества фаз, оставляя при этом неизменной мощность полупроводникового преобразователя, токи в фазах будут меняться не линейно, а в соответствии с поправочным коэффициентом k_f . Другими словами при переходе от трехфазного преобразователя к шестифазному, при сохранении мощности, действующие значения токов будут не в 2 раза меньше, а меньше в k_f раз.

На следующем этапе произведем коррекцию, используя формулу расчета надежности с вводом холодного резерва. Результаты скорректированной зависимости приведены на рис. 2.47. В зависимости от количества фаз, кратность резервирования может отличаться. Так, например, для трехфазной системы $k=1/3$ означает, что резервированию подлежит одна фаза преобразователя, а для 12-и фазного преобразователя $k=1/3=4/12$ говорит о резервировании 4 фаз проектируемого преобразователя.

Рис. 2.47. Зависимость $P=f(m, I, T)$ с учетом ввода резерва

Можно отметить значительное (для 3-ех

Страницы: [1](#) [2](#) [3](#) [Все](#)