

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:** глава _апервый.docx**Имя компании:** Южно-Уральский государственный университет**Комментарий:** 2017_03_27Хафизов**Тип документа:** Прочее**Имя документа:** 2017_03_27Хафизов**Дата проверки:** 27.03.2017 00:44

Модули поиска: Интернет (Антиплагиат), Диссертации и авторефераты РГБ, Цитирования, Южно-Уральский государственный университет, Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Модуль поиска ЭБС "Лань", Университетская библиотека онлайн, Модуль поиска ЭБС "Айбукс", Кольцо вузов

**Текстовые
статистики:****Индекс читаемости:** сложный**Неизвестные слова:** в пределах нормы**Макс. длина слова:** в пределах нормы**Большие слова:** в пределах нормыТип отчета: [О типах отчетов](#)

☒ Источник	Ссылка на источник	Коллекция/ модуль поиска	Доля в отчёте	Доля в тексте	Блоков в отчёте	Блоков в тексте
--	--------------------	-----------------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------

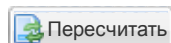
☒	[1] Весь номер в PDF	http://esik.magtu.ru/doc/2016-1/all.pdf	Интернет (Антиплагиат)	1,26%	1,26%	38	41
☒	[2] скачать PDF	http://esik.magtu.ru/doc/2016-1/010-013.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,01%	1,24%	2	42
☒	[3] Весь номер в PDF (1/...	http://esik.magtu.ru/doc/2016-1/all.pdf#1	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,75%	0	28
☒	[4] Весь номер в PDF (2/...	http://esik.magtu.ru/doc/2016-1/all.pdf#2	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,49%	0	14
☒	[5] Кульмухаметова алекс...	http://netess.ru/3elektrotehnika/595687-1-kulmuhametova-alek...	Интернет (Антиплагиат)	0,45%	0,45%	14	14
☒	[6] Кульмухаметова, Алек...	http://dlib.rsl.ru/rsl01007000000/rsl01007506000/rsl01007506...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,11%	0,39%	5	12
☒	[7] Шабуров, Павел Олего...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004641000/rsl01004641...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,29%	0,38%	14	17
☒	[8] Математическая модел...	http://mylsa.ru/xo15pliovI93/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%...	Интернет (Антиплагиат)	0,36%	0,36%	9	9
☒	[9] Источник 9		Цитирования	0,35%	0,35%	7	7
☒	[10] Источник 10	http://www.dp5.ru/Blank/www.dp5.ru.katalog2.zip	Интернет (Антиплагиат)	0,3%	0,32%	10	11
☒	[11] НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛ...	http://cyberleninka.ru/article/n/nadezhnost-sistem-elektropr...	Интернет (Антиплагиат)	0,23%	0,31%	6	8
☒	[12] Полный текст диссерт...	http://www.omgups.ru/diss/sovet/docs/trifonov/dis_trifonov_r...	Интернет (Антиплагиат)	0,07%	0,31%	6	9
☒	[13] Когут, Алексей Тарас...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004869000/rsl01004869...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,06%	0,24%	2	7
☒	[14] Автореферат		Южно- Уральский государственный университет	0,07%	0,22%	3	9
☒	[15] Диссертация Белоусов		Южно- Уральский государственный университет	0%	0,18%	0	5
☒	[16] Вигриянов, Павел Гео...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005094000/rsl01005094...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,01%	0,17%	2	13
☒	[17] Abstract2014 01 22.d...		Южно- Уральский государственный университет	0%	0,16%	0	6
☒	[18] Научно-технический в...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=17599	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,03%	0,16%	1	5
☒	[19] Коробатов, Денис Вла...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003376000/rsl01003376...	Диссертации и авторефераты	0%	0,16%	0	7

			РГБ				
☒	[20] Электротехника.pdf	http://ispu.ru/files/Elektrotehnika_0.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,15%	1	6
☒	[21] Козина, Татьяна Андр...	http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006517000/rsl01006517...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,06%	0,15%	3	9
☒	[22] CARRIER SIGNAL INJEC...	http://etheses.whiterose.ac.uk/2113/2/Gong%2C_Liming.pdf#7	Интернет (Антиплагиат)	0,11%	0,15%	7	8
☒	[23] ОстроуховДиссертация...		Южно-Уральский государственный университет	0,03%	0,15%	3	9
☒	[24] Киbartене, Юлия Викт...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004698000/rsl01004698...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,08%	0,14%	2	5
☒	[25] 39334	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=39334	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,13%	0	5
☒	[26] Разработка метода и ...	http://www.dslib.net/elektro-mashyny/razrabotka-metoda-i-alg...	Интернет (Антиплагиат)	0,02%	0,12%	1	4
☒	[27] Поляков, Владимир Ни...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004659000/rsl01004659...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,05%	0,11%	3	6
☒	[28] Салов, Семен Алексан...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004381000/rsl01004381...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,05%	0,1%	3	4
☒	[29] Соломахо		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,1%	0	4
☒	[30] Мустафа Мустафа Наср...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002306000/rsl01002306...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,05%	0,1%	4	6
☒	[31] Самохвалов, Дмитрий ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004639000/rsl01004639...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,03%	0,09%	2	3
☒	[32] Нгуен Куанг Тхиеу ди...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005090000/rsl01005090...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,04%	0,08%	3	5
☒	[33] 236283	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=236283	Университетская библиотека онлайн	0,01%	0,08%	1	5
☒	[34] Бурцев, Павел Алексе...	http://dlib.rsl.ru/rsl01006000000/rsl01006587000/rsl01006587...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,08%	0	3
☒	[35] Sensorless position ...	http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/...	Интернет (Антиплагиат)	0,06%	0,07%	3	2
☒	[36] 231269	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=231269	Университетская библиотека онлайн	0%	0,07%	0	3

☒	[37] Карантаев, Владимир ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002975000/rsl01002975...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,07%	0	3
☒	[38] 71813	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=71813	Университетская библиотека онлайн	0%	0,07%	0	3
☒	[39] Bibliografie - Docum...	http://documents.tips/documents/bibliografie-55844821cbf13.h...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,07%	0	3
☒	[40] Дудкин ГрантФЦП2этап...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,06%	0	4
☒	[41] Теория электропривод...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=8611	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,06%	0	6
☒	[42] Диссертация	http://www.ntc-power.ru/media/doc/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,05%	0	4
☒	[43] 253183	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=253183	Университетская библиотека онлайн	0%	0,05%	1	2
☒	[44] Диссертация без титу...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,05%	0	3
☒	[45] Источник 45	http://www.dp5.ru/Library/Book_all_www.dp5.ru.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,03%	0,05%	1	2
☒	[46] Современные наукоемк...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=18346	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%	0	2
☒	[47] Известия ПГПУ им. В....	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=341531	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,04%	0	2
☒	[48] Козаченко, Владимир ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003391000/rsl01003391...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,04%	0	3
☒	[49] Диссертация на соиск...	http://www.ugatu.su/assets/files/documents/dissov/02/2015/Pe...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,04%	0	2
☒	[50] 72269	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72269	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,02%	0,04%	3	3
☒	[51] Основы электропривод...	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=341284	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,04%	0	1
☒	[52] Машиностроение. Энци...	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=339625	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,04%	0	3
☒	[53] Вестник новых медици...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=16417	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,01%	0,03%	1	2
☒	[54] 2765	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2765	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,03%	0	2
☒	[55] Полный текст диссерт...	http://d21221704.samgtu.ru/sites/d21221704.samgtu.ru/files/m...	Интернет	0%	0,03%	0	2

			(Антиплагиат)				
✓	[56] Нейман, Владимир Юрь...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002748000/rsl01002748...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,03%	0	2
✓	[57] 241181	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=241181	Университетская библиотека онлайн	0,03%	0,03%	1	1
✓	[58] Салах Ахмед Абдель М...	http://dlib.rsl.ru/rsl01005000000/rsl01005513000/rsl01005513...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,03%	0	1
✓	[59] УсынинТАУ.docx		Южно-Уральский государственный университет	0,01%	0,03%	1	2
✓	[60] Диссертация Юрченко ...		Кольцо вузов	0%	0,03%	0	2
✓	[61] Материалы конференци...	http://ssau.ru/files/events/2015/conf_itnt_2015.docx	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,03%	0	1
✓	[62] Цифровая обработка с...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=10432	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,02%	0	1
✓	[63] Научно-методические ...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=19055	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,02%	0	1
✓	[64] Лекции по сверхвысок...	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=69289	Университетская библиотека онлайн	0%	0,02%	0	1
✓	[65] Цифровая обработка с...	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=335524	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,02%	0	1
✓	[66] Естественные и техни...	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=340207	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,02%	0	1
✓	[67] Введение в математич...	http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=28082	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,02%	0	1
✓	[68] 64979	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=64979	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,02%	0	1
✓	[69] 13711	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=13711	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,02%	0	1
✓	[70] x-sbornik.pdf	http://repository.enu.kz:8080/bitstream/handle/data/12772/x-...	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,02%	0	1
✓	[71] 28318	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=28318	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,02%	0	1
✓	[72] Высоцкий, Виталий Ев...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002802000/rsl01002802...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,02%	0	2
✓	[73] Федяева, Галина Анат...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004479000/rsl01004479...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,02%	0	2
✓	[74] Кононенко, Константи...	http://dlib.rsl.ru/rsl01000000000/rsl01000321000/rsl01000321...	Диссертации и	0%	0,02%	0	2

			авторефераты РГБ				
☒	[75] 48195	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=48195	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,02%	0,02%	2	2
☒	[76] Энциклопедия компьют...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=5619	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,02%	0	1
☒	[77] 275597	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=275597	Университетская библиотека онлайн	0%	0,02%	0	1
☒	[78] 71812	http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=71812	Университетская библиотека онлайн	0,02%	0,02%	2	2
☒	[79] Вестник Иркутского Г...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=16628	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,01%	0,01%	1	1



Другие действия ▾



Оригинальные блоки: 95,64%

Заемствованные блоки: 4,02%

Заемствование из "белых" источников: 0,35%

Итоговая оценка оригинальности: **95,98%**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет»

(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Хафизов Глеб Тагирович

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛА КОММУТАЦИИ

Специальность:

05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор С.Г. Воронин

Челябинск — 2017

Оглавление

Введение 5

1. Состояние вопроса 9

1.1 Математические основы векторного управления вентильными двигателями большой мощности 9

1.1.1 Основные типы векторного управления и ВЭП 9

1.1.2 Математические модели и их виды 9

1.1.3 Физические аспекты математических моделей используемых для векторного управления вентильными двигателями большой мощности 12

1.1.4 О системах отсчета в электромеханике 13

1.2 Наблюдатели, идентификаторы и оптимальные процессы 14

1.2.1 Теория наблюдателей, идентификаторов и оценивания, как приложение векторного управления вентильными двигателями большой мощности 14

1.2.2 Применение теории оценивания для создания алгоритмов оценивания в бездатчиковой системе векторного управления вентильным двигателем 18

1.2.3 Оптимальное управление вентильным двигателем 18

1.3 Теория надежности и электроприводы ВД 21

1.4 Выводы по главе № 1 22

2. Исследовательская и инженерные модели вентильного двигателя 23

2.1 Основные понятия и уравнения электродинамики в ковариантной форме 25

2.1.1 Уравнения Максвелла в инерциальных системах отсчета 25

2.1.1.1 Необходимые определения линейной алгебры 26

2.1.2 Уравнения Максвелла в произвольной системе отсчета 27

2.1.3 Функциональная связь электромагнитных величин между произвольными системами отсчета 28

2.2 Исследовательская модель электромеханической части вентильного двигателя 28

2.2.1 Определение собственных характеристик системы отсчета ротора 28

2.2.2 Определение взаимоотношений характеристик систем отсчета 29

2.2.3 Определение прямых преобразований систем отсчета ротора-статора 31

2.2.4 Определение обратных преобразований систем отсчета статора-ротора 34 41

2.2.5 Определение матрицы Якоби 36

2.2.6	Определение прямого преобразования	40
2.2.7	Определение обратного преобразования	42
2.2.8	Определение прямого и обратного преобразования для 4-тока	44
2.2.9	Определение прямого преобразований тензора электромагнитной проницаемости	45
2.2.10	Определение прямого преобразований тензора проводимости среды	47
2.2.11	Уточненная методика расчета полевой задачи	48
2.3.	Инженерная модель вентильного двигателя	49
2.3.1	Методика перехода от системы ДУЧП Максвелла к системе ОДУ	49
2.3.2	Семейство инженерных моделей вентильных двигателей	51
2.4	Выводы по главе № 2	57
3.	Наблюдатели и оптимальные углы коммутации	58
3.1	Наблюдатели угла поворота ротора и угла нагрузки вентильного двигателя	58
3.1.1	Обзор наблюдателей в системах вентильных электроприводов	58
3.1.2	Наблюдатель инвариантного погружения для модели полного порядка	59
3.1.3	Нелинейный фильтр пониженного порядка на основе наблюдателя инвариантного погружения	65
3.1.3.1	Теория нелинейного фильтра пониженного порядка	65
3.1.3.2	Нелинейный фильтр пониженного порядка в применении к системе уравнений синхронного двигателя с постоянными магнитами	70
3.1.4	Наблюдатель инвариантного погружения для модели пониженного порядка	74
3.1.5	Моделирование и сравнение работ наблюдателей и нелинейных фильтров	79
3.1.5.1	Моделирование фильтров в стандартном режиме работы	79
3.1.5.1.1	Моделирование полного фильтра инвариантного погружения	79
3.1.5.1.2	Моделирование редуцированного фильтра инвариантного погружения	82
3.1.5.2	Моделирование фильтров в режиме совместной работы с объектом, при замещении неизвестных координат объекта восстановленными	85
3.2.	Оптимальные углы коммутации	86
3.2.1.	Определение оптимального угла коммутации определяющего максимальный электромагнитный кпд	87
3.2.2	Определение оптимального угла коммутации определяющего минимум реактивных потерь	88
3.2.3	Определение оптимального угла коммутации определяющего минимум полной потребляемой мощности из сети	89
3.2.4	Определение оптимального угла коммутации определяющего максимальный электромагнитный момент	90
3.2.5	Определение оптимального угла коммутации определяющего максимальную скорость вращения вала ротора вентильного двигателя	91
3.2.6	Вопросы практического применения оптимальных углов коммутации	93
3.3	Выводы по главе № 3	94
4.	Надежность вентильного электропривода с векторным управлением	95
4.1	Модель распространения по системе одностипных импульсных воздействий	96
4.2	Модель распространения по системе разнотипных импульсных воздействий	97
4.2.1	Необходимые определения линейной алгебры	97
4.2.2	Алгоритм моделирования распространения по системе разнотипных импульсных воздействий	98
4.3	Моделирование надежности алгоритмом распространения по системе разнотипных импульсных воздействий	101
4.3.1	Теоретический пример для $p=2$ и $n=3$	101
4.3.2	Численный расчет для реального привода	105
4.3.2.1	Численный расчет для одного энергетического домена	105
4.3.2.2	Численный расчет для двух энергетических доменов, без корреляций	112
4.3.2.3	Численный расчет для двух энергетических доменов с корреляционной связью между доменами	115
4.4	Выводы по главе №4	118

5. Практическая реализация и экспериментальные исследования	119
5.1 Подготовительная часть	119
5.1.1 Особенности дискретизации непрерывного фильтра инвариантного погружения	119
5.1.2 Структура дискретного фильтра инвариантного погружения, учитывающего эффекты второго порядка	122
5.1.3 Дискретный фильтр инвариантного погружения, учитывающий эффекты второго порядка в применении к вентильному двигателю	124
5.1.4 Дискретный фильтр инвариантного погружения	128
5.2 Экспериментальная часть	131
5.2.1 Цели экспериментальной части	131
5.2.2 Методика экспериментальной части	131
5.2.3 Описание экспериментальной установки и приборов измерения	132
5.2.3.1 Описание электропривода экспериментальной установки	133
5.2.3.2 Описание программной части экспериментальной установки	137
5.2.4 Результаты экспериментов и анализ обеспечиваемой точности	142
5.2.4.1 Эксперимент со сложным заданием по скорости	142
5.2.4.2 Эксперимент по увеличению скорости холостого хода	147
5.2.4.3 Эксперимент по увеличению электромагнитного момента	150
5.3 Внедрение результатов	152
5.3.1 Привод управления запорной арматурой	152
5.3.2 Привод турбогенератора	155
5.4 Выводы по главе № 5	156
Заключение	157
Список литературы	159
Приложения	169
Приложение А. Свидетельство регистрации программы расчета надежности с учетом междоменных корреляций	169
Приложение Б. Листинг программы управления комплекта, с учетом оценивающего фильтра инвариантного погружения	170
Приложение В. Справка о внедрении результатов работы	191
Приложение Г. Справка о внедрении результатов работы	192
Приложение Д. Значения скорости [об/сек] вентильного двигателя под нагрузкой, зафиксированные микроконтроллером с шагом 0.1 секунды	193
Приложение Е. Значения скорости [об/сек] вентильного двигателя на холостом ходу, зафиксированные микроконтроллером с шагом 0.1 секунды	197
Приложение Ж. Значения скорости [об/мин] вентильного двигателя на холостом ходу, снятые фототахометром с шагом в 2 секунды	201
Приложение И. Значения скорости [об/мин] вентильного двигателя с нагрузкой снятые фототахометром с шагом в 2 секунды	202
Приложение К. Значения момента [Нм] сопротивления восстановленного микроконтроллером с шагом в 0.1 секунду	203
Приложение Л. Значения скорости холостого хода [об/с] вентильного двигателя, восстановленной микроконтроллером с шагом в 0.1 секунду, при	204
Приложение М. Значения скорости холостого хода [об/с] вентильного двигателя, восстановленной микроконтроллером с шагом в 0.1 секунду, при	205
Приложение Н. Значения скорости холостого хода [об/мин] вентильного двигателя, измеренный фототахометром DT3334B с шагом 2 секунды, при	206
Приложение П. Значения скорости холостого хода [об/мин] вентильного двигателя, измеренный фототахометром DT3334B с шагом 2 секунды, при	207

Введение

Актуальность работы. С каждым годом электроприводы занимают все большее место в жизни человека. И лидирующую позицию начинает занимать вентильный электропривод (ВЭП). Практически нет областей и сфер деятельности, где не использовался бы ВЭП. Он применяется и в строительстве (привода силовых установок бетононасосов, мощностью до 150 кВт), и в различных производствах (привода запорной арматуры, мощностью до 5 кВт), и в медицине (привода систем вентиляции легких, мощностью до 1 кВт), и в бытовой и оборонной технике (привода стартер-генераторов, мощностью до 1 МВт), и т.д.. Под ВЭП мы будем подразумевать вентильный электропривод переменного тока, использующий электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

К вентильным электроприводам предъявляют все более жесткие требования:

- снижение стоимости всего привода и его комплектующих;
- расширение диапазона регулирования;
- повышение качества управления;
- повышение энергетической экономичности;
- повышение надежности не только вновь создаваемых, но и уже находящихся в эксплуатации электроприводов.;

Список требований продолжает расширяться, а требования к значениям показателей – ужесточаться.

В этих условиях возникла потребность более глубокого анализа процессов в ВЭП с целью поиска оптимальных путей удовлетворения растущих требований. В частности, известные способы увеличения диапазона регулирования частоты вращения не позволяют получить требуемый результат. Известные методы оценки надежности технических систем не позволяют оценить надежность ВЭП в условиях одновременного воздействия разрушающих факторов разной физической природы. Используемые динамические математические модели дают ощутимую погрешность определения численных показателей при работе ВЭП на высоких и существенно малых частотах вращения.

Исследованиям ВЭП посвящено много работ различных авторов. В области создания алгоритмов расчета и использования их в исследованиях можно выделить работы В.А. Неганова [88] с методом сингулярных интегральных уравнений, Я. Туровского [142] с развитой технической электродинамикой, Э.А. Мееровича, Б.Э. Мейеровича [82] с релятивистским уточнением взаимоотношений между системами отсчета, А.В. Иванова-Смоленского, Р.А. Лютера. Практически все авторы, занимающиеся анализом и расчетом электромагнитных полей в ЭМП, записывают дифференциальные уравнения в инерциальной системе отсчета. Но это допустимо лишь для установившегося и квазистационарного режимов работы ЭМП. Описание процессов в динамических режимах требует более обобщенного подхода и использования иных систем отсчета. Корректный анализ, электромагнитных процессов в динамических режимах является важным и неотвратимым этапом анализа вентильных электроприводов [53].

Среди авторов, занимающихся вопросами оптимального управления ВЭП, можно назвать следующих ученых: С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, А.С. Кульмухаметова [28], А.Б. Виноградов [26], А.С. Анучин, В.Ф. Самосейко [169]. Среди зарубежных авторов выделяется Томас А. Липо [177], [181,182,198]. К сожалению, их исследованиями охвачены не все практически важные режимы работы ВЭП. Кроме того, для выполнения постоянно возникающих новых требований приходится использовать и новые [28,154], еще не изученные режимы управления. В частности, слабо изучен режим векторного управления с регулированием угла коммутации.

Вопросам применения и синтеза фильтров оценивания посвящены работы А.А. Красовского [64]. В этом направлении работали и В.С. Булыгин, М.Ф. Росин, Э.П. Сейдж, Дж. Л. Мелс, Д. Гроп [191], [187], [206] и др. Чаще всего большинство авторов выбирают готовый фильтр, который может оказаться неподходящим для типа уравнений математической модели, используемой для описания ВЭП. В этой связи возникла задача создания наиболее подходящего оценивающего фильтра, применительно к задаче моделирования ВЭП и его системы цифровой обработки управляющей информации.

В технической литературе имеются сведения по оценке надежности ВЭП в условиях негативных импульсных воздействий. Это, например, работы: Д.А. Курносова [69], А.А. Кочкарова, Г.Г. Малинецкого, А.И. Перротте, Л.П. Леонтьева [61,62,74]. Все авторы рассматривают случай, когда на ВЭП приходит одно либо несколько импульсных воздействий одной физической природы. На практике же совокупность внешних воздействий на ВЭП имеет различную физическую природу. Вопрос оценки надежности работы ВЭП в таких условиях пока остается неизученным.

Таким образом, актуальным остается решение следующих вопросов научного исследования ВЭП:

- построение динамической модели и уточнение алгоритмов расчета электромагнитных процессов в динамических режимах работы ВЭП;
- поиск и анализ оптимальных режимов управления ВЭП, позволяющих улучшить динамические показатели, расширить диапазон регулирования частоты вращения и вращающего момента, повысить КПД и энергетическую эффективность;
- построение оценивающих устройств и создание алгоритмов работы программного ДПР;
- поиск путей снижения стоимости и повышения надежности ВЭП;
- развитие методов оценки надежности в условиях комплексного воздействия внешних факторов различной физической природы.

На основании всего выше изложенного целью работы является: Развитие теории вентильного электропривода в части: анализа электромагнитных процессов в динамических режимах; расширения диапазона регулирования выходных координат; повышения энергетических показателей; создания алгоритмов вычисления положения ротора по косвенным данным; методики проектирования привода с программным датчиком положения ротора; поиска путей обеспечения заданных показателей надежности привода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ известных методик расчета электромагнитных полей в вентильных двигателях при динамических режимах; выявить наиболее общие связи между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета вентильного двигателя (ВД); построить алгоритм расчета и анализа картины электромагнитных полей ЭМП при произвольном движении ротора; дать инженерные выражения, рекомендации и методики для применения разработанного алгоритма.
 2. Проанализировать известные способы и средства управления ВЭП применяемые для расширения диапазона регулирования выходных координат и повышения энергетических показателей, и найти в них ограничения и недостатки, в том числе отсутствие регулирования угла коммутации. Получить аналитические выражения для значений угла коммутации, оптимальные для разных режимов работы ВЭП.
 3. Разработать цифровую систему программного определения углового положения ротора ЭМП на базе предложенной динамической модели электромагнитных процессов в нем, создать структуру наблюдателя, использующего возможности оценивающих фильтров (ОФ), предложить реализацию нелинейного ОФ.
 4. Оценить возможности модификации известные модели в теории надежности ВЭП с целью учета воздействий разной природы; произвести выбор математического аппарата для расширения возможностей существующей модели; синтезировать новую математическую модель надежности ВЭП и провести её полный анализ; перечислить её возможности и рамки применения; дать практические рекомендации для применению данной модели.
- Объект исследования. В работе исследуется вентильный электропривод с векторным управлением и цифровым программным устройством вычисления информации о текущем угловом положении ротора и о частоте вращения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические методы исследования. Были задействованы следующие математические аппараты: линейная алгебра, теория дифференциальных форм, тензорное исчисление, дифференциальная геометрия, теория множеств, теория графов, дискретное исчисление, дифференциальное исчисление, теория функций многих переменных, теории вероятности и статистики, вариационное исчисление, полевой анализ. Построенные алгоритмы базируются на таких фундаментальных разделах физики и энергетики как: электродинамика; общая теория относительности; механика; теория поля. Также использованы методы математического моделирования с применением вычислительных пакетов Vissim. Дополнительно была написана программа для реализации полученной модели теории надежности.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается следующим:

- при математическом описании и моделировании ЭМП использованы общепринятые допущения, справедливость которых подтверждена и теоретическими исследованиями, и практическими разработками;
- адекватность используемых математических моделей, достоверность полученных результатов моделирования и теоретических выводов подтверждены полученными автором экспериментальными данными.
- основные положения диссертации обсуждены на научно-технических конференциях различного уровня, опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и получили одобрение специалистов.

Научное значение работы:

Развитие и дополнение теории, практики, проектирования, анализа и надежности ВЭП в части: анализа электромагнитных процессов при динамических режимах ЭМП, обеспечения заданной надежности ВЭП, расширения диапазона регулирования выходных координат, повышения эффективности и энергетических показателей, проектирование и апробация нелинейных фильтров оценивания для бездатчиковых ВЭП.

Научные положения, выносимые на защиту:

- метод и алгоритм расчета картины электромагнитных полей ВД при произвольном движении ротора.
- полная и упрощенная математическая модель оценивающего фильтра для программного датчика положения ротора, использующая метод инвариантного погружения.
- аналитические выражения для вычисления значений угла коммутации, оптимальных по различным критериям оптимизации.
- модель надежности ВЭП распространения по системе разнотипных импульсных воздействий и её практическая реализация.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые предложен метод, позволяющие получать соотношения между электродинамическими величинами и параметрами в произвольно движущихся

системах отсчета.

- дана методика по выбору фильтра оценивания для построения бездатчикового вентильного электропривода.
- впервые получен фильтр инвариантного погружения пониженного порядка, который позволяет получать оцениваемые значения ненаблюдаемых механических величин, таких как скорость, момент, угол поворота ротора вентильного двигателя путем получения их из фазных токов.
- предложены уточненные выражения для вычисления значений угла коммутации, оптимальных по различным критериям, например, максимума вращающего момента, минимума потерь и т.п.;
- синтезирована модель надежности ВД распространения по системе разнотипных импульсных воздействий, позволяющая учитывать ситуации, когда на испытываемую систему приходят разрушительные воздействия разной природы.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- выведенные связи между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета ВД позволят выйти на новый уровень точности при численных расчетах поля и анализе вентильных двигателей; даны практические рекомендации использования и применения выведенных соотношений.
- использование предложенных оценивающих фильтров позволяет строить системы программных ДПР, отличающиеся пониженной стоимостью при повышенной точности и надежности.
- синтезированные выражения для оптимальных углов коммутации ВД, позволяют реализовать следующие режимы работы ВЭП: максимальной скорости, максимальной скорости холостого хода, максимального электромагнитного момента, минимума активных потерь, минимума реактивных потерь, минимума полных потерь и т.д.
- разработанная модель распространения по системе ВЭП разнотипных импульсных воздействий, позволяет структурировать импульсные воздействия и рассматривать распространение воздействия в своей природе, но и устанавливать корреляционные связи между орграфами одной системы но разной природы.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 4.577.21.0154 от 28 ноября 2014 года (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0154)

Реализация результатов работы. Спроектированный оценивающий фильтр реализован на экспериментальном комплекте и двигателе привода искусственной вентиляции легких ДБ-72_40_1000. На базе производства ООО "Зеленая энергия" была внедрена система регулятора угла коммутации. За счет коррекции номинальный момент привода бетононасоса РС 907/612 повысился на 80 Нм, что составляет примерно 10%. На базе предприятия СКБ Турбина был внедрен регулятор угла коммутации. За счет коррекции была повышена скорость холостого хода турбогенератора с 30000 до 40000 об/мин и уменьшено время разгона на пять секунд, что составляет примерно 30%.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

- VIII международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения" (г. Казань 2013 г.)
- XXXIV Всероссийской конференции посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева "Наука и технологии" (г. Миасс 2014 г.)
- LXVI научной конференции профессорско-преподавательского состава секции "Технических наук" (г. Челябинск 2014 г.)
- LIII международной научной конференции МНСК-2015 "Мехатроника и автоматизация" (г. Новосибирск 2015 г.)
- научно-технической выставке творчества молодежи (НТТМ) изобретателей, рационализаторов, конструкторов "Евразийские ворота России - Шаг в будущее" (г. Челябинск 2015 г.)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, из них 3 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 156 страниц, заключения, списка литературы из более 200 наименований, тринадцати приложений. Общий объем диссертации 207 страниц, включая 346 формул, 60 рисунков и 10 таблиц.

1. Состояние вопроса

1.1 Математические основы векторного управления вентильными двигателями большой мощности

1.1.1 Основные типы векторного управления и ВЭП

Вентильный электропривод (ВЭП) представляет собой электромеханическую систему, в которой объединены: - электромеханический преобразователь энергии (ЭМП) с бесконтактным возбуждением; - управляемый электронный силовой преобразователь (СП); - цифровая система управления (ЦСУ) электронным СП; - набор датчиков параметров, среди которых обязательно должно присутствовать устройство определения углового положения ротора (ДПР). В качестве ЭМП с

бесконтактным возбуждением используют синхронный, обычно трехфазный, магнитоэлектрический двигатель (МЭД). Электронный СП выполняют по схеме трехфазного мостового инвертора. Между СП и МЭД чаще всего содержится управляемый блок широтно-импульсной модуляции (БШИМ). Цифровая система управления ЦСУ выполняется обычно на базе сигнальных микроконтроллеров. В последнее время вместо аппаратных ДПР стали широко применять программные устройства вычисления угла положения ротора по измеряемым косвенным параметрам. ВЭП с такими устройствами часто называют «бездатчиковым» ВЭП, хотя его можно назвать и ВЭП с программным ДПР. Функциональная схема ВЭП приведена на Рисунке 1.

Рисунок 1.1 - Функциональные схемы ВЭП

На рисунке № 1: А) классическая схема ВД; Б) схема ВД с регулированием по углу коммутации. Введены следующие обозначения: РУК - регулятор угла коммутации ; ДТИН - датчик фазных токов и напряжений ; ОФ - оценивающий фильтр.

Различают два основных способа управления электроприводами переменного тока, использующими коммутационные полупроводниковые элементы и преобразователи частоты: частотное и векторное [26,57].

Векторное управление vector control[187] или field-oriented control (FOC) - является методом управления синхронными[99] и асинхронными двигателями[169], формирующим не только гармонические токи фаз[89], но и обеспечивающим управление магнитным потоком ротора[186].

Различают два типа векторного управления, как векторно-ориентированного поля:

1) Скалярное управление, scalar control (SC) - это управление электромеханическим преобразователем, связанно изменяя амплитуду и частоту тока или напряжения питания в стационарных, установившихся режимах работы двигателя. Описано оно было академиком М.П. Костенко в 1925 году[57,97,98].

2) Векторное управление, vector control (VC) - это управление электромеханическим преобразователем, отдельно изменяя амплитуду и частоту тока или напряжения питания[26]. Основываясь уже не на стационарных режимах, а на математической модели в дифференциальных уравнениях[9], описывающих функционирование преобразователя, как в стационарных режимах, так и в переходных[82]. В свою очередь, векторное управление тоже разделяется на два подтипа:

2.1) Прямое управление моментом, direct torque control (DTC), - это режим управления, в котором управляется момент двигателя на валу, за счет измерения и вычисления вектора потокосцепления и момента на валу, и сравнения с эталонными значениями и последовательной корректировкой управления[26]. Прямое управление моментом тоже включает два подтипа:

2.1.1) Прямое самоуправление, direct self-control (DSC) - это режим управления, при котором не создаются, гармонические токи или напряжения, приближенные синусоидой, а создается меандр, который уже прерывисто управляет моментом[26]. Данный метод используется для высоко-мощных приводов с ключами, ориентированными на низкую частоту работы.

2.1.2) Ста двадцати градусная коммутация, space vector modulation (SVM) - это режим, в котором электромеханический преобразователь - трехфазный, а управление создает, переменный ток синусоидальной формы из постоянного, путем одновременного управления несколькими ключами, где каждый поворачивает управляемый вектор на 120 градусов[28].

2.2) Векторное управление, ориентированное по вектору потокосцепления, field oriented control (FOC), - это режим управления, в котором происходит непосредственное слежение и управление вектором потокосцепления[153].

1.1.2 Математические модели и их виды

Векторное управление подразумевает собой наличие математической модели регулируемого электромеханического преобразователя. Дадим необходимые определения и классификации.

Математическая модель - математическое представление реальности[172,164], один из вариантов модели, как системы, исследование которой позволяет получать информацию о некоторой другой системе[64]. Процесс построения и изучения математических моделей называется математическим моделированием.

Математическое моделирование[64] - это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная, искусственная или естественная система (модель). Она находится в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом и способна замещать его в определенных отношениях, и дает при её исследовании информацию о самом моделируемом объекте [93].

Определяют прямую и обратную задачу математического моделирования:

Прямая задача: структура модели и все её параметры считаются известными. Главная задача - провести исследование модели для извлечения полезного знания об объекте[64,115].

Обратная задача: известно множество возможных моделей, надо выбрать конкретную модель на основании дополнительных данных об объекте[64,44,115].

Математические модели имеют несколько классификаций, представленных на рисунке 1.2:

Рисунок 1.2 - Способы классификации математических моделей

Рассмотрим каждый способ подробно, их структуры и определения.

Формальный способ[51] классификации математических моделей: основывается на классификации используемых математических средств, при составлении модели. Формальный способ разделяется по принципу дихотомии на основные типы, представленные на рисунке 1.3:

Рисунок 1.3 - Основные элементы формальной классификации математических моделей.

Линейная модель - любая система, для которой отклик системы на сумму воздействий равен сумме откликов на каждое воздействие [35,51].

Нелинейная модель - динамическая система, в которой протекают процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями [35,164].

Сосредоточенные модели - это модели, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями, которые являются функцией от одной переменной[7,4,124].

Распределенные модели - это модели, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП) [7,4,124].

Детерминированные модели - это модели, основанные на дифференциальных уравнениях, которые будут выдавать четко predetermined результат, зависящий от входных данных и параметров и исключающий любые случайности[7,113].

Стохастические модели - это модели, основанные на дифференциальных уравнениях, в которых как минимум один член имеет стохастическую природу, то есть - случайную [129,113].

Статические модели - модели, в которых дифференциальные уравнения не зависят от времени[129,115].

Динамические модели - модели, в которых дифференциальные уравнения зависят от времени[129,115].

Дискретные модели - модели, в которых используются уравнения, основанные на конечных структурах, таких как графы, группы, автоматы[197,164].

Непрерывные модели - модели, обладающие бесконечным числом внутренних степеней свободы, движение данных систем описывается тензорными полями[179,115,86].

Способ классификации - по способу представления, разделяет математические модели на структурные и функциональные. В пределе является разделением на способ черного ящика [60,64] - объекта с неизвестной структурой, но описанным внешним поведением. Серый ящик[64] - объект с частично известной структурой и внешним поведением. Белый ящик[64] - объект с известной структурой и внешним поведением. Общая структура классификации по способу представления приведена на рисунке 1.4:

Рисунок 1.4 - Классификация математических моделей по способу представления

Способ классификации по содержанию[129] кратко представлен на рисунке 1.5:

Рисунок 1.5 - Способы классификации по содержанию с элементами и наводящими фразами.

Жесткость модели регламентируется по добавочным членам в системе дифференциальных уравнений, которые переводят решение из установившегося - в решение с переходным процессом.

1.1.3 Физические аспекты математических моделей, используемых для векторного управления вентильными двигателями большой мощности

При векторном управлении вентильными двигателями используются разные типы математических моделей объектов управления. Все модели объектов управления можно распределить от простого к сложному.

Для полного анализа объекта управления строится наиболее приближенная к истинному объекту физическая модель. У разных известных авторов иная степень приближенности. Допустим, Рихтер Р.[108-112] использует для анализа эвристические сосредоточенные динамические модели, а для практического расчета только статические; М.П. Костенко и Л.М. Пиотровский[97-98] используют для анализа, как динамические, так и статические сосредоточенные, а иногда распределенные системы; А.И. Вольдек [27] использует сосредоточенные статические и динамические системы; И.П. Копылов [59] также использует сосредоточенные динамические системы, но уже вводит дополнительные усложнения; а в работах А.И. Инкина [54] уже используются распределенные модели, как по площади, так и по объему. Более обще подходят к расчетам авторы Э.А. Меерович и Б.Э. Мейерович[82], они уже используют упрощенную релятивистскую формулировку для разных систем отсчета, необходимо заметить, что данный подход не нов и использовался для объективного вывода математической модели электромеханического преобразователя в книге Уайта Д., Вудсона Г. [143] за 1959 год. На этом же уровне находятся книги Я. Туровского [142], В.Т. Ерофеев

[44], В.А. Неганова [88]. Следующим этапом развития можно считать книги Н.М. Мицкевича [87] и А.Инфельда [55], здесь авторы используют теорию поля в условиях общей теории относительности для нахождения уравнений движения и поля.

Рассмотрев всех авторов последовательно, прослеживается тенденция увеличения необходимой вычислительной мощности при расчетах, однако также отслеживается тенденция использования различных дисциплин для повышения реалистичности расчета.

Основные дисциплины, которые используются на нынешний момент, для общего расчета поведения электромеханического преобразователя в псевдостатическом режиме это:

- Электродинамика[132,138-143,14,70,72,79-82,88,91,96,119,120]
- Теплодинамика[87]
- Теория поля[71]
- Физика твердого тела[45]
- Механика[73]

Этот круг дисциплин охватывает практически все вопросы, связанные с решением определенных технических задач, и электромеханика частично включает их всех. Однако для расчетов в динамике есть важная особенность, подчеркиваемая многими авторами [87], [55], [88], [44], [142], [82] но не освещаемая в плане технических расчетов, и методов её использования.

Особенность заключается в соотношениях между системами отсчета, в исследуемом объекте.

1.1.4 О системах отсчета в электромеханике

В механике известно определение систем отсчета: это совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и системы отсчёта времени, по отношению к которым рассматривается движение каких-либо тел[77,83,73].

Обычно с преобразованиями между системами отсчета связывают систему преобразований Галилея [77]:

(1.1)

где x, t, v – соответственно: положение, время и скорость в одной системе отсчета, а x', t' - в другой.

Такое соотношение между системами отсчета сохраняло инвариантность законов физики, относительно систем отсчета до 1865 года. С появлением уравнений Максвелла [193], эта инвариантность нарушилась. Уравнения Максвелла не сохраняли свою форму при переходе в движущуюся систему отсчета. В следствии с этим, в 1904 году были предложены преобразования Лоренца[15,19,75,77,83,79,122,132,159]:

(1.2)

где c - скорость света; v - скорость движения системы отсчета со штрихом, относительно системы отсчета без штриха; t', x', y', z' - координаты в движущейся системе отчета со штрихом, относительно системы отсчета без штриха.

В 1905 году Альберт Германович Эйнштейн популярно объяснил в труде "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" [68] - в чем суть выражения (1.2), а также сформулировал основы Специальной Теории Относительности (СТО). Вся специальная теория относительности базируется на важном постулате: - системы отсчета движутся друг относительно друга с постоянной скоростью и уравнения Лоренца выведены тоже для этого случая. В 1916 году он, издает статью " **Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie**"[68], где излагает основы Общей Теории Относительности (ОТО), которая позволяет определять соотношения между произвольно движущимися системами отсчета.

Вычислительные мощности в начале двадцатого века были довольно слабые. Поэтому все задачи, использующие уравнения Максвелла, сводились либо к аналитически решаемым, либо к эквивалентным сосредоточенным дифференциальным уравнениям[89,90], либо к одномерным распределенным. Такая практика была взята на "вооружение" и используется сейчас, спустя много лет. Однако вычислительные мощности, с развитием научно технического прогресса, росли и все более и более точные алгоритмы вводились в расчеты и анализ исследуемых объектов[185].

Электромеханический преобразователь[143], или как частный случай электродвигатель, является очень сложным объектом для анализа электромагнитных полей[59]. Дело в том, что уравнения Максвелла, в стандартной, интегральной или дифференциальной форме [96], записаны для случая инерциальной системы отсчета[77,144], то есть, для случая движения одной системы отсчета относительно другой с постоянной скоростью, прямолинейно. А ротор или якорь электрического двигателя, пусть даже возвратно-поступательного действия, движется с ускорениями, а есть режимы и задачи, где важно именно ускорение якоря[82]. Но есть формулировка инвариантная относительно любых систем отсчета уравнений Максвелла - ковариантная [83,161]. Данная формулировка позволяет вести расчет электромагнитных полей для сложных объектов, в составе которых имеются ускоренные элементы. Использование данной формулировки принято в ядерной физике, квантовой механике, общей теории относительности, однако не получило распространения в электромеханике[118,123,135-142,108-

112,97-99,59,54].

Численный расчет электромагнитных полей для сложных объектов, в составе которых имеются ускоренные элементы, в электромеханике производится по упрощенной схеме [118,126,54], используются либо преобразования Галилея, либо Лоренца[82], а в место постоянной скорости, используется скорость мгновенная[144].

В связи с этим, возникает актуальность задачи - получить алгоритм аналитического вывода преобразований между произвольно движущимися системами отсчета; дать необходимые рекомендации по применению и использованию при расчете и анализе электромагнитных полей. Это позволит выйти на новый уровень точности расчета в электромеханике, следить за процессами излучения от ускоренных объектов, отслеживать изменения свойств вещества [132] и многое другое, весьма важное для практической науки и техники.

1.2 Наблюдатели, идентификаторы и оптимальные процессы

1.2.1 Теория наблюдателей, идентификаторов и оценивания, как приложение векторного управления вентильными двигателями большой мощности

Векторное управление вентильными двигателями большой мощности (ВУВДБМ) [25] представляет собой сложную замкнутую систему[64], которая может выполнять задачи позиционирования, поддержания скорости, заданного момента или более сложных задач[180]. Когда составлена самосогласованная[88], распределенная математическая модель электромеханического преобразователя, тогда её можно упростить[89,17,167,90] и преобразовать в состоящую из обыкновенных дифференциальных уравнений и получить инженерную модель, которая подходит для дискретной реализации на современных микроконтроллерах[107,23,185,200].

Замкнутые системы управления в векторном управлении можно разделить на два больших класса: с датчиками[188,169] и бездатчиковые [174,176,177,178, 180-182,185,187,190-207]

Замкнутыми системами с датчиками ВУВДБМ, будем считать системы, у которых в электромеханическом преобразователе есть какие либо датчики, кроме датчиков напряжений и токов питания.

Бездатчиковыми замкнутыми системами ВУВ♦♦БМ, будем считать системы, в которых кроме датчиков напряжения и токов питания электромеханического преобразователя ни каких больше нет.

Синтез векторного управления, для систем с датчиками, хорошо проработанный вопрос. Есть много литературы и статей, где разобраны мельчайшие подробности, например в данной литературе:[26,57,188,169]. Однако, синтез бездатчиковых систем векторного управления является открытым и крайне важным вопросом. Для его изучения необходимо прибегнуть к основам теории управления: наблюдаемости[34], идентифицируемости[64], и теории оценивания[130,131,38]. Для этого дадим основные понятия, определения и классификации.

Наблюдаемость - называется возможность косвенного определения величин, на основе измерения некоторых других величин и использования априорной информации[64,106, 34].

Основные виды наблюдаемости представлены на рисунке 1.6:

Рисунок 1.6 - Классификация наблюдаемости в пространстве состояний

На рисунке 1.6 $x(t)$ - вектор состояний; $z(t)$ - вектор наблюдений; стрелка обозначает преобразование от вектора состояний к вектору наблюдений.

Система является полностью наблюдаемой, если возможно восстановление полного вектора состояния системы[64,106, 34].

Система является косвенно наблюдаемой, если возможно только частичное восстановление вектора состояния системы[64,106, 34].

Степень наблюдаемости определяется выражением :

(1.3)

где - степень наблюдаемости; - вектор состояний; - известная векторная функция; - вектор наблюдения; - оператор Ляпунова; - матрица Якоби

Идентифицируемость - возможность определения параметров математической модели, системы или процесса по результатам измерения определенных выходных величин в течение некоторого интервала времени.

Система является полностью идентифицируемой и наблюдаемой, если возможно восстановление расширенного вектора состояния системы, за счет дополнительных параметров[64,106, 34].

Система является косвенно наблюдаемой, если возможно только частичное восстановление расширенного вектора состояния системы, за счет дополнительных параметров [64,106, 34]

Степень идентифицируемости определяется выражением:

(1.4)

где - степень наблюдаемости; - вектор состояний; - известная векторная функция; - вектор наблюдения; - оператор Ляпунова; - матрица Якоби; - расширенный вектор состояния.

Оцениванием - называют обработку данных измерений с целью уменьшить влияние случайных факторов, приближение значения оценки в реальном времени к истинной функции, фильтрация в реальном времени.

Вся теория оценивания основывается на теории вероятности и статистики, а практическая часть на уравнении Фокера-Планка-Колмогорова (ФПК-уравнение) [64,106,34,113] для безусловной плотности вероятности в пространстве состояний непрерывной стохастической системы. Но на практике необходимо уравнение для апостериорной плотности вероятности в пространстве состояний наблюдаемой стохастической системы, которое также называют уравнением Стратоновича[113]:

(1.5)

где - апостериорная или условная плотность вероятности состояния системы;

- вектор состояний системы; - вектор корреляции шума системы; - матрица амплитуды интенсивности ковариации двух любых шумов системы из определенного диапазона во времени; - матрица амплитуды интенсивности ковариации двух любых шумов наблюдения из определенного диапазона во времени; - заданная векторная функция уравнения наблюдения; - оценка функции наблюдения, являющиеся условным математическим ожиданием ; - вектор наблюдения; - вектор шумов системы с нулевым математическим ожиданием; - вектор шумов наблюдения с нулевым математическим ожиданием; - ковариантная матрица шумов системы; - ковариантная матрица шумов наблюдения.

Ни теоретически, ни практически, решить уравнение (1.5) невозможно, поэтому прибегают к преобразованию: уравнение Стратоновича умножают на и интегрируют по всему пространству состояний с помощью стохастических интегралов Ито [64,113,164], в итоге получают уравнение:

(1.6)

где - условное математическое ожидание[126] (УМО) исходной функции системы; - УМО вектора состояний системы; - УМО произведения вектора состояния системы на векторную функцию уравнения наблюдения.

Уравнение (1.6) строго удовлетворяет оценке в виде условных математических ожиданий, однако оно также не разрешимо, как аналитически, так и численно [64]. Но уравнение (1.6) служит структурой для создания субоптимальных алгоритмов оценивания условно-математического ожидания вектора состояния системы.

Основные приемы получения субоптимальных алгоритмов[64,34]:

- 1) Разложение нелинейных функций в ряд Тейлора в окрестности оценки или некоторого движения.
- 2) Различные виды аппроксимаций нелинейных функций.
- 3) Применение Гауссовского приближения для распределения вероятностей.
- 4) Замена оценки функции на функцию оценки.
- 5) Замена среднего по множеству на среднее по времени.

1.2.2 Применение теории оценивания для создания алгоритмов оценивания в бездатчиковой системе векторного управления вентильным двигателем.

Математические модели вентильных двигателей используемых для построения бездатчиковых систем, обычно являются нелинейным стохастическим непрерывным сосредоточенным классом систем дифференциальных уравнений [25], [29], [174,176,177,178, 180-182,185,187,190-207].

Задача оценивания строится так:

Наблюдаемыми величинами будут: фазные токи и напряжения питания или фазные токи и линейные напряжения питания, также будут известны параметры системы.

Ненаблюдаемыми величинами будут: угол поворота ротора, скорость ротора, момент на валу ротора.

Оцениваемыми величинами будут: токи и напряжения, угол поворота ротора, скорость ротора, а идентифицируемым параметром будет момент на валу ротора, так как он входит в уравнения как неизвестное внешнее воздействие.

Производится анализ локальных условий наблюдаемости и идентифицируемости.

Из уравнения (1.6) строится субоптимальный алгоритм по приведенной методике, или выбирается из ряда готовых[64].

Анализируя зарубежные и отечественные книги и статьи, можно прийти к выводу, что авторы берут субоптимальные алгоритмы для линейных систем. Как поясняют авторы, это сделано с целью уменьшения необходимой вычислительной мощности для применения алгоритма.

В связи с этим, становится актуальным вопрос проектирования оптимальных алгоритмов оценивания ненаблюдаемых величин и параметров в вентильном двигателе, относительно исходных не упрощенных уравнений. И анализа полученного алгоритма, с целью понижения порядка, в случае необходимости. Введение высококачественных алгоритмов оценивания ненаблюдаемых величин позволит уменьшить цену всего векторного привода вентильного двигателя за счет отсутствия дорогостоящих датчиков, при незначительном повышении цены микроконтроллера с высоким повышением его вычислительной мощности. Или проектирование высоконадежных приводов, способных нормально функционировать при обрыве линий обратной связи по углу поворота ротора, скорости и момента на валу.

1.2.3 Оптимальное управление вентильным двигателем

Оптимальное векторное управление, строится на базе таких теорий вариационного исчисления, как теория оптимального управления [42,26,56]. Оптимальное управление вентильными двигателями - известный вопрос и отражен во многих книгах и статьях [169, 177,178, 180-182]. В целом можно оптимальное управление можно разделить на два класса задач: стационарные и динамические.

В стационарных задачах используется математический аппарат дифференциальной геометрии[150,151] для нахождения локальных максимумов и минимумов. Решаются задачи на нахождение определенного оптимального режима, относительно критериев оптимизации.

В динамических задачах используется математический аппарат вариационного исчисления[166,86,124,164]. Решаются задачи на нахождение оптимальной мировой линии или траектории [73,71], которая обеспечивает минимум интеграла от лагранжиана [126] критериев оптимальности или вариационной формулировки задания.

При рассмотрении вентильных двигателей, используется нелинейные стохастические непрерывные сосредоточенные системы дифференциальных уравнений. Анализ, как статический, так и динамический, таких уравнений несколько затруднен, поэтому прибегают к некоторым способам упрощения уравнений.

Зачастую, используется следующий прием упрощения[143] - нелинейности магнитопровода не учитываются, параметры каждой "фазы" считаются симметричными, взаимоиндукции, вследствие симметрии, входят как дополнительный член в индуктивность каждой "фазы".

После таких преобразований, появляется система уравнений, в которой есть только одно нелинейное уравнение. ♦♦обычно на данном этапе преобразований эта система - трехфазная, и в следствии геометрической и временных симметрий уравнений можно воспользоваться следующим преобразованием [28], [169], [99] и получить систему уже для двух фаз, её также называют преобразованием к алфавита системе :

(1.7)

На этом не останавливаются, т.к. получившиеся уравнения, тоже имеют симметрии. Далее предполагают, что токи и напряжения, являются не только гармоническими функциями, но и синусоидальными. И вследствие этой дополнительной симметрии, можно сказать, что токи и напряжения в уравнениях описывают вращения некоторых векторов в фазовом пространстве. Логичным преобразованием является переход в вращающуюся систему координат, где токи и напряжения выражали бы их амплитуды и были бы псевдопостоянными величинами. Преобразование осуществляется за счет системы:

(1.8)

Но и на этом не останавливаются, уравнения еще более упрощаются, при переходе к безразмерным величинам и домену Лапласа:

(1.9)

где - относительное напряжения статора эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; - приведенный ток обмотки q эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; - приведенный ток обмотки d эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; - безразмерное время; - электромагнитный коэффициент; - электромагнитная постоянная времени электродвигателя; - эквивалентная частота; - механический коэффициент; - механическая постоянная времени электродвигателя; - относительный электромагнитный момент эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; - относительный момент сопротивления на валу эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; - приведенный момент.

И в конце всех преобразований получают наиболее простую нелинейную систему дифференциальных уравнений в домене Лапласа:

(1.10)

где - временная задержка, выражающаяся как геометрический угол в фазовом пространстве между векторами ЭДС и напряжения питания, также называемый угол коммутации в электроприводе [29] и угол нагрузки в электромеханике [97].

В формулировке уравнений (1.10), задача поиска оптимального управления выглядит наиболее явно. Оптимальное управление с помощью регулирования

амплитуды напряжения питания и частоты хорошо изучено, как например [25]. Однако, исследование оптимальных режимов и траекторий при управлении углом коммутации, исследовано плохо. Постановка такой задачи рассмотрена несколькими отечественными авторами [28], [154] и практически не рассмотрена за рубежом.

Поэтому актуальной и новой задачей становится: исследование оптимальных режимов вентильного двигателя при векторном управлении, относительно угла коммутации и различных критериев оптимальности.

Рассмотрение и решение этой задачи даст аналитические выражения, которые с помощью векторного управления, будут вводить вентильный двигатель в режимы, максимальной скорости, максимальной скорости холостого хода, максимального электромагнитного момента, минимума активных потерь, так называемого максимального электромагнитного КПД, минимума реактивных потерь, минимума полных потерь. Кроме этого будут предложены различные виды реализации.

1.3 Теория надежности и электроприводы ВД

Вентильный электропривод является сложной технической системой, которую можно рассматривать как физическую поэлементную систему, либо как систему связанных функциональных блоков[64]. Каждый элемент физической системы, участвует в динамических взаимодействиях, также каждый элемент сам по себе представляет сложную атомную структуру, которая имеет квантово-дискретную природу[71]. Исходя из этого, при динамических процессах каждый элемент переходит из одного псевдостационарного состояния в другое. По ходу изменений состояний, элемент теряет потенциальную энергию, которая расходуется на взаимодействия, как с другими элементами системы, так и с окружающей средой. За счет этой потери энергии, элемент переходит из функционирующего состояния в неисправное, что в свою очередь приводит к снижению надежности всей системы, и переход системы в неисправное состояние[11,39,69,74,145].

Современный вентильный электропривод, как система, имеет огромное количество составных элементов и один из них микроконтроллер. Как составной элемент, современный микроконтроллер[23] имеет на "борту" более миллиарда транзисторов. При рассмотрении системы с двадцатью простейшими элементами, необходимо анализировать около миллиона состояний. А при анализе вентильного электропривода, где количество простейших элементов выходит за миллиарды, рассмотрение всех состояний становится проблематично, поэтому возможный путь решения этой задачи агрегирование элементов [69].

В процессе функционирования вентильного электропривода с векторным управлением, каждый элемент привода находится в постоянном взаимодействии. Поэтому внешние воздействия, повреждая один элемент, окажут влияние на показатели надежности всех элементов привода. Нормативные воздействия не должны вызывать снижение надежности элементов, только кратковременные и мощные воздействия приведут к резкому снижению надежности. Воздействия могут быть разной природы, такие как, механические, гидродинамические, электродинамические, химические и прочие.

Исследование надежности систем в условиях внешних, разрушительных импульсных воздействиях, сравнительно новое направление в теории надежности. На данный момент, данное направление исследований не имеет зарубежных аналогов, основными работами по данному направлению можно считать [61,62,69] и дальнейшее развитие данного направления является важным и полезным для практической науки и техники.

Новейшие инженерные методы [64,61,62,69] анализа и моделирования надежности подразумевают использование аппарата дискретно-операторной математики, теории графов в рамках псевдостатических моделей надежности[69]. Такие методы рассматривают единый орграф[61] для всех типов воздействий, и на одну вершину приходится только одно воздействие. Воздействия не разделяются на классы, и системы, они не коррелируют между собой, хотя физическую систему можно описывать с различных сторон, как электродинамическую модель, механическую, гидродинамическую, химодинамическую и т.д. И в каждой модели импульсные воздействия той же природы, распространяются по-разному.

Однако на практике возникают ситуации с несколькими одновременными внешними воздействиями разной природы на один элемент системы.

Исходя из этого, становится актуальной задача: " модифицировать методику моделирования надежности в условиях одновременных импульсных воздействий разной природы на одинаковые вершины орграфа, с целью расширения возможностей моделирования аварийных ситуаций и природы исследуемого объекта".

Для решения такой задачи предлагается использовать дискретно-тензорный математический аппарат[78,1,122] и теорию графов[4]. Предлагается разделить все импульсные воздействия по природе, и синтезировать орграфы из количества элементов, не превышающих некое количество элементов исходной системы, относительно природы каждого импульсного воздействия.

Введение тензорного аппарата позволит не только структурировать импульсные воздействия и рассматривать распространение воздействия в своей природе, но и устанавливать корреляционные связи между орграфами одной системы, но разной природы. Такие корреляции выражают взаимодействия и смешивание воздействий разной природы, таких как: электромагнитных и тепловых и т.д., что еще раз подчеркивает актуальность задачи.

1.4 Выводы по главе № 1

1. Исследованы основные типы векторного управления, типы математических моделей, уровни идеализации. Выявлено, что математические модели вентильных

двигателей на данном уровне развития науки и техники распадаются на два класса: модели, которые используют для анализа систем, и модели, которые используются в инженерных разработках. Модели для анализа представляют собой: стохастические, распределенные, нелинейные системы уравнений в частных производных. Модели для инженерии представляют собой: стохастические, сосредоточенные, нелинейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Также выявлено, что для корректной постановки задачи численного расчета в электромеханике используются преобразования Лоренца. Выявлен недостаток преобразований Лоренца - они используются только для объектов движущихся с постоянной скоростью. Выявлена необходимость устранения этого недостатка в электромеханике.

2. Исследованы основы теории наблюдателей, идентификаторов и оценивания, как приложение векторного управления вентильными двигателями большой мощности. Выявлена необходимость построения фильтров оценивания для бездатчиковых систем. Также выявлена необходимость построения алгоритмов выбора оптимальных фильтров оценивания, относительно целей и задач, на которые рассчитан привод.

3. Исследованы особенности применения теории надежности к расчету надежности векторного привода вентильных двигателей. Выявлено, что существующие алгоритмы и модели, поддерживают моделирование ситуаций, когда на исследуемую систему приходят разрушительные импульсные воздействия одинаковой природы. Также выявлена необходимость получить новую модель в теории надежности, подходящую для случаев, когда на исследуемую систему приходят разрушительные воздействия разной природы.

2. Исследовательская и инженерные модели вентильного двигателя

Существует общая теория электромеханического преобразования энергии [143, 123,59], в которой помимо основных задач, решается задача построения и решения системы уравнений идеализированной, вращающейся, электрической машины. Так вот, у ряда авторов [143,123,59,108-112,97-98,27,142,44,88], такая задача включает в себя несколько этапов: определение геометрической модели электромеханического преобразователя; нахождение электрического и магнитного поля в воздушном зазоре; определение вектора Пойнтинга [143] и потока мощности; получение уравнений движения электромеханического преобразователя по методу Лагранжа.

На этапе определения электрического и магнитного поля электромеханического преобразователя, решается сложнейшая задача - ведется поиск решения системы дифференциальных уравнений в частных производных Максвелла. Основная особенность решения заключается в том, что в электромеханическом преобразователе имеются движущиеся части, которые принимают участие в электромагнитных процессах. Такие типы задач относятся к такому подразделу физики, как - "электродинамика движущихся сред"[82]. Эта наука изучает взаимосвязи электромагнитных полей, зарядов, токов и таких параметров сред, как диэлектрическая и магнитная проницаемости проводимости, с позиций движущихся и неподвижных наблюдателей. Может показаться странным, что поля и свойства материалов, зависят от движения наблюдателя. В 1905 году Альберт Германович Эйнштейн в труде "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" [68] разъяснил неразрывную взаимосвязь времени и пространства в едином четырехмерном континууме. Так появилась специальная теория относительности, которая отвечала на один простой вопрос: как выглядят законы физики с позиций движущихся с постоянной скоростью наблюдателей и неподвижных наблюдателей. А в 1916 году, выходит статья "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie"[68], которая уже отвечает на вопрос: как выглядят законы физики с позиций произвольно движущихся наблюдателей и в других общих случаях. Одним из самых ярких результатов этих теорий, является разъяснение природы магнитного поля. Так как магнитных зарядов до сих пор обнаружено не было, природа магнитного поля чисто релятивистская. Источником электрического поля являются заряды, а если они движутся, то вокруг их траектории создается вихревое магнитное поле. Причем для наблюдателя, связанного с электронами, магнитное поле не регистрируется, а для наблюдателя, относительно которого электроны движутся, магнитное поле регистрируется. Это хорошо видно из уравнения:

где - компонента электрического поля электрона измеренная наблюдателем, связанным с этим электроном, и движущимся вместе с ним со скоростью вдоль оси X, относительно неподвижного наблюдателя находящегося в центре координат; - компонента магнитного поля, которая регистрируется неподвижным наблюдателем, помимо регистрации и электрического поля электрона. И даже если скорость электронов низкая, в проводнике с током их так много, что регистрация магнитного поля не представляет труда.

Таким образом, в электродинамике движущихся сред для решения поставленной задачи необходимо записать систему преобразований полей и параметров сред между наблюдателем, связанным с ротором, и наблюдателем, связанным со статором, или наоборот. Исторически электромеханика развивалась параллельно выше приведенным теориям и одной из её задач и по ныне является - получение достаточно простых и точных соотношений для проектирования электромеханических преобразователей. Критерии точности и простоты, основываются на имеющихся вычислительных мощностях у расчетчика или инженера. И на заре электромеханики вычислительные мощности были крайне низкие, поэтому в качестве системы преобразований между электродинамическими величинами и параметрами - брали преобразования Лоренца [143,82,108-112,97-98]. Считали целесообразным подставлять в преобразования Лоренца - мгновенную скорость движения ротора или статора, обосновывая это низкими требованиями к вычислительной сложности. Но я считаю, что этот подход

несколько ограничен, в связи с тем, что преобразования Лоренца, основываются на условии постоянства скорости движения ротора, относительно статора или наоборот. Также данный подход, закрепился и в таком направлении, как численное моделирование электромагнитных процессов в электротехнике и электродинамике [118,53,66,67,82]. В таких известных программных пакетах как Ansys Maxwell или Matlab вообще не рассматриваются преобразования, что сказывается на их точности и границах применимости. Однако, на практике ротор, относительно статора, может двигаться произвольно и нынешние имеющиеся вычислительные мощности можно считать практически бесконечными.

Таким образом, актуальным остается решение следующего вопроса:

-Улучшение расчетных алгоритмов электромагнитных процессов в динамических режимах для анализа электрических машин, по сравнению с применяющимися. Что позволит разрабатывать как более эффективные новые электрические машины, которые будут основываться уже на концепции: что в разных системах отсчета - материалы и поля различаются. Также и улучшать прежние электрические машины, в частности подбирая такие свойства материалов, которые были бы эффективны, даже при предельных режимах работы.

На основании всего выше изложенного, целью данной главы является: Дополнение теории, практики вентильного электропривода в части: анализа и расчета электромагнитных процессов при динамических режимах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести анализ существующих методик расчета электромагнитных процессов в электрических машинах при динамических режимах;
- Выявить наиболее общие связи между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета;
- Построить алгоритм для получения аналитических выражений взаимоотношений между электродинамическими величинами и параметрами в произвольно движущихся системах отсчетов;
- Дать практические выражения, рекомендации и методики по применению данных соотношений в расчете электромагнитных процессов электрических машин при динамических режимах работы.

Для решения поставленных задач: предлагается использовать математический аппарат общей теории относительности.

Общая теория относительности (ОТО) базируется на дифференциальной геометрии и тензорном анализе[83,87]. Введение этих математических аппаратов позволит верно оценить взаимоотношения систем отсчета при произвольном движении ротора или статора. На практике, вводом математических методов ОТО в электромеханику для данной проблемы будет - расчет матриц Якоби преобразований тензорных величин, таких как плотности токов; напряженности; индукции; электрические и магнитные проницаемости; удельные проводимости, из системы отсчета ротора в систему отсчета статора и обратно.

Применение математического аппарата ОТО в электромеханике, для расчетов взаимоотношений систем отсчета ротора и статора, является научным достижением. Практическим же достижением является получение формул для преобразований между системами отсчета, основных электромагнитных величин, таких как: плотности токов; напряженности; индукции; электрические и магнитные проницаемости; удельные проводимости. В инженерии полученные преобразования можно разложить в ряд Тейлора[124] и получить уже упрощенные, учитывающие произвольность движения, преобразования между электродинамическими величинами и параметрами в разных системах отсчета.

2.1 Основные понятия и уравнения электродинамики в ковариантной форме

2.1.1 Уравнения Максвелла в инерциальных системах отсчета.

Уравнения Максвелла с материальными уравнениями и граничными условиями представлены в форме (2.1), они верны только в инерциальных системах отсчета (СО)[77,82,83,87], то есть $\diamond\diamond$, во всех структурах: статичных[96], псевдостатичных[14] или движущихся с постоянной скоростью[82], но не могут быть верны скажем в СО вращающегося ротора, т.к. он неинерциальная система[120].

(2.1)

где $\vec{E}$ – напряженности магнитной и электрической составляющей электромагнитного поля; $\vec{B}$ – магнитная и электрическая индукция; $\vec{j}$ – плотность тока; ρ – объемная плотность заряда; ϵ – электрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; σ – электрическая проводимость; $\vec{v}$ – объемная плотность пучка зарядов; $\vec{v}_0$ – скорость пучка зарядов; $\vec{E}_0$ – напряженность сторонних источников; $\vec{j}_0$ – плотность тока, вызванная движением исследуемой среды со скоростью $\vec{v}$, по отношению к магнитной индукции $\vec{B}$; $\vec{j}_1$ – плотность тока, вызванная движением поляризованного диэлектрика; $\vec{E}_1$ – граничные условия уравнений Максвелла, приведенных к гиперболическому виду; $\vec{E}_2$ – начальные условия уравнений Максвелла, приведенных к гиперболическому виду; n – номер орты системы отсчета.

Связь электромагнитных и электрических и магнитных величин поясняется на системе:

(2.2)

где ρ – плотность энергии поля; j – электрический ток; U – электрическое напряжение; Φ – магнитный поток; S – площадь поперечных сечений, направленные по нормали к ним.

2.1.1.1 Необходимые определения линейной алгебры

Определение (2.1): Пусть V – линейное евклидово фазовое пространство векторов, каждый элемент которого будет иметь обозначение (2.3)

где x_i – координата вектора на векторном базисе, n – размерность пространства [21].

Тогда пусть V^* – сопряженное евклидово линейное фазовое пространство ковекторов [21], каждый элемент которого будет иметь обозначение (2.4)

где x_i – координата ковектора на ковекторном базисе.

Определение (2.2): Пусть существует r линейных фазовых пространств векторов, где n – номер пространства, также пусть существует q линейных фазовых пространств ковекторов, где m – номер пространства. Определим декартово произведение r линейных фазовых пространств векторов и q линейных фазовых пространств ковекторов: $\otimes$, произведение образует собственное линейное евклидово фазовое пространство, которое будем называть пространством полилинейных форм и обозначать [21,78,1]. Элемент пространства полилинейных форм имеет вид (2.5) и название полиформа валентности (p,q) .

(2.5)

где набор скаляров – будем называть координатами полилинейной формы или тензором, а набор e_i – будем называть базисом полилинейной формы W (2.5).

При использовании соглашения Эйнштейна [1,77,82,83,87,21,78], выражение (2.5) можно записать как $T_{i_1 \dots i_p j_1 \dots j_q}$, в будущих выкладках будем пользоваться этим правилом.

Будем называть верхние индексы тензора контвариантными, а нижние ковариантными, тогда в соответствии с определением (2.2), выражения (2.4) и (2.5) являются частными случаями полилинейных форм.

Будем считать, что весь последующий материал и все полилинейные формы являются элементами фундаментального пространства или его субпространств. Также будем считать, что при выполнении тензорных операции, таких как сложение, вычитание – складываются или вычитаются соответствующие полиформы в одном общем базисе, а базисы опускаются. При произведении – базисы перемножаются декартово и возникает новый базис для получившегося тензора и также опускаются базисы, также для поэлементного умножения тензоров будем использовать знак $\odot$, а для тензорного умножения $\otimes$

2.1.2. Уравнения Максвелла в произвольной системе отсчета

Известно, что электромагнитное поле ведет себя как тензорное поле, где в каждой точке пространства определен антисимметричный тензор электромагнитного поля [83,82,78,87]. Рассмотрим ковариантные материальные уравнения Максвелла [83,82,120], которые справедливы для любых СО и в любых системах координат (СК).

(2.6)

где ϵ – дуальный тензор; B – тензор электромагнитной индукции; j – четырехмерная плотность тока; μ – тензор электромагнитной проницаемости играющий роль связи материальных уравнений в трехмерной формулировке; σ – тензор проводимости; α – индексы пробегает значения от 0 до 3.

Приведем матричную и векторную форму некоторых из них:

(2.7)

(1.8)

2.1.3. Функциональная связь электромагнитных величин между произвольными системами отсчета

Как уже упоминалось, электромагнитное поле является тензорным [83], поэтому для получения функциональных связей между произвольными СО мы будем пользоваться тензорным исчислением. Введем базисные векторы и ковекторы: e_i в системе отсчета исследуемого объекта (допустим ротора) и e^i в системе отсчета наблюдателя. Тогда имеют место выражения их связи (2.9).

(2.9)

где тензоры Λ^i_j и Λ_i^j являются матрицами Якоби [126,151] для векторов-строк и столбцов соответственно. Определение же структуры матрицы Якоби, может быть дано исходя из функциональной зависимости между ортами координат.

Для всех основных тензорных величин в электродинамике справедливы следующие соотношения (2.10) между различными системами отсчета, допустим движущейся и стационарной.

(2.10)

2.2 Исследовательская модель электромеханической части вентильного двигателя

2.2.1 Определение собственных характеристик системы отсчета ротора

Рассмотрим конструкцию синхронного двигателя, причем примем предположение, что длина асимптотической окружности радиального размера ротора значительно больше, чем ширина зазора. Благодаря такому предположению, мы можем рассматривать локально относительное движение систем отсчета ротора-статора, как прямолинейное, в силу особенностей задачи компенсационное гравитационное поле вводиться не будет.

Для исследования вопроса нахождения преобразования в неинерциальных системах отсчета, нам понадобится ввести три системы отсчета:

1) физическая система отсчета неподвижного наблюдателя, координаты будут обозначаться большими латинскими буквами (2.11)

(2.11)

2) обобщенная система отсчета Галилея, координаты будут обозначаться малыми латинскими буквами (2.12). В системе отсчета Галилея подразумевается, что время во всех системах отсчета Галилея течет одинаково.

(2.12)

3) физическая система отсчета вращающегося ротора, координаты будут обозначаться малыми греческими буквами (2.13)

(2.13)

2.2.2. Определение взаимоотношений характеристик систем отсчета

Выбор систем отсчета в общей теории относительности (ОТО) ни чем не обусловлен, согласно принципу относительности.

" Для любой неинерциальной системы отсчета можно указать бесконечный набор других неинерциальных систем отсчета, в которых метрика имеет одну и ту же функциональную форму. В результате чего, все уравнения физики в этих системах отсчета форминвариантны, а поэтому, ни какими физическими экспериментами нельзя определить - в какой неинерциальной системе отсчета мы находимся" [77].

Но СО регламентирует структуру метрического тензора [83,150], где латинские индексы пробегают значения от 0 до 3, а греческие 1 до 3.

Зададим метрический тензор :

(2.14)

Зададим релятивистский четырехмерный интервал [83,144,146], который является инвариантом во всех системах отсчета :

(2.15)

Преобразуем интервал к более раскрытому виду с учетом (2.12):

(2.16)

Преобразуем выражение (2.16), а именно прибавим и вычтем квадрат величины и получим:

(2.17)

Как видно из выражения (2.17), четырехмерный интервал имеет как пространственную, так и временную составляющую в римановом пространстве[77,1,122]. В специальной теории относительности, как в частном случае общей теории относительности, в псевдоевклидовом пространстве, задан интервал, который тоже является инвариантом во всех инерциальных системах отсчета:

(2.18)

где – координата времени в собственной системе отсчета движущегося объекта, интервал можно переписать так:

(2.19)

где – величина собственной трехмерной длинны в псевдоевклидовом пространстве, в собственной системе отсчета движущегося объекта.

По аналогии четырехмерный интервал в римановом пространстве другой системы отсчета, имеет пространственную и временную проекции, поэтому мы можем записать выражение (2.18) в другом виде:

(2.20)

где – координата времени (собственного времени) в собственной системе отсчета исследуемого объекта[144], – величина трехмерной пространственной длинны (собственной длинны[77]) в собственной системе отсчета исследуемого объекта, – скорость света.

Запишем выражения задающие функции собственного времени и собственной длинны исходя из выражений (2.17) и (2,20):

(2.21)

(2.22)

Проанализируем полученные выражения в общем случае, для этого распишем выражение (2.21), не применяя к нему правило индексов Эйнштейна и

расписывая сумму:

(2.23)

Как видно из выражения (2.23), темп хода времени в собственной системе отсчета исследуемого объекта, допустим ротора, зависит как от компонентов метрического тензора, так и от координат местоположения измерительных часов. Допустим, на вращающемся роторе [83,82,87], темп хода времени будет зависеть от свойств и характеристик движения ротора и иметь постоянное или переменное смещение значения времени в пространстве. Как видно из выражения (2.22), геометрические характеристики в собственной системе отсчета исследуемого объекта для внешнего наблюдателя будут тоже меняться и зависеть от компонентов метрического тензора.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что для составления динамической физической модели вентильного двигателя необходимо записать: ковариантные уравнения Максвелла для материальных сред, граничные электродинамические условия, начальные электродинамические условия, граничные пространственно-временные условия, начальные пространственно-временные условия и, вследствие основной теоремы электродинамики, будет единственное решение данной системы уравнений[96].

2.2.3 Определение прямых преобразований систем отсчета ротора-статора

Определим интервал в системе отсчета лабораторного наблюдателя, пусть лабораторный наблюдатель находится в инерциальной системе отсчета[144], где геометрия пространства времени псевдоевклидова[151].

(2.23)

Пусть ротор вращается в направлении орты с произвольной скоростью. Определим интервал в принятой системе координат, в системе отсчета Галилея[77,144] на роторе.

(2.24)

где координата связана с координатой выражением

(2.25)

Найдем значение полного дифференциала[164] выражения (2.25):

(2.26)

Найдем значение квадрата полного дифференциала выражения (2.26):

(2.27)

Распишем дифференциал скорости :

(2.28)

Распишем выражение (2.27) подставив туда (2.28):

(2.29)

Распишем выражение (2.23) подставив туда (2.29):

(2.30)

Таким образом, мы получили значение четырехмерного интервала в системе отсчета Галилея на вращающемся роторе. Так как, мы знаем значение четырехмерного интервала, мы можем определить метрический тензор, для определения собственных времен и расстояний системы отсчета ротора.

Определим метрический тензор исходя из выражения (2.30), для этого сначала распишем выражение (2.15)

(2.31)

Определим метрический тензор исходя из знания что - симметричен в рассматриваемом случае, также выражения (2.30) и (2.31)

(2.32)

Определим выражение собственного времени согласно выражению (2.23), (2.31) и используя найденное значение метрического тензора (2.32)

(2.33)

Определим выражение собственной длины, согласно выражению (2.22) и используя найденное значение метрического тензора (2.32)

(2.34)

Определим теперь взаимосвязь собственных длин и времен системы отсчета ротора и Галилеевской системы, используя выражения (2.33) и (2.34)

(2.35)

Теперь, когда определены связь физической системы отсчета ротора и обобщенной системы отсчета Галилея (2.35), давайте найдем связь физической системы отсчета неподвижного наблюдателя - статора и физической системы отсчета ротора. Для этого решим относительно уравнения (2.25), то есть получим обратное расширенное преобразование Галилея [151].

(2.36)

(2.37)

Отметим также, что взять интегралы от выражения (2.35) просто так нельзя, дело в том, что скорость движения ротора зависит от времени, и положение произвольной точки тоже зависит от времени, поэтому подынтегральные члены неявно зависят от положения произвольной точки.

Поэтому запишем связь физической лабораторной системы отсчета статора с физической системой отсчета ротора в дифференциальном виде, тем самым получим прямые преобразования.

(2.38)

(2.39)

2.2.4 Определение обратных преобразований систем отсчета статора-ротора

Определим интервал в системе отсчета лабораторного наблюдателя, связанного с ротором, пусть лабораторный наблюдатель находится в инерциальной системе отсчета, где геометрия пространства времени псевдоевклидова.

(2.40)

Пусть статор вращается в направлении орты с произвольной скоростью. Определим интервал в принятой системе координат, в системе отсчета Галилея на роторе.

(2.41)

где координата связана с координатой выражением

(2.42)

Найдем значение полного дифференциала выражения (2.42)

(2.43)

Найдем значение квадрата полного дифференциала выражения (2.43)

(2.44)

Распишем дифференциал скорости

(2.45)

Распишем выражение (2.44) подставив туда (2.45)

(2.46)

Распишем выражение (2.40) подставив туда (2.46)

(2.47)

Таким образом, мы получили значение четырехмерного интервала в системе отсчета Галилея на вращающемся статоре. Так как мы знаем значение четырехмерного интервала, мы можем определить метрический тензор для определения собственных времен и расстояний системы отсчета статора.

Определим метрический тензор, исходя из выражения (2.47), для этого сначала распишем выражение (2.15)

(2.48)

Определим метрический тензор исходя из знания, что - симметричен в рассматриваемом случае, также выражения (2.47) и (2.48)

(2.49)

Определим выражение собственного времени, согласно выражению (2.21), (2.23) и используя найденное значение метрического тензора (2.49)

(2.50)

Определим выражение собственной длины, согласно выражению (2.22) и используя найденное значение метрического тензора (2.49)

(2.51)

где задан выражением

Определим теперь систему отсчета статора, используя выражения (2.50) и (2.51)

(2.52)

Теперь, когда определены связь физической системы отсчета статора и обобщенной системы отсчета Галилея (2.52), давайте найдем связь физической системы отсчета неподвижного наблюдателя - ротора и физической системы отсчета статора. Для этого решим относительно уравнения (2.42), то есть получим обратное расширенное преобразование Галилея.

(2.53)

(2.54)

Отметим также, что взять интегралы от выражения (2.52) просто так нельзя, дело в том, что скорость движения ротора зависит от времени, и положение произвольной точки тоже зависит от времени, поэтому подынтегральные члены неявно зависят от положения произвольной точки.

Поэтому запишем связь физической лабораторной системы отсчета статора с физической системой отсчета ротора в дифференциальном виде, тем самым получим обратные преобразования.

(2.55)

(2.56)

2.2.5 Определение матрицы Якоби

Обратимся к выражениям (2.38), (2.39), (2.55), (2.56) и запишем их в систему (2.57)

(2.57)

Запишем определение дифференциала сложной функции [164,148,127,21] (2.58)

(2.58)

Перепишем систему (2.57) в виде (2.58) и получим (2.59)

(2.59)

тем самым, мы получили явные выражения всех частных производных взаимозависимостей физических систем отсчета статора и ротора.

Запишем определение матрицы Якоби [151] для перехода от физической системы отсчета статора к физической системе отсчета ротора с учетом последовательности координат:

(2.60)

где

И в соответствии с выражением (2.60), определение матрицы Якоби перехода ротор-статор будет записано в виде:

(2.61)

Также запишем определение матрицы Якоби, перехода статор-ротор, в соответствии (2.60) в виде:

(2.62)

Запишем тензор электромагнитного поля [83,132] в виде билинейной формы

Тензор электромагнитного поля в виде билинейной формы будет в виде:

(2.63)

Запишем общее определение преобразования [151] тензора - билинейной формы второго ранга

(2.64)

- проекция тензора в системе координат.

Распишем определение (2.64) почленно и проанализируем:

(2.65)

Внимательно рассмотрев и проанализировав выражение, можно прийти к выводу, что его можно записать в матричной форме [127]:

(2.66)

где - транспонированная матрица.

Таким образом, мы подготовили теоретическую базу для практических расчетов, рассмотрим наш случай движения ротора с учетом равенства множителей выражения (2.59) выражению (2.57), и запишем значение матрицы Якоби для перехода ротор-статор:

(2.67)

Также запишем значение матрицы Якоби для перехода статор-ротор:

(2.68)

На основании выражений (2.67), (2.68), приведем практические примеры, аналитических расчетов в электродинамике.

2.2.6 Определение прямого преобразования

Определим значения преобразования каждого элемента электромагнитного тензора (2.69), согласно выражению (2.67) для этого введем два обозначения:

Тензор электромагнитного поля ротора:

(2.69)

Тензор электромагнитного поля статора:

(2.70)

И так, определим определение преобразования от полей ротора к полям статора:

(2.71)

Определим каждый элемент почленно:

(2.72)

Определим согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.73)

По аналогии с выражением (2.73) определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67), но опустим промежуточные выкладки:

(2.74)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.75)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.76)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.77)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.78)

2.2.7 Определение обратного преобразования

Определим определение преобразования от полей статора к полям ротора:

(2.79)

(2.79)

Определим каждый элемент почленно:

(2.80)

Определим согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.81)

По аналогии с выражением (2.81) определим согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67), но опустим промежуточные выкладки:

(2.82)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.83)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.84)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.85)

Определим , согласно выражениям (2.72), (2.70), (2.69), (2.68), (2.67):

(2.86)

2.2.8 Определе◆◆ие прямого и обратного преобразования для 4-тока

4 - ток[83,77,82], определяется формулой:

(2.87)

Определим прямое преобразование из СО ротора в СО статора по формуле (2.89) с учетом выражений (2.88), (2.67), (2.61), (2.10):

(2.88)

И без вывода, результаты расчета преобразований:

(2.89)

(2.90)

(2.91)

(2.92)

Определим обратное преобразование из СО статора в СО ротора по формуле с учетом выражений (2.88), (2.68), (2.62), (2.10):

(2.93)

И без вывода, результаты расчета преобразований:

(2.94)

(2.95)

(2.96)

(2.97)

2.2.9 Определение прямого преобразований тензора электромагнитной проницаемости

Тензор электромагнитной проницаемости будем определять, для тензора электромагнитного поля и тензора индукции[132,161]:

(2.98)

Тензор электромагнитной проницаемости, может быть заполнен разными способами, выберем такой, что все элементы тензора будут положительны, также он должен удовлетворять выражению:

(2.99)

На практике, с достаточной точностью рассматривают среды, которые можно описать как анизотропно-диспергирующие[44], однако, в практических целях, в определенный момент времени, в определенной точке пространства двигателя, можно записать следующие трехмерные зависимости между индукциями и напряженностями:

(2.100)

Всего в тензоре электромагнитной проницаемости элементов, однако, использоваться будет только 24 элемента, все остальные равны нулю. Запишем эти 24 элемента в импровизированной системе, но для сжатости опустим упоминание, что они определены в одной точке:

(2.101)

Выражение (2.101) можно условно разделить как таблицу на шесть столбцов, в каждом столбце записаны элементы, которые являются множителям определенным "тройкам" элементов в тензоре.

Определим прямое преобразование[151] из СО ротора в СО статора тензора электромагнитной проницаемости по формуле (2.102), с учетом выражений (2.100), (2.102), (2.67), (2.61), (2.10).

(2.102)

Результаты расчета преобразований по выражению (2.102):

(2.103)

(2.104)

(2.105)

(2.106)

(2.107)

(2.108)

2.2.10 Определение прямого преобразования тензора проводимости среды.

Тензор проводимости среды будем задавать для тензора электромагнитного поля из выражения (2.98) с учетом выражения (2.109) [132,161].

(2.109)

где - 4 плотность тока.

Наиболее часто в электротехнике среда является анизотропной, но симметричной, поэтому мы будем руководствоваться следующим выражением:

(2.110)

Исходя из выражений (2.109) и (2.110), в тензоре проводимости среды будет 6 элементов, перечислим их:

(2.111)

Преобразование из СО ротора в СО статора тензора проводимости среды будет происходить по формуле (2.112) с учетом выражений (2.100), (2.102), (2.67), (2.61), (2.10):

(2.112)

Результаты расчета преобразований по выражению (2.112):

(2.113)

(2.114)

(2.115)

2.2.11 Уточненная методика расчета полевой задачи.

Практически все программы для расчетов полевой задачи пользуются стандартной методикой расчета [66,67,118], которая появилась при изучении уравнений математической физики [9,115]. Численные расчеты полей в электромеханике и электроприводе основываются на этой методике, но она создавалась на таком этапе развития вычислительной техники, когда вычислительные мощности были малы [142,94,66,23]. С развитием вычислительной техники, необходимо повышать точность расчетов. Ранее расчеты велись по формулам, которые создавались для постоянных скоростей движения тел в полевой задаче [82], однако технически это правило нарушалось, и туда "вставлялось" мгновенная скорость движущихся частей [144,118]. Такое нарушение приводило к "удовлетворительным" результатам расчета, даже при бесконечно малой сетке в методе конечных разностей (КР), или бесконечному количеству элементов в методе конечных элементов (МКЭ) [123].

Поэтому целесообразно дополнить методику расчетов, с целью исключения нарушений правил использования расчетных выражений.

Разработанная методика состоит в следующем:

- 1) По топологии двигателя в состоянии покоя, относительно каждой его движущейся части, выбирается удобная система координат (СК) и СО. Допустим, если двигатель цилиндрический, то и СК наиболее целесообразна - цилиндрическая. Если ротор движется относительно статора, то целесообразно выбрать две системы координат и две СО, для ротора и статора соответственно.
- 2) По топологии двигателя в выбранных системах координат, составляются карты распределений электрической проницаемости, магнитной проницаемости, электрической проводимости, для каждой точки топологического пространства электродвигателя.
- 3) По составленным картам, заполняются карты тензоров электромагнитной проницаемости (2.99) и проводимости (2.109), для каждой точки топологического пространства электродвигателя.
- 4) Выбирается система отсчета, относительно которой будет произведен расчет всех токов, полей и зарядов. Допустим СО ротора или СО статора.
- 5) Для выбранной системы отсчета, и той системы координат, которую мы выбрали, записываются уравнения Максвелла, с начальными данными Коши (1.1) и полевые уравнения распределенной силы (I), также механические уравнения динамики движения ротора.

(I)

где - вектор намагниченности; - вектор магнитной индукции внешнего поля; - вектор плотностей тока; - вектор электрической поляризации; - вектор электрической индукции внешнего поля; - вектор электрической напряженности; - объемная плотность зарядов.

6) Производится расчет метрического тензора, исходя из инвариантности пространственно-временного интервала в разных СО. Приравняв квадрат интервала в разных СО, скажем неподвижной и движущейся, записывая функциональную взаимосвязь между ними определяются компоненты тензора.

7) Производится расчет дифференциалов «собственной длины» и «собственного времени» определенной СО по значениям компонент метрического тензора и выражениям (2.14) - (2.34).

(II)

где - значения измеряемые внутри СО, наблюдателем связанным с ней; - значения измеряемые из другой СО, наблюдателем связанным с ней.

8) Исходя из определения «дифференциала сложной функции» и аналитических значений собственной длины и времени в разных СО, производится заполнение матриц Якоби (III). Матрицы Якоби заполняются частными производными, которые являются элементами сложных дифференциалов собственной

длины и времени. Расчет матриц Якоби представлен в выражениях (2.53) (2.54) (2.59) (2.61) (2.62).

(III)

где - это координаты в СО движущейся части (скажем ротора); - это координаты в другой СО (скажем статора).

9) Для карт тензоров электромагнитной проницаемости и проводимости, которые принадлежат движущимся элементам двигателя, относительно выбранной СО, необходимо произвести перерасчет значений тензоров в выбранную СО по полученным матрицам Якоби и исходя из выражений (IV), (2.112) и (2.102). Это необходимо для корректного учета движущихся частей, при расчете поля в них, так как их характеристики меняются в выбранной СО.

(IV)

где - объекты в СО движущихся элементов; - элементы в той СО где производится расчет поля электрической машины.

Примечание: Для двигателей большой мощности и большого поперечного сечения ротора, целесообразно производить перерасчет значений тензоров электромагнитной проницаемости и проводимости, по формулам (2.103) - (2.108) и (2.113) - (2.115).

10) Производится перерасчет в выбранную СО, собственных полей и токов движущихся частей из их СО. Преобразование производится по значениям матриц Якоби и выражениям (V); (2.71) - (2.79); (2.80) - (2.86); (2.88) - (2.92); (2.94) - (2.97).

(V)

где - тензор электромагнитного поля; - тензор индукции; - вектор плотности тока или 4-ток; элементы с индексом «R» - объекты в СО движущихся элементов; элементы с индексом «S» - объекты в той СО где производится расчет поля электрической машины.

11) Производится численный расчет полевой задачи по уравнениям Максвелла, вкупе с (I), (IV), (V). Рекомендуется производить расчет либо многомерным методом Бубнова-Галеркина, либо многомерным методом Канторовича, либо более мощными методами для нестационарных, нелинейных задач.

2.3 Инженерная модель вентильного двигателя

2.3.1 Методика перехода от системы ДУЧП Максвелла к системе ОДУ

Вентильный двигатель состоит из трех систем: блока управления, коммутационного блока и электромеханического преобразователя. В инженерной практике, инерционностью и нелинейностью силовых коммутационных элементов и цепей управления можно пренебречь, и считать, что поле статора индуцируется бесконечно дифференцируемой функцией. В параграфах 2.2.5-2.2.11 мы изучили, как преобразуются напряженности, диэлектрические и магнитные проницаемости, проводимости, материалов и полей ротора в систему отсчета статора, теперь необходимо применить полученные результаты.

Для получения семейства инженерных моделей, необходимо произвести переход от совместной системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) Максвелла и полевых уравнений механики, к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), это основывается на низкой вычислительной мощности, необходимой для решения и "быстрого" анализа полученных уравнений. Прежде всего, такой переход не является точным, любая система ДУЧП - описывает поведение какого-то поля, основным свойством которого является бесконечное количество степеней свободы. Тогда, когда любая система ОДУ описывает поведение некоего объекта, обладающего конечным количеством степеней свободы. Поэтому, при переходе от ДУЧП к ОДУ пытаются получить систему, которая оптимальным образом относительно средних значений искомым функций или их функциональных комбинаций в некой геометрической окрестности. К сожалению, задача оптимального перехода от системы ДУЧП к системе ОДУ, на данный момент развития науки и техники, в общем случае не формализована, в связи с низким развитием теории ДУЧП [128].

Поэтому в общей теории электромеханического преобразования поступают следующим образом:

-1. Все электромеханические преобразователи разделяются на "индуктивные" и "емкостные"[27], относительно основной составляющей электромагнитного поля в зазоре электрической машины. Это делают для того, чтобы отбросить часть уравнений из системы ДУЧП Максвелла.

-2. Далее рассматривают топологию электромеханического преобразователя, и как можно более её упрощают. Тем самым упрощается геометрическая структура будущей системы ОДУ электромеханического преобразователя.

-3. Принимают, что поля рассеивания, а также любые поля, которые не участвуют в электромеханическом преобразовании энергии или слабо участвуют, равны нулю. Таким шагом все поля остаются строго внутри топологии электромеханического преобразователя.

-4. Следующим шагом топология электромеханического преобразователя разбивается на однотипные элементы или области, и в каждой области задается строгая форма распределения основной составляющей электромагнитного поля электрической машины. Тем самым, основная составляющая электромагнитного поля электромеханического преобразователя, которая определена от независимых переменных, системы ДУЧП Максвелла, а именно, теперь зависит от двух параметров, допустим длины и времени в этой области или элементе. За счет этого происходит свертка пятимерного решения одной искомой функции из системы ДУЧП Максвелла, до трехмерного решения с псевдо распределением в трехмерном геометрическом пространстве.

-5. Теперь вся система ДУПЧ Максвелла, после всех преобразований, вырождается в систему ДУПЧ, которая описывает сложную геометрически одномерную электрическую цепь. И предпринимается наиболее радикальный шаг: принимается, что скорость распространения электромагнитных волн, является бесконечной. За счет этого условия, исчезает распределение по параметру, который является геометрическим и "поле" уже распределено равномерно или одинаково, относительно приращения параметра, но оно зависит от времени.

-6. Так как пятимерные решения системы ДУПЧ Максвелла после всех упрощений, стали двухмерными, что автоматически вырождает систему ДУПЧ Максвелла - в систему ОДУ, которая будет зависеть только от времени.

2.3.2 Семейство инженерных моделей вентильных двигателей

Теперь давайте рассмотрим более подробно электромеханический преобразователь, как синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе. Электромагнитные процессы будем описывать в системе отсчета, связанной со статором. Предположим, что у нас трехфазная явнополюсная машина с гладким ротором, с постоянными магнитами и одной парой полюсов, в противном случае, просто вводятся необходимые коэффициенты. Пользуясь методикой перехода от системы ДУПЧ Максвелла к системе ОДУ в токах и напряжениях, можно придти к следующей простой схеме:

Рисунок 2.1 – эквивалентная схема синхронной машины с постоянными магнитами.

где - источники эдс питания обмотки статора; - эквивалентные источники тока, которые организуют вращение основного вектора магнитной индукции собственного магнитного поля ротора (постоянных магнитов); - средняя длина силовой линии фазы ярма; - средняя длина силовой линии сердечника полюса; - средняя длина силовой линии зазора; - средняя длина силовой линии якоря.

Давайте запишем систему ОДУ, согласно рисунку 2.1 и выражениям (2.72) - (2.78); (2.80) - (2.86); (2.89) - (2.92); (2.94) - (2.97), (2.103) - (2.108) и (2.113) - (2.115) для вентильного двигателя (ВД), с учетом параграфа 2.3.1:

1) Математическая модель ВД, учитывающая средние в пространстве изменения во времени магнитного поля и преобразования электромагнитных величин, и параметров между произвольно движущимися СО:

(2.116)

(2.116)

где - линейное напряжение источника питания фаз А,В,С; - фазные токи статорных обмоток фаз А,В,С; - амплитуды источника напряжения фаз А,В,С; - магнитные потокоцепления статорных обмоток фаз А,В,С; - магнитные потоки в ярме схемы синхронного двигателя; - магнитные индукции создаваемые фазными токами; - количество витков статорных обмоток фаз А,В,С; - эффективная площадь сечения полюса фаз А,В,С; - среднее значение эффективной площади магнитопровода фазы ярма статора; - значение магнитной индукции собственного поля ротора в системе отсчета статора; - значения электрических и магнитных собственных полей ротора в системе отсчета ротора; - магнитная проницаемость статора; - магнитная проницаемость воздуха; - магнитная проницаемость ротора в СО ротора, ортогональная воздушному зазору; - диэлектрическая проницаемость ротора в СО ротора, направленная вдоль вала двигателя; - радиус ротора; -механический угол поворота ротора; - механический угол поворота ротора соответствующий начальному положению; - фаза функции напряжения питающей сети; -угол нагрузки; -угол коммутации; - момент сопротивления; - момент электромагнитный; - коэффициент трения шарикоподшипников; - момент инерции ротора;

Упростим систему (2.116) и потребуем, чтобы ускорения и скорости были малыми, отсутствовал гистерезис и магнитная индукция линейно зависела от напряженности магнитного поля. Запишем получившуюся систему уравнений:

2) Математическая модель ВД, учитывающая несимметричность линейных магнитных цепей и взаимоиндукции обмоток статора:

(2.117)

где - индуктивности статора фаз А,В,С; - межфазовые взаимоиндуктивности фаз А,В,С; - количество витков фаз А,В,С; - площадь сечения сердечника полюса; - значение магнитной индукции собственного поля ротора.

Теперь упростим систему уравнений (2.117), для этого потребуем условие симметричности и равенства: чтобы все взаимоиндуктивности были равны между собой, все индуктивности были равны между собой, все сопротивления равны друг другу, чтобы взаимосвязь амплитуды потока собственного поля ротора в системе отсчета статора была постоянной и задавалась коэффициентом.

3) Математическая модель ВД для трехфазного симметричного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов:

(2.118)

где - суммарная симметричная индуктивность обмотки фазы статора; - сопротивление фазы статора; -коэффициент связи.

Система уравнений (2.118) изначально описывает трехфазный ВД, однако эту систему можно упростить, произведя переход к двухфазной системе уравнений.

Для этого покажем векторную диаграмму взаимосвязи двух трехфазной системы координат (СК) и двухфазной СК:

Рисунок 2.2 – векторная диаграмма взаимосвязи трехфазных величин и двухфазных.

Согласно диаграмме (2.2), введем систему преобразований между СК, также заметим, что токи и напряжения представляют синусоидальные функции и их амплитуды возросли в полтора раза, как и амплитуда ЭДС.

(2.119)

где - значения линейных напряжений системы питания эквивалентного двухфазного ВД; - токи фаз эквивалентного двухфазного ВД.

Преобразуем систему (2.118) согласно (2.119) и получим выражения, которые будут описывать ВД в СК альфа-бета:

4) Математическая модель ВД в СК альфа-бета:

(2.120)

Система (2.120) обладает характерными симметриями. Давайте потребуем, что токи являются синусоидальными функциями с той же частотой, что и напряжение питания. Запишем систему уравнений (2.120) во вращающейся СК ротора, для этого изобразим геометрическую векторную диаграмму преобразований к вращающейся СК d-q в обычном евклидовом фазовом пространстве:

Рисунок 2.3 – геометрическая интерпретация преобразования двухфазной СК, во вращающуюся СК ортогональных координат d-q.

Запишем систему аналитических преобразований, согласно рисунку (2.3), для перехода из системы отсчета статора к системе отсчета ротора d-q:

(2.121)

где - напряжения питания статора эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора d-q; - токи статорных обмоток эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - ЭДС движения ротора эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора d-q; - разность фаз между током и напряжением; - амплитуды напряжений и токов системы питания статора.

6) Преобразуем систему (2.120) согласно (2.121) и получим выражения, которые будут описывать ВД во вращающейся СК d-q:

(2.122)

Систему уравнений (2.122) можно аналитически упростить, если привести её к значениям в относительных единицах и в домен Лапласа. Для этого запишем систему обозначений безразмерных величин:

(2.123)

где - относительное напряжения статора эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - приведенный ток обмотки q эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - приведенный ток обмотки d эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - безразмерное время; - электромагнитный коэффициент; - электромагнитная постоянная времени электродвигателя; - эквивалентная частота; - механический коэффициент; - механическая постоянная времени электродвигателя; - относительный электромагнитный момент эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - относительный момент сопротивления на валу эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq; - приведенный момент.

7) Преобразуем систему (2.122), согласно (2.123), и получим выражения, которые будут описывать ВД для безразмерных величин домена Лапласа во вращающейся СК d-q, на основе синхронного с возбуждением от постоянных магнитов

Страницы: [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [Все](#)