

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электромашиностроительные заводы выпускают асинхронные двигатели, которые рассчитаны на работу от промышленной сети, т.е. с неизменной частотой и напряжением на статоре.

Между тем применение вентильных преобразователей частоты, с одной стороны, открывает перед электроприводом новые возможности, а с другой, импульсный характер работы современных вентильных преобразователей создает ряд проблем.

Более того, получены реальные результаты, о чем говорит продукция некоторых отечественных предприятий. В данной работе на примере общепромышленных электроприводов обращается внимание на те преимущества, которые дает применение асинхронных двигателей, рассчитанных и изготовленных для работы в системе частотного регулирования.

Сегодня реальным процессам, происходящим в системе двигатель-преобразователь, разработчики не уделяют должного внимания. Обычно они берут серийный двигатель общепромышленного применения и подключают его к преобразователю частоты, совершенно не заботясь о совершенстве технических параметров, оптимальности и стоимости получаемой системы электропривода, а вопросы срока службы и надежности вообще остаются без внимания.

Если же рассматривать весь диапазон регулирования, то необходимо учитывать особенности взаимодействия двигателя с преобразователем, что усложняет задачу разработки и эксплуатации электропривода.

Теория частотного управления электрических машин получила свое дальнейшее развитие в работах А.А. Булгакова, в которых были исследованы статические характеристики АД при переменной частоте, а также рассмотрены особенности работы АД в системах разомкнутого и замкнутого регулирования.

Большой вклад в развитие теории частотного управления внесли А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов, И.И. Эпштейн, рассмотревшие как статические, так и динамические режимы работы АД при питании от преобразователей частоты (ПЧ).

Основы методики построения математических моделей электрических машин были разработаны А. Блонделем, А. М. Горевым, Д. Парком, Г. Кроном и др. Дальнейшее развитие теория математического моделирования получила в работах Я. Б. Данилевича, В.В. Домбровского, А.В. Иванова-Смоленского, которыми были разработаны методы моделирования электрических машин средней и большой мощности. В работах Копылова И.П. подробно разработана теория обобщенной электрической машины, позволяющая распространить методику математического моделирования практически на все типы электромеханических преобразователей.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является – разработка частотно-регулируемых асинхронных двигателей на основе теоретических исследований стационарных и динамических электромагнитных и тепловых процессов, а также компьютерных программных средств, реализующих эти исследования и позволяющих получить не только геометрические параметры и выходные характеристики, но и варьировать полученные результаты для получения оптимальных энергетических показателей.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

- разработка математической модели частотно-регулируемого асинхронного двигателя в фазной системе координат при питании от инвертора напряжения, функционально связывающей параметры регулируемых АД с их характеристиками;
- создание компьютерной модели в среде МАТЛАБ, включая разработку принципов задания параметров, законов изменения и взаимосвязи основных компонент модели, для исследования влияния изменения основных параметров на выходные характеристики;
- разработка методики определения электрических и тепловых параметров АД при частотном управлении.
- разработка метода эквивалентных тепловых схем для расчета тепловых процессов частотно-регулируемых АД и проведение теоретических исследований процессов нагрева на основе этого метода.
- разработка методики проектирования частотно-регулируемого АД, которая позволяет определить главные размеры и основные характеристики для заданного закона управления.

Методы исследования. В работе использованы аналитические, численные и численно-аналитические методы исследования. Исследования базировались на теории дифференциальных уравнений, на компьютерных методах моделирования в среде программирования МАТЛАБ. Для анализа тепловых режимов работы АД использована теория нагрева и теория линейных электрических цепей. В качестве математического аппарата используется

аппарат матричной алгебры, ориентированный к применению на современных компьютерах. Реализация алгоритмов компьютерной программы выполнена в среде MATLAB v. 7.0 и MathCAD v. 11.

Научная новизна работы заключается в следующем

- проведено комплексное исследование асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в системе со статическим преобразователем частоты.
- предложена математическая модель частотно-регулируемого двигателя, учитывающая эффект вытеснения тока в проводниках обмотки ротора, насыщение магнитопровода и закон управления преобразователем;
- разработан комплекс программ для расчета нестационарных тепловых процессов в частотно-регулируемом двигателе.
- разработана программа проектирования АД, которая позволяет оценить массогабаритные и энергетические показатели и выдать рекомендации по их улучшению.
- исследовано влияние геометрических размеров пазовой зоны, длины статора и числа витков обмотки ротора на величину энергетических показателей.

Достоверность результатов работы. При решении системы дифференциальных уравнений, описывающих работу системы АД-ПЧ, используется метод Рунге-Кутты в модификации Гира. Расчет тепловых нестационарных режимов АД проведен с использованием эквивалентных тепловых схем замещения. Достоверность теоретических исследований частотно-регулируемых АД с помощью имитационных математических моделей подтверждается сравнением с результатами известными из литературы.

Практическая ценность:

- разработанные методики и программы расчета, статических и переходных режимов работы позволяют детально исследовать влияние параметров и входного напряжения на энергетические показатели АД при питании от преобразователя частоты, а также повысить точность и достоверность получаемых результатов;
- зависимости превышения температуры от частоты питания при постоянном моменте позволяют определить диапазон регулирования АД;
- На основании проведенных оптимизационных расчетов, даны рекомендации по выбору конструкции АД с короткозамкнутым ротором, работающих совместно со статическими преобразователями.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы будут реализованы в Союзе Мьянма при разработке оптимальных частотно-регулируемых электроприводов, используемых в технологическом оборудовании сельского хозяйства. Методики расчета тепловых процессов и проектирования частотно-регулируемых АД используются при разработке, изучении и исследовании регулируемых двигателей на кафедре «Электромеханика» МЭИ (ТУ).

Апробация работы. Основные научные и технические результаты были представлены на: XI-ой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Крым, Алушта. 2006 г); XII-ой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Крым, Алушта. 2008 г). XIV-ая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 28-29 февраля 2008 г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано (7) печатных работ.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и (1) приложений. Полный объем работы составляет (152) страницы текста, иллюстрированного рисунками и таблицами на (89) страницах. Список использованной литературы включает (67) наименования.

На защиту выносятся:

- комплекс программ математического моделирования АД-ПЧ с учетом непостоянства параметров при питании от инвертора;

- комплекс программ для расчета стационарных и нестационарных тепловых процессов в АД, позволяющих получить с помощью простых тепловых моделей электродвигателей параметры и характеристики теплового процесса с достаточной точностью.

- методика проектирования частотно-регулируемого АД с короткозамкнутым ротором с учетом диапазонов регулирования, а также закона управления преобразователем частоты.

- метод предварительного поиска оптимальных значений параметров пазовой зоны ротора, длины и числа витков обмотки статора АД, результаты которого представлены в виде графических зависимостей.

В главе 1 представлены основные принципы построения систем частотно-регулируемого электропривода, а также кратко изложены основы теории работы преобразователя частоты в регулируемом электроприводе.

При описании динамических режимов АД в качестве переменных используют результирующие (изображающие) вектора напряжений, токов,

потокосцеплений. Для этой цели обычно используются инверторы с ШИМ. Анализ приведенных зависимостей показывает, что улучшение формы тока при использовании ШИМ происходит за счет ослабления высших гармоник напряжения в низкочастотной части спектра. Число ослабленных гармоник определяется несущей частотой ШИМ.

Однако повышение частоты коммутаций силовых элементов ведет к увеличению динамических потерь в АИН. Поэтому оптимальной является частота ШИМ, при которой обеспечиваются минимальные суммарные потери в системе инвертор-двигатель.

Вторая глава посвящена сравнительному анализу существующих различных математических моделей и разработке новой математической моделей частотно-регулируемого двигателя в осях $(a, b, c, (\alpha\beta))$ с учетом потерь в стали, вытеснения тока в проводниках ротора и насыщения магнитной цепи.

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение частотно-регулируемого двигателя, включает в себя уравнения напряжений обмоток, уравнения движения. При составлении уравнений равновесия использовалась естественная (фазовая) система координат осей a, b, c – оси фаз статора и α, β - оси эквивалентных обмоток ротора. При этом предполагается, что обмотки фаз ротора приведены к обмотке фазы a статора, что позволяет использовать одну и ту же систему относительных единиц для роторных и статорных величин.

В третьей главе рассматриваются методы теплового расчета АД. Разработана упрощенная математическая модель нагрева частотно-регулируемых асинхронных двигателей. Приведены аналитические выражения для экспоненциальных кривых нагрева элементов тепловой схемы замещения. Представлены результаты расчета коэффициентов греющих потерь для

установившегося режима, а также коэффициентов при экспонентах и постоянных времени нагрева лобовой части обмотки для двух частот 20 и 50 Гц. Согласно простому эмпирическому правилу увеличение рабочей температуры на $10-12^{\circ}\text{C}$ уменьшает срок службы изоляции, а, следовательно и двигателя, вдвое. Таким образом, вопросы расчета нагрева электродвигателя, в частности температуры статорных обмоток становятся первостепенным при оценке возможности использования асинхронных двигателей (АД) в частотно-регулируемом электроприводе. Нагрев частотно - регулируемых электродвигателей происходит по более сложным законам, нежели двигателей, работающих при постоянных параметрах питания: напряжении и частоте. Это обусловлено следующими факторами:

1. Потери в отдельных частях двигателя зависят не только от нагрузки на валу, но и от изменяющихся параметров питания;
2. Конвективные сопротивления, обдуваемых поверхностей электродвигателя изменяются с изменением частоты вращения ротора, причем по различным законам;
3. Из-за изменения величины потерь, а также сопротивлений передачи тепла от одного тела к другому изменяется и влияние отдельных составляющих потерь на нагрев обмотки статора.

Таким образом, разработанная тепловая модель нестационарного нагрева, давая достаточно подробную информацию о тепловых процессах в АД, может быть использована как для оценки нагрева обмотки в различных режимах работы, так и для проектирования тепловой защиты.

В четвертой главе рассматриваются особенности проектирования асинхронных двигателей с частотным регулированием. Применение традиционных методик для проектирования частотно-регулируемого АД без

учета его специфических особенностей и соответствующей корректировки расчетных соотношений неправомерно. Специфика проектирования АД-ПЧ во многом определяется законом регулирования электропривода, также выбранным диапазоном регулирования АД.

Техническими предпосылками, обеспечивающими преимущества регулируемых двигателей над серийными асинхронными машинами являются:

- отсутствие требований к пусковым характеристикам, так как не ставится задача обеспечения кратностей пускового и максимального моментов. Поэтому может быть выбрана соответствующая форма паза ротора, чтобы обеспечить минимальное активное сопротивление ротора и меньшую индуктивность рассеяния.

- выбор оптимального, отличного от базового соотношения нестандартных значений напряжения и частоты проектируемого двигателя, согласованных с номинальными значениями преобразователя.

- необходимая частота вращения производственного механизма, обусловленная частотой питания двигателя, числом полюсов обмотки статора АД может быть обеспечена различным сочетанием этих двух величин.

- особенности работы на низких частотах вызывает появление дополнительных требований к его параметрам и к значению потерь в обмотках статора и ротора.

Применение частотно-регулируемых двигателей, спроектированных с учетом специфики их работы в условиях регулируемого электропривода вместо серийных асинхронных двигателей дает возможность значительно снизить массу, габариты и стоимость электропривода, а также улучшить их энергетические показатели.

Рассмотренные выше особенности асинхронных двигателей, определяемые специфическими требованиями, которые к ним предъявляются в регулируемом электроприводе, показывают высокую техническую и экономическую эффективность электродвигателей переменного тока, специально спроектированных и изготовленных для работы от вентильных преобразователей частоты.

В заключении приводятся выводы, сделанные по результатам работы.

В списке литературы приведены использованные в процессе работы источники.