

621.313

А39

К. П. АКИНИН

СТРУКТУРНАЯ МИНИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

$$L \frac{di_d}{dt} = -R i_d + p L \omega i_q + u_d$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -R i_q - p L \omega i_d - k_m \omega + u_q$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$M = 0.5 m_f k_m i_q$$

**Национальная академия наук Украины
Институт электродинамики**

К. П. Акинин

**СТРУКТУРНАЯ МИНИМИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

**Киев
2020**

УДК 621.313
УДК 62Ф83
А 72

Утверждено к печати
Ученым советом Института электродинамики НАН Украины
(Протокол № 1 от 30.01.2020 года)

Рецензенты:

Островецков Н. Я. доктор технических наук, профессор
Денисов Ю. А. доктор технических наук, профессор

Акинин К. П. Структурная минимизация электроприводов малой мощности на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами – К.: "Про Формат", 2020. – 392 с.

Монография посвящена вопросам построения электроприводов малой мощности на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами. Изложены принципы построения и предложены структуры электроприводов с минимизированным набором функциональных элементов. Исследованы процессы формирования токов статора и моментных характеристик, способы формирования сигналов датчиков и регулирования механических координат двигателя при условии принятых структурных ограничений. Приведены примеры структур электроприводов для достижения новых функциональных возможностей электромеханических приборов.

Для специалистов в области электромеханики, преподавателей высших учебных заведений, аспирантов и студентов электротехнических специальностей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	14
Глава 1	
ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СТРУКТУРНОЙ МИНИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ (ЭП) МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (БДПМ)	19
1.1. Тенденции развития ЭП на основе БДПМ.....	19
1.2. Структуры ЭП на основе БДПМ.....	22
1.3. ЭП с позиции ограничений выбора измеряемых координат БДПМ.....	39
1.4. Условия и принципы построения ЭП малой мощности как основание рационального выбора структур.....	47
Выводы по главе 1.....	56
Глава 2	
БЕСКОНТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ СТАТОРНЫХ ТОКОВ И МОМЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	58
2.1. Свойства, параметры и математические модели БДПМ.....	58

Оглавление

2.2. Критерии качества формирования статорных токов и моментных характеристик БДПМ.....	65
2.3. Функциональные зависимости для приближенного полеориентированного управления БДПМ.....	72
2.4. Формирование моментных характеристик в синхронном режиме работы для пуска двигателя в дискретном бездатчиковом ЭП.....	79
Выводы по главе 2.....	82

Глава 3

ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОВ СТАТОРА БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....

84

3.1. Особенности преобразования энергии в БДПМ. Структуры силовых полупроводниковых преобразователей.....	84
3.2. Исследования режима работы инвертора напряжения при условии проводимости ключей на интервалах 120 электрических градусов.....	88
3.3. Исследования режима работы инвертора напряжения с векторной ШИМ.....	95
3.4. Релейно-векторное управление статорными токами БДПМ с датчиком в звене постоянного тока.....	100
Выводы по главе 3.....	107

Глава 4

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КООРДИНАТ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....

109

4.1. Формирование и преобразование дискретных сигналов угловой скорости ротора БДПМ.....	109
--	-----

4.2. Формирование сигналов механических координат на основании непрерывных периодических функций угла поворота вала БДПМ.....	116
4.2.1. Формирование сигналов углового положения ротора.....	116
4.2.2. Формирование сигналов угловой скорости ротора.....	128
4.3. Формирование сигнала угловой скорости в виде последовательности импульсов.....	132
4.4. Формирование сигналов угловой скорости с учетом дискретных свойств преобразователей сигналов.....	139
4.4.1. Цифровое формирование сигналов угловой скорости в виде последовательности импульсов.....	142
4.4.2. Формирование сигналов угловой скорости путем цифрового дифференцирования исходных периодических сигналов.....	146
4.5. Управление напряжением питания системы датчиков Холла.....	151
Выводы по главе 4.....	164

Глава 5

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	166
5.1. Особенности реализации полеориентированного управления БДПМ.....	166
5.2. Исследование влияния дискретных свойств сигнала угловой скорости вращения ротора БДПМ на разработку систем автоматического регулирования (САР).....	173

5.2.1. Импульсные САР угловой скорости вращения ротора.....	174
5.2.2. Дискретные САР угловой скорости вращения ротора.....	189
5.2.3. Сравнение импульсных и дискретных САР угловой скорости вращения ротора.....	200
5.3. Формирование модулирующих функций на основании дискретных сигналов датчика положения ротора.....	206
5.4. Исследование режима ограничения момента БДПМ без датчиков тока.....	213
5.5. Исследование режима насыщения в цифровом аналоге ПИ-регулятора.....	219
Выводы по главе 5.....	221

Глава 6

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА ПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ.....	223
6.1. Построение дискретных бездатчиковых ЭП на основе БДПМ.....	226
6.1.1. Общие замечания к вопросу построения бездатчиковых ЭП.....	226
6.1.2. Формирование дискретных сигналов положения ротора БДПМ в бездатчиковой системе.....	232
6.1.3. Формирование квазисинусоидальных токов статора БДПМ при условии одновременного подключения не более двух фаз статорной обмотки к источнику питания.....	242
6.1.4. Условия построения дискретных бездатчиковых ЭП на основе БДПМ.....	247

6.2. Структура ЭП на основе БДПМ как усовершенствованный аналог коллекторного двигателя постоянного тока.....	249
6.3. Система передачи команд управления по силовым проводникам статорных обмоток исполнительных БДПМ.....	256
6.4. Последовательный интерфейс для передачи данных по силовым проводникам статорных обмоток БДПМ.....	266
Выводы по главе 6.....	273

Глава 7

СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ.....	275
7.1. Особенности реализации тормозных режимов БДПМ малой мощности.....	275
7.1.1. Бездатчиковое торможение БДПМ с управляемым балластом в цепи статорных обмоток.....	275
7.1.2. Безопасное торможение БДПМ без использования специальных тормозных устройств.....	282
7.2. Оптимизация структуры ЭП реактивного маховика на основе БДПМ для пространственной ориентации нано с путни ка....	293
7.3. Разработка и исследование ЭП космического базирования с активной компенсацией реактивного момента исполнительного двигателя.....	299
7.4. Методы и структуры для экспериментальных исследований ЭП малой мощности.....	316
7.4.1. Структуры испытательных стендов малой мощности.....	316

Оглавление

7.4.2. Методы оценки момента бесконтактного генератора с постоянными магнитами.....	328
7.4.3. Экспериментальное исследование структуры потерь в высокоскоростном беспазовом БДПМ.....	333
Выводы по главе 7.....	341
Глава 8	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	343
8.1. Обобщение подходов к разработке структур ЭП малой мощности на основе БДПМ.....	343
8.2. Рациональные области использования и примеры практической реализации ЭП малой мощности на основе БДПМ.....	354
Выводы по главе 8.....	370
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	372