

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

На правах рукописи

ИСАКОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ
ТОКОМ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ**

(Основы теории, исследование и разработка)

**Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы, включая их управление
и регулирование**

**ДИССЕРТАЦИЯ
в форме научного доклада на
соискание ученой степени
доктора технических наук**

Киев 1993

Работа выполнена в Институте электродинамики АН Украины

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент АН Украины
Г.Г.Пивняк
— доктор технических наук, профессор
Д.М.Красношапка
— доктор технических наук
В.А.Лесник

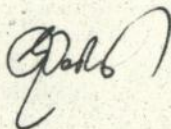
Ведущая организация — НПО "Киевский институт автоматики"

Защита состоится "23" марта 1993 г.
в 14 часов 00 мин. на заседании специализированного
ученого совета Д 016.30.03 при Институте электродинамики АН Украины,
по адресу: 252680, г.Киев-57, пр. Победы, 56, ИЭД АН Украины

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Научный доклад разослан "2" февраля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета

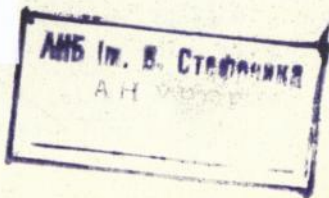


В.С.Федий

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00825613 (P)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время электропривод является основным источником механической энергии в абсолютном большинстве установок. Особенность развития современного электропривода состоит в том, что требование повышения эффективности, улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик и массогабаритных показателей вступает в противоречие с необходимостью новых, часто сложных, законов управления и регулирования, диктуемых требованиями технологических процессов. Последнее, как правило, приводит к усложнению систем электроприводов за счет увеличения числа элементов и сложности схем управления и регулирования, и как следствие, к снижению эксплуатационной надежности и увеличению затрат на наладку, обслуживание и ремонт. Одним из путей преодоления этого противоречия является применение нетрадиционных для электропривода источников питания.

Доминирующей концепцией на протяжении всей истории развития электропривода являлось использование в силовой цепи двигателя (якоря, статора) источника напряжения, регулированием которого теми или иными средствами обеспечивается формирование механических характеристик двигателя и управление его координатами. Этот подход представляется вполне естественным по крайней мере по двум причинам. Во-первых, практически все промышленные источники электропитания — это источники напряжения, и задача состоит лишь в том, чтобы сделать их регулируемыми (по уровню напряжения и (или) по его частоте, фазе) в соответствии с требуемым для конкретного привода законом. Во-вторых, при питании от источника напряжения двигателя как постоянного, так и переменного тока обладают важным свойством саморегулирования электромагнитного момента благодаря внутренней обратной связи по эдс якоря (ротора): при набросе нагрузки двигатель притормаживается, эдс уменьшается, а ток якоря (ротора) увеличивается, приводя в итоге к выравниванию моментов двигателя и нагрузки.

Это свойство, ценное для одних случаев, для других, когда управляемой и контролируемой координатой является момент, а не скорость, выглядит не достоинством, а недостатком, который преодолевается различными техническими ухищрениями. Если же якорная цепь двигателя постоянного тока получает питание от источника тока, а не от источника напряжения, то это равносильно разрыву внутренней отрицательной обратной связи по эдс якоря, что позволяет управлять электромагнитным моментом двигателя вне связи с его скоростью. Заменяя же внутреннюю обратную связь различными внешними, можно формировать любые механические характеристики привода. Главное достоинство такого подхода — возможность создания нерегулируемого силового энергетического канала привода, а поэтому более простого, дешевого, надежного и экономичного.

Такой подход, предложенный в конце 60-х годов почти одновременно сотрудниками Института электродинамики (ИЭД) АН Украины (г.Киев) и Московского энергетического института (МЭИ), породил цикл теоретических и экспериментальных исследований, а затем и разнообразных практических применений нового привода, доказавших его конкурентоспособность и перспективность. Этому способствовали с одной стороны использование в качестве источников стабилизированного тока так называемых индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП), многочисленные варианты которых предложены и всесторонне исследованы в ИЭД АН Украины с участием автора данной работы, а с другой – разработка профессором Н.Ф.Ильинским теории управляемого "источника момента" и выполненные в МЭИ под его руководством обширные исследования электроприводов постоянного тока по системе "источник тока – двигатель". Эта эстафета в дальнейшем была подхвачена рядом организаций Украины и других республик.

Однако реализовать управляемый источник момента в электроприводах на базе машин переменного тока долгое время не удавалось, пока в ИЭД АН Украины с участием автора не было предложено с помощью источника тока стабилизировать ток ротора в двигателе с фазным ротором. Такое решение вызвало к жизни новую волну исследований и изобретений, побуждаемых естественным стремлением к замене двигателей постоянного тока более надежными и дешевыми двигателями переменного тока именно в тех сферах, в которых суровым условиям эксплуатации должны быть адекватны характеристики систем питания – токи стабилизированы, а моменты не превышают наперед заданных величин. Это, в свою очередь, позволило диссертанту систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований электроприводов переменного тока со стабилизированным током в силовых цепях – обмотках асинхронных двигателей. Разработка этого нового направления дала возможность диссертанту сформулировать условия, при которых асинхронный двигатель будет работать в режиме источника момента, и предложить варианты систем автоматического регулирования координатами этих двигателей – скоростью, моментом и мощностью, проанализировать электромагнитные и электромеханические процессы в новых приводах, предложить целый ряд новых схем силовых цепей и цепей управления. Все эти исследования были направлены на решение проблемы повышения эффективности преобразования электрической энергии в механическую.

Проблемная ориентация исследований по диссертационной работе определялась планами основных работ Института электродинамики АН Украины 1976-1992 гг., планами научных исследований по следующим госбюджетным темам: "Резонанс" – "Разработать принципы построения и создать многофункциональные системы электропитания для новых электротехнологических процессов и установок" (Постановление Президиума АН Украины № 530 от 11.11.81 г.); "Резонанс-2" – "Исследовать гибридные токовые системы, состоящие из полупроводниковых и параметрических электромагнитных преобразователей и разработать на их основе источники электропитания промышленных технологических установок" (Постановление Президиума АН Украины

№ 474 от 27.12.1985 г.); "Момент-П" – "Разработать математические модели, принципы управления асинхронной машиной и силовые структуры новых типов электроприводов с управляемым моментом, создать программно-алгоритмические средства моделирования и исследования преобразователей для таких систем" (Решение Ученого Совета ИЭД АН Украины от 27.12.1990 г., Протокол № 17).

Об актуальности и важности этих исследований для развития народного хозяйства Украины свидетельствует то, что они проводились также и в рамках "Комплексного плана совместных научно-технических и социально-экономических работ учреждений Академии наук Украины с предприятиями Южного экономического района Украины на 1986-1990 гг." по разделу "Исследование и разработка различных схем и систем управления электроприводами для палубных механизмов и технологических целей на судах" и "Национальной программы производства на предприятиях Украины технологических комплексов, машин и оборудования для сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности и промышленности строительных материалов" по разделу "Приборы, системы контроля и управления технологическими процессами".

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в разработке теоретических основ, исследовании и создании простых и надежных систем, способов их управления и регулирования, обеспечивающих эффективное преобразование электрической энергии в механическую на базе нового класса электроприводов переменного тока со стабилизированным током в силовых цепях.

При этом ставились и решались следующие научные задачи: теоретическое обоснование концепции питания силовых цепей электроприводов переменного тока стабилизированным током; разработка силовых структур и схем управления электромеханических систем, созданных на базе нового класса электроприводов; разработка вариантов систем автоматического управления и регулирования координатами этих электроприводов – скорости и момента; исследование электромагнитных и электромеханических процессов в новых электроприводах; разработка математических моделей основных структур новых электроприводов переменного тока; проведение сопоставительного анализа схем индуктивно-емкостных преобразователей – основного узла нерегулируемого силового блока новых электроприводов; определение областей рационального применения разработанных электроприводов; разработка методик расчета основных узлов новых электроприводов; внедрение разработанных электромеханических систем в промышленность.

Автор защищает:

1 Концепцию питания силовых цепей электроприводов переменного тока стабилизированным током.

2. Математические модели основных структур электроприводов переменного тока с источниками тока в силовых цепях и программы расчета переходных процессов в этих электроприводах.

3. Способы управления координатами предложенных электроприводов — скоростью и моментом.

4. Силовые структуры и схемы управления электромеханических систем, разработанных на базе нового класса электроприводов.

5. Результаты сопоставительного анализа схем индуктивно-емкостных преобразователей, используемых для стабилизации тока в силовых цепях этого класса электроприводов.

6. Методики расчета электроприводов со стабилизированным током в силовых цепях и рекомендации по их практическому применению в различных отраслях народного хозяйства.

7. Результаты внедрения предложенных и разработанных электромеханических систем на базе нового класса электроприводов в промышленности и сельском хозяйстве.

Методы исследования. Решение рассмотренных в диссертации задач анализа силовых цепей и синтеза цепей управления базируется на использовании основ теории электропривода и электрических машин, методов анализа электрических цепей, методов математического моделирования переходных процессов в электромеханических системах в сочетании с соответствующими разделами теории обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференциальных преобразований и теории автоматического управления.

Экспериментальные исследования по проверке теоретических положений выполнены на физических моделях в лабораторных условиях, на экспериментальных образцах электроприводов в промышленных условиях и в процессе эксплуатации серийных образцов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выполнен обобщенный анализ режимов работы электроприводов в механизмах и технологических системах, требующих стабилизации либо ограничения момента или усилия в рабочем органе.

2. Сформулирована концепция питания силовых цепей электроприводов переменного тока стабилизированным током, позволившая предложить новое научное направление в решении проблемы повышения эффективности преобразования электрической энергии в механическую.

3. В развитие этого направления автором разработаны научные основы, силовые структуры и схемы управления электромеханических систем на базе нового класса электроприводов переменного тока с источниками тока.

4. Впервые предложены новые способы управления координатами электроприводов переменного тока, силовые цепи которых питаются стабилизированным током.

5. Созданы математические модели предложенных электроприводов и программы расчета переходных электромеханических процессов в этих электроприводах.

6. Исследовано влияние динамических свойств источников стабилизированного тока на базе индуктивно-емкостных преобразователей на работу электроприводов со стабилизированным током в силовых цепях и сформулированы критерии выбора оптимальной схемы источника тока, исходя из конкретных технических требований к электроприводу.

Практическая ценность работы заключается:

1. В использовании научных положений, обоснованных в диссертации, для разработки новых схем электроприводов с источниками тока в силовых цепях и создание на их основе простых и надежных электромеханических систем различного технологического применения.

2. В возможности для разработчиков проводить сравнительную оценку различных вариантов схемных решений электроприводов с помощью полученных зависимостей, программ и методик расчета.

3. Применение полученных в работе математических моделей для расчета и исследования переходных процессов с целью синтеза необходимых параметров систем автоматического управления электромеханических систем на основе нового класса электроприводов.

4. В определении областей рационального использования предложенных в диссертационной работе схемотехнических решений как силовой части электроприводов, так и их систем управления.

Реализация результатов работы. Теоретические положения, выводы и практические рекомендации, предложенные в диссертации, явились научной основой при разработке, создании и внедрении ряда электромеханических систем и автоматизированных электроприводов в различных отраслях народного хозяйства.

При участии автора был освоен серийный выпуск пяти разработок, среди которых электропривод палубной лебедки, устройство пуска асинхронного двигателя с фазным ротором, системы натяжения в оборудовании по производству полимеров, электроприводы дозаторов и медико-биологических приборов. Кроме того, были разработаны и внедрены электроприводы нагрузочных устройств и транспортных механизмов, система натяжения линии отжига цветных металлов, комплект из 12-ти электроприводов для комбикормового завода, электропривод буровой установки, система подъема и поворота кинооператорского крана.

В настоящее время в рамках "Национальной программы производства на предприятиях Украины технологических комплексов, машин и оборудования для сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности и промышленности строительных материалов" ведется разработка серии электроприводов с последующим их серийным выпуском на заводе "Автоштамп" (г. Александрия).

Кроме того результаты исследований диссертации используются в учебном процессе при изучении курса "Теория электрического привода" в Донбасском горно-металлургическом институте (г. Алчевск) и на кафедре целевой подготовки студентов "Электроэнергетика и электротехника" при ИЭД АН Украины в курсе "Специальные вопросы автоматизированного электропривода".

Документально подтвержденный экономический эффект от внедрения результатов работы в народное хозяйство составляет 8,25 млн.руб., в том числе, приходящийся на долю автора – 3,23 млн.руб. (по состоянию на январь 1991 г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и одобрены в течение 1976-1992 гг. на двух международных конференциях, 9 всесоюзных конференциях, совещаниях, семинарах, 4 республиканских и региональных конференциях, ряде отраслевых совещаний.

Публикации. По результатам исследований соискателем лично и в соавторстве опубликованы: 2 монографии, 8 препринтов ИЭД АН Украины, 12 статей, 13 докладов, получено 22 авторских свидетельств на изобретения, а также написано при участии автора 4 отчета по темам НИР.

Автор выражает искреннюю признательность ученым и специалистам Института электродинамики АН Украины, коллегам НИИ, ВУЗов, заводов и КБ, совместная работа и творческие дискуссии с которыми способствовали решению поставленных задач.

Структура диссертационной работы. Работа представлена в форме научного доклада и состоит из шести разделов, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Электромагнитные и электромеханические процессы в асинхронных двигателях с источниками тока в силовых цепях. Силовые структуры электроприводов по системе источник тока – асинхронный двигатель

Для исследования электромагнитных процессов в АМ, питаемой от системы неизменных токов $I=const$, целесообразно применять разветвленную Т-образную схему

замещения. Как показано в работе [17], она хорошо отображает реальные физические процессы, происходящие в машине, так как при отсутствии скола пазов намагничивающий ток предопределяет реальный магнитный поток. К тому же при питании АМ от системы неизменных токов параметры намагничивающей цепи и ток намагничивания $\dot{I}_M$ изменяются при изменении скольжения s машины. При питании от системы неизменных напряжений эти параметры практически не изменяются во всех режимах работы асинхронной машины, т.е. не зависят от скольжения.

Схема замещения асинхронной машины, питаемой от источника неизменного тока, представлена на рис.1, где I — источник тока; r_1 и $x_{\sigma 1}$ — активное сопротивление и сопротивление рассеяния обмотки статора; r_m и x_m — активное и индуктивное сопротивления цепи намагничивания; $\dot{I}$ — ток источника тока; $\dot{I}_M$ — ток намагничивания; r'_2 и $x'_{\sigma 2}$ — приведенные активное сопротивление и сопротивление рассеяния обмотки ротора; s — скольжение.

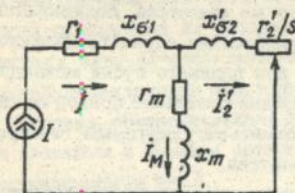


Рис. 1

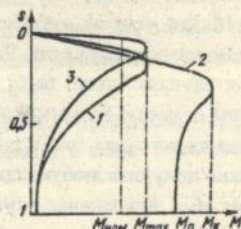


Рис. 2

Решение системы уравнений, описывающих схему рис.1, относительно токов $\dot{I}'_2$ и $\dot{I}_M$ приводит к следующим выражениям для определения действующего значения тока в обмотке ротора

$$|\dot{I}'_2| = I \sqrt{\frac{r_m^2 + x_m^2}{(r_m + r'_2/s)^2 + (x_m + x'_{\sigma 2})^2}} \quad (1)$$

и электромагнитного момента

$$M = \frac{p m_1 I^2 \frac{r'_2}{s} (r_m^2 + x_m^2)}{\omega_1 \left[(r_m + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_m + x'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad (2)$$

при питании АМ от системы неизменных токов.

Исследование выражения (2) на экстремум позволяет получить выражение для определения критического скольжения $s_{\max} = r'_2 / \sqrt{r_m^2 + (x_m + x'_{\sigma 2})^2}$, с помощью которого можно вывести формулу для максимального момента двигателя $M_{\max}$, соотношение

$M/M_{\max}$ и определить величину пускового момента двигателя M_{Π} . Анализ этих зависимостей показал, что $M_{\max}$ и M_{Π} квадратично зависят от тока I источника тока, а зависимость $M/M_{\max}$ — подобна известной формуле Клосса и позволяет построить механические характеристики АМ, питаемой от системы неизменных токов. Полученные формулы позволяют сравнивать механические характеристики АМ, питаемой от системы неизменного тока, с аналогичными характеристиками при питании АМ от источника напряжения. На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики двигателя с короткозамкнутым ротором типа АОЛГ-11-4 ($P_{\text{ном}} = 0,6$ кВт, $I_{\text{ном}} = 1,7$ А), питаемого от источника тока на базе ИЕП (кривая 1) и от источника напряжения (кривая 2), а также характеристика двигателя (кривая 3), рассчитанная по выведенным в работе формулам. Из анализа этих характеристик видно, что АМ, питаемая от источника тока, имеет очень малый пусковой момент. Это обусловлено тем, что в режиме КЗ, т.е. при $s=1$, напряжение на зажимах двигателя невелико и определяется лишь током источника тока и параметрами короткой цепи АМ. Эксперименты и расчеты показали, что M_{Π} двигателя, питаемого от источника тока, в 10–15 раз меньше пускового момента этого же двигателя, подключенного к системе неизменных напряжений. Однако это, на первый взгляд, отрицательное свойство в некоторых случаях может быть полезным. Так, для плавного пуска механизмов с вентиляторными нагрузочными характеристиками предпочтительнее привод по системе ИТ-АД. Если же источник тока в таком приводе выполнять регулируемым, то в процессе разгона можно получить любую плавность пуска двигателя.

Момент $M_{\max}$ однозначно определяется выходным током источника тока, поэтому, изменяя ток I , можно изменять момент опрокидывания, а значит, и защищать двигатель от перегрузки. Малый момент двигателя при $s=1$ предохраняет от перегрузки, кроме того, и рабочий механизм, следовательно, источник тока выполняет при этом двойную защитную функцию.

Сравнительный анализ так называемых рабочих характеристик асинхронного двигателя: скорости вращения n ; момента двигателя M ; коэффициента мощности $\cos \varphi$; η в зависимости от полезной мощности P_2 двигателя, питаемого от систем $I=\text{const}$ и $U=\text{const}$ показал [18], что скоростная характеристика $n = f(P_2)$ двигателя при питании от системы $I=\text{const}$ жестче, чем при питании от системы $U=\text{const}$, поэтому и моментная характеристика $M = f(P_2)$ лежит несколько выше. Эти различия объясняются тем, что двигатель переменного тока при питании от системы $I=\text{const}$ работает с постоянно изменяющимся состоянием магнитной системы машины. В режиме холостого хода ток источника тока практически весь является током намагничивания ($I_m = \dot{I}$) и магнитная цепь машины более насыщена. При увеличении нагрузки P_2 размагничивающее действие цепи ротора уменьшает степень насыщения машины. При больших значениях скольжения $s > s_{\text{ном}}$ вследствие размагничивающего действия тока ротора насыщение прекращается, а при $s=1$ напряжение на зажимах двигателя определяется лишь током источника тока и параметрами короткой цепи ротора. Это и обуславливает небольшой пусковой момент асинхронной машины, питаемой от системы неизменных токов.

Таким образом, питание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от системы $I=const$ не ухудшает его основных рабочих характеристик, а его механическая характеристика в зоне рабочих скольжений по жесткости близка к характеристике двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при питании статорных обмоток асинхронной машины неизменным по величине током нельзя получить механические характеристики вида $M=const$. Это обусловлено тем, что, несмотря на стабилизацию тока статора, при изменении скольжения меняются параметры роторной цепи машины и, следовательно, меняется ток ротора, активная составляющая которого и создает вращающий момент.

Согласно условиям, сформулированным в работах [10, 23], асинхронный двигатель будет работать в режиме источника момента, если, во-первых, во всем диапазоне скольжения на моментной части характеристики активная электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, будет оставаться неизменной; во-вторых, будет обеспечен вывод энергии скольжения из ротора во внешнюю цепь; в-третьих, механическую характеристику вида $M=const$ можно получить, стабилизировав действующее значение активной составляющей тока в роторной обмотке.

Условия, обеспечивающие двигателю свойства источника момента, для асинхронного двигателя с фазным ротором можно реализовать в схеме электропривода [44], представленной на рис.3.

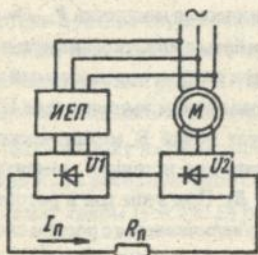


Рис. 3

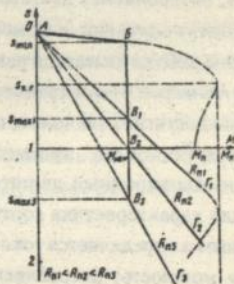


Рис. 4

Статор асинхронного двигателя М питается от сети переменного тока и к ней же подключен источник тока на базе ИЕП, который может быть выполнен по одной из схем, приведенных в работе [1]. Выход ИЕП подключен ко входу неуправляемого выпрямителя U1, собранного по трехфазной мостовой схеме. По такой же схеме собран и неуправляемый выпрямитель U2, вход которого подключен к кольцам фазного ротора асинхронного двигателя. Выпрямители U1 и U2 соединены последовательно и согласно, что обеспечивает протекание выпрямленного тока. Последовательно с выпрямителями включен согласующий элемент-резистор R_n с сопротивлением постоянной величины,

суммирующий и перераспределяющий потоки энергий, поступающие из ротора и с выхода источника тока. Он же обеспечивает эвакуацию из ротора энергии скольжения.

Такой электропривод позволяет получить в разомкнутой системе абсолютно мягкую механическую характеристику, которая представлена на рис.4. Она аналогична (участок $B B_3$) характеристике разомкнутой системы источник тока — двигатель постоянного тока, при этом (как и в последней) перевод двигателя в режим источника момента происходит из-за исключения влияния внутренней обратной связи по эдс ротора вследствие действия источника тока.

Рассмотрим работу асинхронного двигателя, считая, что электрические, магнитные и механические потери холостого хода равны нулю, нагрузка на валу отсутствует, ротор асинхронного двигателя вращается с синхронной скоростью, вентили в обоих выпрямителях идеальны.

В режиме $s=0$ (точка А на рис.4) ток ротора $I_2 = 0$, через резистор R_{Π} протекает выпрямленный неизменный ток I_{Π} , задаваемый ИЕП, все шесть вентилей неуправляемого выпрямителя $U2$ открыты и коммутационные процессы в них отсутствуют, что соответствует короткому замыканию ротора асинхронной машины. При этом мощность, потребляемая ИЕП от сети, полностью рассеивается на резисторе R_{Π} и без учета потерь в элементах схемы определяется только величиной этого резистора и током I_{Π} , т.е. $P_{ИЕП} = I_{\Pi}^2 R_{\Pi}$.

С увеличением момента нагрузки на валу асинхронного двигателя растет активная мощность, потребляемая двигателем от сети, $P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \phi_1$, растет ток ротора I_2 , а вместе с ним увеличиваются момент двигателя и механическая мощность $P_{мех} = \omega M$. При этом режим работы двигателя равнозначен режиму работы с короткозамкнутым ротором (участок АБ на рис.4) и сохраняется до тех пор, пока ток ротора, определяемый нагрузкой на валу, не достигнет значения, при котором в неуправляемом выпрямителе $U2$ начинаются коммутационные процессы, что соответствует точке Б механической характеристики. Асинхронный двигатель начинает работать как источник момента; его механическая характеристика соответствует участку $B B_3$. При этом ток в роторе остается неизменным и определяется током I_{Π} , а эдс ротора E_2 увеличивается с ростом скольжения. Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, остается неизменной на всем участке $B B_3$, т.е. при работе асинхронной машины в режиме источника момента $\cos \phi_1 = const$.

Во вращающемся роторе асинхронного двигателя наводится эдс $E_2 = E_{2\text{эф}} s$. В точке Б механической характеристики, соответствующей переходу на моментную часть, $E_2 = E_{2\text{эф}} s_{\min}$, где $s_{\min}$ — скольжение в точке Б. Действующее значение тока в роторной обмотке I_2 определяется также эдс роторной обмотки, активным сопротивлением фазы ротора r_2 и изменяющимся со скольжением индуктивным сопротивлением $x_{2s} = x_2 s$, где x_2 — индуктивное сопротивление фазы неподвижного ротора. По мере увеличения скольжения напряжение на выходе выпрямителя $U2$ увеличивается, а на выходе выпрямителя $U1$ уменьшается таким образом, что обеспечивается постоянство падения напряжения на

согласующем резисторе R_{Π} . Это исключает влияние эдс ротора на процессы в асинхронной машине и переводит ее в режим источника момента. Постоянство I_2 в этом режиме можно объяснить введением в цепь ротора вместо сопротивления r_2 некоторого сопротивления $R_{\text{экв}}$, изменяющегося пропорционально скольжению s . Согласно закону изменения E_2 от s получим

$$R_{\text{экв}} = r_2 s / s_{\min}.$$

Ток на участке БВ₃ определяется выражением $I_2 = E_{2\text{экв}} / \sqrt{(r_2 / s_{\min})^2 + x^2}$. На этом участке скольжение изменяется от $s_{\min}$ до $s_{\max}$, при этом в цепь ротора как бы вводится дополнительное сопротивление $R_{\text{доп}} = R_{\text{экв}} - r_2 = r_2 (s - s_{\min}) / s_{\min}$.

Значение $R_{\text{доп}}$ определяется сопротивлением резистора R_{Π} в цепи выпрямленного тока. Резистор R_{Π} обеспечивает совместную работу последовательно включенных источников тока и напряжения (эдс ротора).

В этом режиме с увеличением скольжения s энергия, рассеиваемая на резисторе R_{Π} , поступает по двум каналам: от роторной обмотки ($P_{\text{эл2}}$) и от ИЕП ($P_{\text{ИЕП}}$):

$$\begin{aligned} P_{\text{эл2}} &= P_{\text{эл}} s; \\ P_{\text{ИЕП}} &= P_{\text{эл}} (s_{\max} - s), \end{aligned} \quad (3)$$

где $s_{\max}$ — скольжение в точке В₁ (В₂, В₃) механической характеристики. Здесь следует различать потери в роторной цепи и в роторе самого двигателя. При таком режиме работы потери в самом двигателе остаются постоянными при изменении скольжения на всей моментной характеристике и равны потерям в точке Б.

Потери в роторе определяются током, задаваемым ИЕП, и если ток имеет номинальное значение, то электрические потери на всей моментной характеристике равны потерям номинального режима работы. Как следует из (3), мощность, поступающая из ротора, с увеличением скольжения увеличивается, а поступающая от ИЕП — уменьшается, но их сумма, рассеиваемая на резисторе R_{Π} , остается неизменной и равной $I_{\Pi}^2 R_{\Pi}$.

Ввод $R_{\text{экв}}$ в роторную цепь обеспечивает также на участке БВ₃ постоянство ψ_2 — угла сдвига между током I_2 и эдс E_2 ротора:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2 s}{R_{\text{экв}}} = \arctg \frac{x_2 s_{\min}}{r_2} = \text{const}.$$

Следовательно, на этом участке обеспечивается стабилизация действующего значения активной составляющей тока в роторной обмотке. Это, в свою очередь, приводит к изменению механической мощности по следующей зависимости: $P_{\text{мех}} = P_{\text{эл}} - P_{\text{эл2}} = P_{\text{эл}} (1 - s)$. Тогда, зная, что $P_{\text{мех}} = \omega M$, а $\omega = \omega_0 (1 - s)$, получим $M = P_{\text{эл}} / \omega_0 = \text{const}$, т.е. момент асинхронного двигателя при неизменном токе ротора равен моменту этого двигателя в точке Б ($s = s_{\min}$) механической характеристики и остается неизменным на всем участке БВ₃.

При достижении точки $B_1 (B_2, B_3)$ характеристики ($s = s_{\max}$) напряжение на выходе роторного выпрямителя достигает $E_{dp} = I_{\Pi} R_{\Pi}$. При этом напряжение на выходе выпрямителя ИЕП становится равным нулю, а коммутационные процессы в нем прекращаются, что соответствует короткому замыканию на выходе ИЕП. При дальнейшем увеличении нагрузки на валу источник тока не оказывает воздействия на процесс стабилизации тока в роторной цепи и на работу двигателя. Двигатель переходит в режим работы, соответствующий участку $B_1\Gamma_1 (B_2\Gamma_2, B_3\Gamma_3)$ механической характеристики. Участок $B_1\Gamma_1 (B_2\Gamma_2, B_3\Gamma_3)$ соответствует механической характеристике асинхронного двигателя с фазным ротором с включенным в цепь выпрямленного тока резистором.

Следует отметить, что скольжение в точке $B_1 (B_2, B_3)$ характеристики ($s = s_{\max}$) или диапазон скоростей, в котором момент двигателя остается неизменным, определяется соотношением падения напряжения на резисторе R_{Π} и выпрямленной эдс ротора при $s=I$, а следовательно, при заданном токе ИТ и эдс ротора сопротивлением резистора R_{Π} , т.е.

$$s_{\max} = \sqrt{3} I_{\Pi} R_{\Pi} / (k_u E_{2\kappa}) = \sqrt{3} I_{\phi, \text{ИТ}} k_i R_{\Pi} / (k_u E_{2\kappa}), \quad (4)$$

где $E_{2\kappa}$ — линейное напряжение на кольцах ротора при $s=I$; $I_{\phi, \text{ИТ}}$ — фазный ток на выходе источника тока; k_i — коэффициент преобразования по току выпрямителя, работающего от источника тока; k_u — коэффициент преобразования по напряжению выпрямителя, работающего от источника напряжения.

Аналогично работает схема рис.3 при переходе двигателя в генераторный режим, когда под действием каких-либо внешних сил двигатель вращается со скоростью выше синхронной.

На основании предложенной автором схемы замещения АД (однофазного эквивалента) [10], в которой учитываются как параметры асинхронной машины, так и процессы в выпрямленной цепи источника тока, получены выражения для определения величины тока во вторичной (роторной) цепи двигателя I'_2 , величины тока на выходе ИЕП и на их основе предложена формула для определения электромагнитного момента на валу двигателя в системе ИТ — АД:

$$M_{\text{эм}} = \frac{p m_1}{2 \pi f_1} U_1 I'_2 \left(\frac{r'_2 / s_{\min} + x'_2}{r_{\text{н}} + x_{\text{н}}} + 1 \right). \quad (5)$$

Таким образом, в исследуемой схеме при работе двигателя в режиме $M = \text{const}$, электромагнитный момент АД не зависит от скольжения s и пропорционален напряжению U_1 , приложенному к обмоткам статора, и стабилизированному току ротора I'_2 . Это дает основание для реализации двух вариантов воздействия при регулировании величины стабилизированного момента: либо со стороны статора, либо со стороны ротора. Оба этих варианта позволяют осуществлять регулирование момента в 1, 2 и 4 квадрантах.

С целью повышения энергетических характеристик за счет исключения сопрягающего резистора R_n предложены варианты рекуперации энергии роторной цепи в питающую сеть или преобразования ее в механическую энергию при сохранении основного свойства нового электроприбора.

Один из этих вариантов предполагает использование в цепи ротора инвертора, ведомого сетью. Схема такого решения приведена на рис.5, а подробно описана в работах [2,46].

Принципиальной особенностью работы такого инвертора UZ (рис.5) является постоянство угла управления вентилями, что дает возможность отказаться от традиционной системы импульсно-фазового управления и сводит техническую реализацию к задаче, по простоте адекватной реализации неуправляемого выпрямителя. Наиболее просто такой инвертор реализуется при применении оптронных тиристорных модулей.

Нейтрализация действия эдс ротора в электроприводе по системе ИТ – АД позволяет также исключить электромагнитное взаимовлияние электродвигателей в каскадных и многодвигательных схемах соединения и осуществить питание нескольких электродвигателей от одного источника тока. Анализ структур многодвигательных электроприводов по системе ИТ – АД [2,10] позволил сформулировать и предложить агрегатно-модульный принцип построения электромеханических преобразователей, заключающийся в том, что соединяя механически и электрически небольшое количество типоразмеров преобразовательных модулей (источников тока) и двигателей, можно реализовать системы электроприводов в широком диапазоне мощностей и моментов без дополнительных технических средств, например дифференциалов.

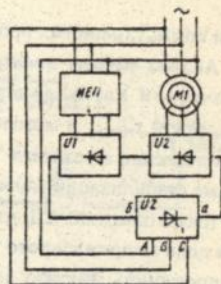


Рис. 5

2. Установившиеся и переходные процессы в неуправляемом электроприводе по системе ИТ – АД

Наличие роторного выпрямителя в силовом модуле электропривода по системе ИТ – АД (рис.3), ток нагрузки которого задан источником тока, обуславливает изменение величины и формы кривой тока в роторных обмотках в зависимости от скольжения и связанной с ним эдс ротора.

Механическая характеристика привода по системе ИТ – АД (рис.6) более полно учитывает процессы, происходящие в схеме привода, и отличается от приведенной на рис.4 механической характеристики тем, что дополнена участком ВС, который обусловлен особенно-

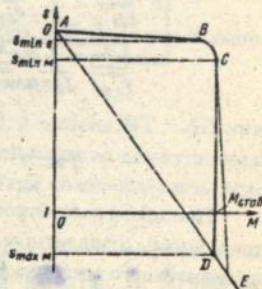


Рис. 6

стями коммутационных процессов в роторном выпрямителе.

Анализ работы электропривода (рис.3 и 5) показал [2,8], что на участках его статической характеристики (рис.6): естественном ($0 \leq s \leq s_{min.e}$), переходном ($s_{min.e} \leq s \leq s_{min.m}$) и моментном ($s_{min.m} \leq s \leq s_{max.m}$) – роторный выпрямитель работает соответственно в режимах "двойной коммутации" – "4", "3" и "2-3". Это означает, что в режиме стабилизации момента неизменный ток выпрямленной цепи привода I_d определяет токи в обмотках АД, что позволяет перевести рассмотрение установившихся процессов в цепь выпрямленного тока и описывать их в средних значениях переменных (токов и напряжений), как это делается при анализе схем в асинхронно-вентильном каскаде (АВК).

Математическое описание установившихся электромеханических процессов (для средних значений токов и напряжений) допускает представление схемы привода (рис.3) в виде двух узлов: ИЕП – U1 и АД – U2 с двумя контурами постоянного тока, сопряженными резистором R_n . Участкам АВ, ВС, CD и DE характеристики (рис.6) соответствуют схемы привода, изображенные на рис. 7 – 10.

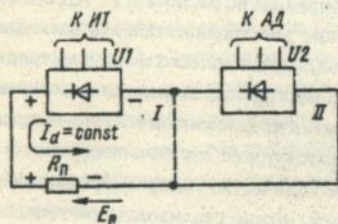


Рис. 7

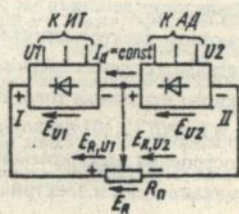


Рис. 8

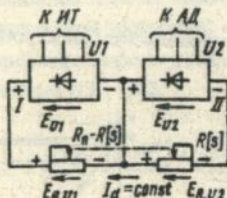


Рис. 9

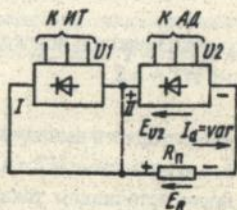


Рис. 10

При таком рассмотрении схемы привода ИТ – АД стабилизация среднего значения тока ротора, а значит и момента АД, объясняется эквивалентным "введением" в цепь выпрямленного тока, ротора изменяющегося со скольжением фиктивного сопротивления $R(s)$, как части R_L .

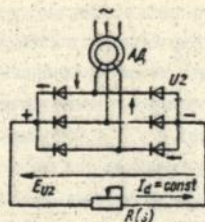


Рис. 11

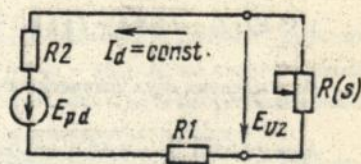


Рис. 12

На рис. 11 представлена схема узла АД - U2 - R(s) для третьей рабочей области (участок CD на рис.6), а на рис.12 - соответствующая ей схема замещения роторной цепи с учетом принятых допущений и факта одновременного прохождения тока по двум фазам двигателя.

На схеме рис.12 E_{pd} - гладкая составляющая выпрямленной эдс ротора; $R_1 = 2 r_p$; $E_{pd} = k_u E_p s$; $R_2 = 3 s x_p / \pi$.

Уравнение электрического равновесия для схемы рис.12 имеет вид

$$1,35 E_p = I_d \left[\frac{3}{\pi} \left(x_2 + \frac{x'_1}{\sigma} \right) + \frac{2 r'_1}{\sigma} + \frac{2 r_2 + R(s)}{s} \right]. \quad (6)$$

В точке С характеристики (рис.6) при скольжении $s = s_{min.m}$ ($R(s_{min.m}) = 0$) и уравнение равновесия принимает вид

$$1,35 E_p = I_d \left[\frac{3}{\pi} \left(x_2 + \frac{x'_1}{\sigma} \right) + \frac{2 r'_1}{\sigma} + \frac{2 r_2}{s_{min.m}} \right]. \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7): σ - коэффициент рассеивания статорной цепи, $\sigma = 1 + x_1/x_m = 1,04 \dots 1,08$; r'_1 , x'_1 - активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, приведенные к ротору.

Из уравнений (6) и (7) легко найти сопротивление $R(s)$, вводимое в цепь выпрямленного тока ротора: $R(s) = 2 r_2 \frac{s - s_{min}}{s_{min}}$, где $s_{min.m} \leq s \leq s_{max.m}$.

Стабилизированный момент асинхронного двигателя в системе ИТ - АД можно приближенно определить по формуле (5), не учитывающей влияния коммутационных процессов в роторном выпрямителе. Более точные результаты можно получить, исходя из следующих соображений.

Баланс активной мощности роторной цепи АД запишем в следующем виде $M \omega_0 s = I_d^2 [R_1 + R(s)]$.

Для определения правой части этого уравнения доложим левую и правую части уравнения (6) на I_d :

ДЛЯ И. В. СТАФЕЛЛИ

$$1,35 E_p s I_d - I_d^2 R_2 = I_d^2 [R_1 + R(s)].$$

Из последних двух уравнений имеем

$$M = (1,35 E_p I_d - 3 I_d^2 x_p / \pi) / \omega_0. \quad (8)$$

Таким образом, момент двигателя в диапазоне $s_{min.m} \leq s \leq s_{max.m}$ при $I_d = const$ не зависит от скольжения. Постоянство I_d в схеме замещения обеспечивается зависимостью фиктивного сопротивления $R(s)$ от скольжения S .

В реальной же схеме это постоянство обеспечивается источником тока ИТ, а резистор R_{II} (либо заменяющий его инвертор) обеспечивает совместную работу ИТ с выпрямителем $U1$ и источника эдс ротора с выпрямителем $U2$.

Исследование электропривода ИТ-АД как разомкнутой системы, с позиций теории автоматического регулирования электроприводами, приводит к следующей математической модели силового модуля для средних значений переменных, приведенных к цепи выпрямленного тока ротора I_d :

$$\begin{cases} M - M_c = J_\Sigma p; \\ M = \frac{1}{\omega_0} (1,35 E_p I_d - I_d^2 \frac{3}{\pi} x_p); \\ E_p = U_1 / k = const; \\ I_d = I_{HT} / k_{II} = const, \end{cases} \quad (9)$$

где J_Σ — суммарный момент инерции привода; M_c — статический момент нагрузки; k — коэффициент трансформации АД; k_{II} — коэффициент преобразования по току выпрямителя источника тока; I_{HT} — фазное (действующее) значение тока на выходе ИЕП; p — оператор дифференцирования.

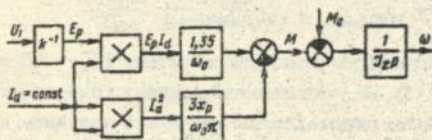


Рис. 13

Системе уравнений (9), записанной в операторной форме, соответствует структурная схема рис.13, в которой привод по системе ИТ-АД представлен интегрирующим звеном.

Из первого уравнения системы (9) следует, что при моменте нагрузки M_c , не зависящем от скорости ($M_c = const$), в установившемся режиме ($p=0$) скорость

привода не определена в диапазоне скольжения $s_{min.m} \dots 1$. В диапазоне скольжений $0 \dots s_{min.m}$ устойчивая работа привода возможна, если $M_c < M_{stab}$ при этом двигатель

работает в режиме естественной характеристики. В этом случае работа двигателя с фазным ротором подобна работе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а его момент определяется известной формулой Клосса.

Разгон привода до скорости, соответствующей скольжению $s_{min,м}$ (точка С на рис.6), происходит с постоянным ускорением $\epsilon = p \omega(p) = (M - M_c)/J_\Sigma$, т.е. скорость линейно нарастает во времени, $\omega = \epsilon t$. Дальнейший разгон от точки С до точки установившейся скорости происходит как обычно в двигателе с короткозамкнутым ротором.

Таким образом, электропривод ИТ-АД в диапазоне скольжений $s_{min,м} \dots 1$ представляет собой источник момента и имеет следующие основные свойства:

момент не зависит от скорости;

скорость привода — свободная координата, определяемая характером нагрузки; переходный процесс пуска привода с нагрузкой вида $M_c = const$ носит равноускоренный характер.

Одним из свойств электропривода ИТ-АД как источника момента является равноправность каналов управления (статорной и роторной цепей асинхронного двигателя), т.е. независимость протекания процессов в одном канале от их состояния в другом.

3. Анализ управляемых электроприводов по системе ИТ - АД

Свойства привода по системе ИТ-АД предопределяют неизменность тока ротора I_2 и его фазового угла ψ_2 в широком диапазоне изменения скольжений. Поэтому момент двигателя пропорционален основному магнитному потоку Φ :

$$M = c_m \Phi I_2 \cos \psi_2 = k_1 \Phi.$$

Для реализации управляемого по статору привода ИТ-АД со свойствами источника момента необходим, конечно, регулятор статорного напряжения, величина которого определяет и величину магнитного потока двигателя $\Phi = c_f^{-1} U_1$. В разомкнутой системе сигнал U_1 управления регулятором статорного напряжения является одновременно и сигналом задания момента $U_{2,м}$. Наиболее просто осуществить пропорциональную связь между управляющим сигналом регулятора и его выходной переменной $U_1 = k_p U_y$ (k_p — коэффициент усиления регулятора).

Реализация линейных функций $M = k_1 \Phi$; $U_1 = c_f \Phi$ и $U_1 = k_p U_y$ при $I_2 = const$ позволяет осуществить новый способ управления асинхронным двигателем [2,49], при котором асинхронный электропривод характеризуется как управляемый источник момента, т.е. становится возможным получить в плоскости M, s семейство вертикальных (моментных) механических характеристик АД.

Если же такую схему привода снабдить внешней отрицательной связью по скорости, то появляется возможность регулировать скорость вращения двигателя в широком диапа-

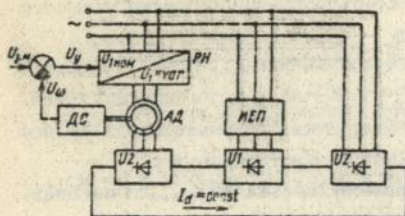


Рис. 14

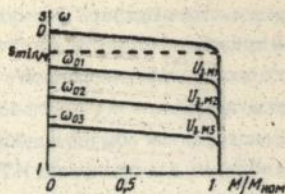


Рис. 15

зоне. Схема, реализующая такой способ управления двигателем с фазным ротором приведена на рис.14, а на рис.15 представлены скоростные статические характеристики такого электропривода.

В этой схеме управляющий сигнал регулятора напряжения U_y равен разности сигнала задания момента $U_{\Sigma, \text{н}}$ и сигнала, пропорционального действительному значению скорости, $U_{\omega} = k_{\omega} \omega$ (k_{ω} — коэффициент преобразования датчика скорости ДС на рис.14):

$$U_y = U_{\Sigma, \text{н}} - U_{\omega} = U_{\Sigma, \text{н}} - k_{\omega} \omega.$$

Линеаризованная система уравнений в приращениях средних значений переменных при условии ограниченной скорости изменения управляющего сигнала для этой схемы имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta \omega(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \Delta M(p); \\ \Delta M(p) = k_1 \wedge E_p(p); \\ \Delta E_p(p) = \frac{k^{-1}}{T_{\Sigma} p + 1} \Delta U_1(p); \\ \Delta U_1(p) = \frac{k_U}{T_{\mu} p + 1} \Delta U_y(p); \\ \Delta U_y(p) = \Delta U_{\Sigma, \text{н}} - k_{\omega} \Delta \omega(p), \end{cases}$$

где $k_1 = 1,35 I_d / \omega_0$; T_{Σ} — постоянная времени статорной цепи АД; T_{μ} — постоянная времени регулятора РН; k_U — коэффициент усиления регулятора РН.

Ее решение [2] позволило выявить характерные особенности такого привода и определить диапазон устойчивой работы.

Нами предложен также бестахогенераторный вариант стабилизации скорости в электроприводе по системе ИТ — АД, реализующий новый способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором [48] и повышающий надежность привода. Для задания

прямителю U2 и так, как показано на рис.18 [47,50,51].

Механические характеристики этих электроприводов формируют, как и в схеме рис.17, изменяя выпрямленный ток ротора I_d . Отличием в управлении является регулирование тока I_d ответвлением части тока I_{yn} (части выпрямленного тока ИЕП I_0) в цепь управляемого вентильного преобразователя, работающего в выпрямительном или инверторном режиме в зависимости от его включения в схему и требуемого диапазона изменения тока I_d .

Анализ и математическое описание построенных таким образом электроприводов был проведен на основе схемы, в которой УВП шунтирует выпрямитель ротора U2.

Анализ [2] подтвердил принципиальную общность протекания процессов в приводах ИТ – АД и АВК, являющихся разновидностью схем двойного питания. Данное обстоятельство позволяет анализировать и рассчитывать элементы системы подчиненного регулирования электроприводом ИТ – АД по известным для АВК методикам.

Наряду с близостью динамических свойств предложенных в работе электроприводов и приводов по системе АВК следует отметить и существенные различия.

Надежность силовой части привода по системе ИТ – АД более высокая в результате отсутствия режима прерывистых токов, опасного для инвертора в схеме АВК. Этот аварийный режим для нерегулируемого инвертора и управляемого вентильного преобразователя в схемах ИТ – АД исключен, так как источник тока (ИЕП – U1) обеспечивает непрерывность тока нагрузки НИ и УВП при любых углах управления вентилями. В схеме АВК для этого требуется в цепи выпрямленного тока дроссель с достаточно большой индуктивностью, которая значительно ухудшает динамические свойства привода.

В электроприводах по системе ИТ – АД с дополнительным УВП по сравнению со схемами рис.17 и АВК улучшены и энергетические показатели ввиду снижения потребления реактивной мощности из сети в соответствующих диапазонах регулирования скорости. Доказательство этого утверждения основывается на следующих предпосылках.

1. При питании ИЕП и АД синусоидальным током индуктивно – емкостный преобразователь генерирует в сеть неизменную реактивную мощность Q_{cm} , а его схема и параметры выбраны такими, что эта мощность равна реактивной мощности намагничивания, потребляемой из сети двигателем Q_{da} :

$$- Q_{cm} + Q_{da} = 0. \quad (10)$$

Постоянство Q_{cm} следует из того, что ИЕП с изменяющейся активной нагрузкой генерирует постоянную реактивную мощность. Возможность представления остальной части схемы привода по отношению к ИЕП активным сопротивлением, изменяющимся со скольжением, показана в предыдущих разделах. В этом случае Q_{da} выбирается максимально возможной в рабочей области изменения скорости и момента (тока I_d).

2. При выполнении условия (10) потребляемая электроприводом из сети реактивная мощность определяется только суммой реактивных мощностей, потребляемых управля-

емым вентильным преобразователем $Q_{уп}$, работающим в инверторном режиме, и нерегулируемым инвертором $Q_{ин}$:

$$Q = Q_{уп} + Q_{ин}.$$

Для всех исследуемых схем были определены эти составляющие, что позволило определить оптимальные, с точки зрения минимума потребления реактивной мощности, режимы работы каждой из схем.

На рис.19 показаны расчетные зависимости удельных значений реактивных мощностей, потребляемых различными схемами из сети в функции скольжения s , т.е. $\bar{Q} = f(s)$ при $\bar{M} = 0,5$, (за базовые величины при этом брались $P_{ном}$ двигателя и его $M_{ном}$) при подключении управляемого вентильного преобразователя параллельно мостовому выпрямителю стабилизатора тока (кривая 1), параллельно роторному мостовому выпрямителю (кривая 2) и в соответствии с рис.18 (кривая 3).

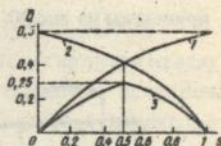


Рис. 19

Из проведенного анализа следует, что схему с УВП, шунтирующим выпрямитель У1 ИЕП, целесообразно использовать при работе привода на скоростях, близких к номинальному значению, т.е. при s , близких к нулю. В АВК при этом режиме, как известно, потребление реактивной мощности максимальное. Это связано с тем, что эдс инвертора в схеме АВК в этом режиме близка к нулю и инвертор работает при углах управления, близких к 90° . Схему, где УВП шунтирует роторный выпрямитель, необходимо применять в случае, если привод работает на малых скоростях (при больших скольжениях), электропривод по схеме рис.18 можно применять в случае регулирования скорости АД в широком диапазоне.

Итак, исследования показали, что использование управляемых по ротору электроприводов системы ИТ – АД с дополнительными УВП в электрооборудовании, требующем регулирования момента и частоты вращения в заданном диапазоне, уменьшает броски реактивной мощности при изменении нагрузки, загрузку питающих сетей и силового энергетического оборудования реактивной мощностью, потери электроэнергии в них, установленные мощности компенсирующих устройств.

4. Электроприводы по системе ИТ - АД с частотным управлением

Новые возможности открываются при использовании электропривода по системе ИТ – АД в сочетании с преобразователями частоты. Как показал опыт, такая комбинация особенно эффективна для ряда установок (насосы, вентиляторы, системы подачи и дозирования различных веществ, некоторые станки), где от привода не требуется высо-

кого быстродействия и перегрузочной способности, а определяющими являются высокая надежность, простота в обслуживании и обеспечение широкого диапазона регулирования скорости вращения двигателя.

Статические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, питаемого от ИТ с регулируемой частотой, исследовались с помощью схемы замещения АД, которая аналогична приведенной на рис.1 с той лишь разницей, что параметры двигателя рассматривались с учетом изменения частоты тока, питаемого АД. Были получены выражения для определения момента на валу двигателя M , величины критического скольжения s_k , критического момента M_k [35]. Статические характеристики, рассчитанные по этим формулам для двигателя 4A71B2У3 ($P_{ном} = 1,1$ кВт, $n_0 = 3000$ об/мин), приведены на рис.20.

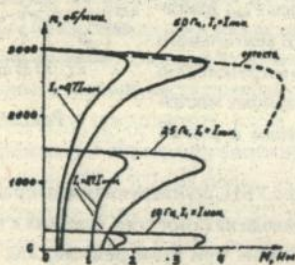


Рис. 20

Из них видно, что при питании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника тока регулируемой частоты можно получить семейство скоростных характеристик, которые параллельны характеристике двигателя при частоте 50 Гц. Величина критического момента двигателя во всем диапазоне регулирования частоты остается неизменной, т.к. определяется только током источника тока.

Для анализа динамики такого привода была разработана математическая модель АД с короткозамкнутым ротором в α, β -координатах с учетом того что статор двигателя питается неизменным по амплитуде и фазе током синусоидальной формы регулируемой частоты. Предложенная модель описывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} i_{sa} &= i_{sA} = I_{1M} \sin \omega_0 t; \\ i_{sb} &= (i_{sa} - i_{sc}) / \sqrt{3} = -I_{1M} \cos \omega_0 t; \\ \frac{d i_{ra}}{d t} &= -\frac{1}{L_2} \left[L_0 \frac{d i_{sa}}{d t} + i_{ra} r_2 + \omega_2 (L_2 i_{sb} + L_0 i_{\phi b}) \right]; \\ \frac{d i_{rb}}{d t} &= -\frac{1}{L_2} \left[L_0 \frac{d i_{sb}}{d t} + i_{rb} r_2 - \omega_2 (L_2 i_{ra} + L_0 i_{\phi a}) \right]; \\ M &= \frac{3}{2} p L_0 (i_{ra} i_{\phi b} - i_{sa} i_{\phi a}); \\ \frac{d \omega_2}{d t} &= \frac{p}{J_2} (M - M_c), \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где I_{1M} – амплитуда тока статора; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – синхронная угловая скорость АД; ω_1 – угловая скорость ротора АД; i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} – мгновенные значения фазных токов статора; i_{rA}, i_{rB} и i_{rC} – соответственно токи статора и ротора в α, β -координатах; r_2 и L_2 – соответственно активное сопротивление и индуктивность роторной цепи АД; $L_0 = x_0/\omega_0$ – индуктивность магнитной цепи АД.

Особенностью математической модели (11) является то, что, благодаря питанию АД системой стабилизированных токов: $i_{sA} = I_{1M} \sin \omega_0 t$; $i_{sB} = I_{1M} \sin (\omega_0 t - \frac{2\pi}{3})$; $i_{sC} = I_{1M} \sin (\omega_0 t + \frac{2\pi}{3})$ – статорные токи заранее определены, а их производные известны, т.е. не требуется решать дифференциальные уравнения статорной цепи АД.

В реальном АД при питании от ИТ, как показано выше, изменение нагрузки на валу АД приводит к изменению параметров магнитной цепи, в частности, величины индуктивного сопротивления x_0 . В связи с этим при расчете динамических процессов в АД с ИТ регулируемой частоты с помощью модели (11) необходимо учитывать изменение величины x_0 , которая определяется методом кусочно-линейной аппроксимации экспериментальной зависимости $U_{\text{статора}} = f(I_0)$, полученной из опыта холостого хода для рассчитываемого АД. С учетом изложенного была разработана на языке FORTRAN в операционной системе MS-DOS программа расчета динамических процессов в АД с ИТ регулируемой частоты.

На рис.21 представлены рассчитанные по этой программе пусковые характеристики двигателя 4A71B2Y3. Там же приведены характеристики этого двигателя при пуске от трехфазного источника напряжения. Исследования показали, что питание двигателя стабилизированным током повышает жесткость статических характеристик, но ухудшает его динамические показатели, что требует использовать пуск с изменением частоты тока статора.

Вместе с тем такое питание двигателя не требует обратных связей для регулирования напряжения на обмотке статора с изменением частоты, поскольку в таких электроприводах изменение напряжения, близкое к закону $U/f = \text{const}$, поддерживается автоматически благодаря параметризму источника тока.

На основании приведенного анализа электромеханических характеристик асинхронного двигателя, питаемого от источника тока регулируемой частоты, разработаны принципы технической реализации как источников тока, так и преобразователей частоты с системами управления их ключевыми элементами. При этом подробно анализировались две схемы привода: с автономным инвертором тока (АИТ) (рис.22) и автономным инвертором напряжения (АИН) (рис.23).

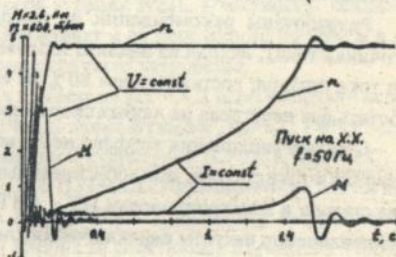


Рис. 21

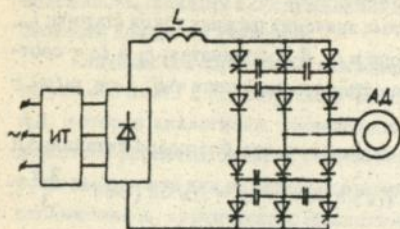


Рис. 22

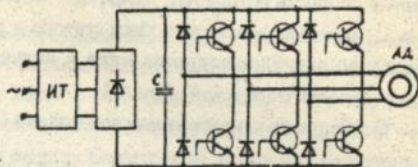


Рис. 23

С учетом специфики работы этих электроприводов были разработаны алгоритмы работы ключевых элементов АИТ и АИН и составлены программы расчета переходных процессов в двигателе при различных частотах токов статора. Электроприводы по системе ИТ – АИН – АД целесообразно использовать для приводов малой мощности (не более 100 Вт). Это связано с тем, что специфика работы АИН и изменение параметров двигателя в зависимости от частоты и нагрузки при больших мощностях двигателей приводит к ухудшению стабилизации тока.

Разработаны рекомендации по выбору величины тока статора двигателя (тока источника тока), исходя из анализа тепловых режимов работы двигателя. Показано, что при токе статора, составляющем 80% от его номинального значения, двигатель может работать без перегрева на любых скоростях и нагрузках.

С целью увеличения коэффициента использования АД, в связи с наличием высших гармоник в токе статора, даны обоснованные рекомендации о способах улучшения формы тока статора в электроприводах ИТ – АИТ – АД и ИТ – АИН – АД. Это достигается за счет повышения частоты переключения ключевых элементов в преобразователях частоты.

В результате проведенных исследований получена возможность разработки частотно-регулируемых электроприводов с источниками тока в силовой цепи на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

5. Источники тока для электроприводов по системе ИТ - АД

Развитие системы ИТ – АД обязано, прежде всего, результатам исследований источников тока на базе индуктивно-емкостных преобразователей, принцип действия которых основан на явлении резонанса напряжений в цепях синусоидального тока с реактивными элементами.

В настоящее время существует большое количество схемных решений ИЕП, в разработке которых участвовал и автор данной работы. С участием автора диссертации был разработан метод структурного синтеза многофазных ИЕП, который позволил ал-

горитмизировать поиск новых схемных вариантов и упростить их последующий анализ и оптимизацию [1].

В основу метода положен принцип представления многофазной цепи в виде фиксированного набора типовых (Г, П, Т, мостовых) элементарных однофазных цепей. Основная особенность при этом заключается в том, что исходные структуры представляются активными четырехполюсниками, содержащими помимо основной эдс, включенной на входе, еще и внутренние источники. Введенное автором работы при исследовании трехфазных регулируемых ИЕП на базе дросселей с вращающимся магнитным полем (в рамках работы еще над кандидатской диссертацией) понятие комплексной функции связи между индуктивно-связанными элементами ИЕП позволило этот метод распространить и на цепи с индуктивными связями. Предложенный метод позволил синтезировать около 150 разнообразных схем ИЕП, из которых большинство новых, не описанных ранее в литературных источниках, провести их классификацию, создать своеобразный альбом схем ИЕП и провести их анализ и оптимизацию [1-7]. Описанные в работах [22, 29, 34] схемы ИЕП, которые можно использовать в электроприводах по системе ИТ - АД, отличаются одна от другой структурой, способом подключения питающих напряжений, мощностью реактивных элементов и т.д. В инженерных расчетах электроприводов необходимо учитывать, что подключение выхода ИЕП к трехфазному мостовому выпрямителю приводит к усложнению процессов в цепях ИЕП, в частности, искажается форма выходного тока преобразователей. Это влияет и на переходные процессы в цепи нагрузки, и на изменение коэффициента мощности всего устройства.

В работе [22] показано, что в приводах по системе ИТ - АД целесообразно использовать схемы ИЕП Г-образной структуры: Г1-ЛС (схема Бушера), Г1-СЛ, Г4-ЛС (схема Штейнметца), Г4-СЛ, Г5-СЛ, Г5-ЛС; П-образной структуры: П2-ЛСЛ, П3-СЛС, П6-СЛС, П7-ЛСЛ, П16-СЛС, П17-СЛС, П16-ЛСЛ и П17-ЛСЛ. Перечисленные схемы допускают бестрансформаторное подключение выхода ИЕП к силовому выпрямителю и имеют небольшую величину установленной мощности реактивных элементов. Переходные и квазиустановившиеся процессы в цепях ИЕП, трехфазного мостового выпрямителя и в цепи выпрямленного тока анализировались и рассчитывались на ЭВМ по специально разработанной программе с использованием описанной в работах [2, 29] полной математической модели силового блока системы ИТ - АД. Для каждой из приведенных выше схем были получены зависимости коэффициента мощности k_m и коэффициента нелинейных искажений $k_{\text{ни}}$ от среднего выпрямленного напряжения ИЕП, рассчитанные при разных значениях нагрузки e_d . Для оценки динамических свойств схем ИЕП рассчитывались переходные процессы в цепи выпрямленного тока i_d , возникающие в процессе изменения e_d от 0 до 1. Во время переходного процесса максимальное отклонение тока σ от установившегося значения и время регулирования t_p определялись для каждой схемы отдельно.

Исследования показали, что наиболее близкие к единице коэффициенты k_m имеют схемы Г4-ЛС, Г5-ЛС, Г4-СЛ, Г5-СЛ, П6-ЛСЛ. Остальные схемы обладают невысокими коэффициентами k_m , особенно при малых нагрузках, что соответствует режиму стопо-

рения двигателя в системе ИТ – АД. Следует отметить, что схемы Г1-CL, П6-CLC, П3-CLC, П16-LCL, П17-LCL имеют коэффициенты мощности с емкостным характером и могут выполнять еще и функции компенсатора реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем и инвертором, ведомым сетью, из питающей сети. Практически синусоидальную форму входного тока имеют схемы: Г1-LC, П16-CLC, П17-CLC, а наибольшими коэффициентами $k_{н.л}$ обладают схемы Г4-LC, Г5-LC, Г4-CL, Г5-CL при малых нагрузках.

Влияние динамических свойств ИЕП на работу электропривода тем значительнее, чем выше скорость изменения противовозд в выпрямленной цепи. Наихудшее качество переходных процессов присуще схемам Г1-LC и Г1-CL ($\sigma \approx 90\%$, $t_p \approx 0,05c$). У остальных схем ИЕП примерно одинаковые динамические показатели ($\sigma \approx 60\%$, $t_p \approx 0,03c$).

Полученные результаты позволяют в каждом конкретном случае выбрать необходимую схему ИЕП. Противоречивость тенденций изменения динамических показателей в зависимости от k_m , $k_{н.л}$ и σ в различных схемах ИЕП диктует необходимость компромиссного выбора варианта для заданного диапазона изменения нагрузки.

В работе наряду с описанными в [1] приемами улучшения массо-габаритных, энергетических, надежностных и других показателей ИЕП путем синтеза оптимальных структур, правильного выбора расчетного сопротивления нагрузки и т.д. значительное место уделено созданию ИЕП с совмещением в одном элементе нескольких функций. Из истории развития электротехники известно, что такой путь является весьма плодотворным.

Так, в ряде случаев, когда нагрузку к ИЕП необходимо подключить через трансформатор (в случае согласования величины нагрузки и при необходимости гальванической развязки нагрузки и питающей сети), представляется возможным конструктивно объединить дроссель ИЕП с трансформатором. Была разработана такая схема ИЕП, где индуктивный элемент преобразователя выполняет одновременно и функции согласующего и разделительного трансформатора [16,43]. Это решение позволило не только уменьшить габариты и вес устройства, но и изменить характер потребления реактивной мощности преобразователя, сделать его близким единице во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки.

В работе [21] детально проанализирована схема, которая подобна схеме привода по системе ИТ – АД (рис.5). Отличие состоит в том, что в источнике тока в качестве индуктивных элементов – дросселей использованы статорные обмотки АД [21,53]. Они, в дополнение к своему основному назначению создавать совместно с роторными обмотками электромагнитный момент двигателя, участвуют в стабилизации тока в его роторной цепи. В асинхронном приводе со свойствами источника момента обмотки статора двигателя можно использовать в качестве индуктивных элементов ИЕП без существенной перегрузки двигателя. Ток холостого хода двигателя примерно на 12% превышает ток холостого хода при его обычном режиме, а скольжение на естественной характеристике увеличивается примерно в два раза. Привод в таком исполнении обеспечивает неизменный момент на валу ($M = 0,5 M_{ном}$) в диапазоне скольжений s от 0,1 до 1,0.

6. Практическая реализация, экспериментальные исследования и внедрение

К областям рационального использования электромеханических систем на базе электроприводов с источниками тока, в первую очередь, относятся механизмы, в которых основные режимы работы электроприводов могут быть реализованы при стабилизации электромагнитного момента (усилия) электродвигателя и регулировании его величины. Среди таких механизмов следует назвать спускоподъемные устройства морских объектов, устройства передачи грузов в море, траловые и ваерные лебедки, якорные, буксирные и швартовые устройства, приводы размотки и намотки различных материалов, нажимные устройства, приводы нагружательных устройств тренажеров и многие другие. Ко второй группе механизмов, в которых по требованиям технологических процессов необходимо обеспечить плавный пуск и торможение, ограничение момента (усилия), ограничение ускорения и рывка, можно отнести подъемно-транспортное оборудование, пассажирские и грузовые лифты, шахтные подъемники, лебедки экскаваторов и грейферных кранов, механизмы подъема драглайнов, агрегаты с инерционными накопителями энергии, роторные столы бурового оборудования, устройства передвижения кранов канатных дорог и ленточных конвейеров. К третьей, наиболее распространенной группе, относятся механизмы общепромышленного и специального назначения, требующие при ограниченном быстродействии регулирования в широких пределах скорости рабочего органа при одновременном ограничении по моменту или мощности двигателя. Наиболее яркими представителями таких механизмов являются всевозможные дозаторы, которые используются на предприятиях по переработке сельскохозяйственной продукции, пищевой промышленности, промышленности по изготовлению строительных материалов. Для перечисленных областей рационального применения электроприводов по системе ИТ - АД в результате выполненных под руководством автора научных исследований разработан ряд электроприводов и электромеханических систем, которые используются в различных отраслях промышленности. К основным из них относятся следующие:

1. Лебедка спуско-подъемного устройства катеров типа ЛЭСА-1 на Черноморском судостроительном заводе (г. Николаев).

Эта лебедка с 1983 г. выпускается серийно и заменила электрогидравлическую. По сравнению с ней лебедка ЛЭСА-1 с электроприводом по системе источник тока - двигатель имеет в 2,5 раза меньшую материалоемкость, в 5 раз меньшую трудоемкость изготовления, а ресурс работы в три раза больший. Лебедка ЛЭСА-1 позволяет проводить спускоподъемные операции при штормах любой балльности, в то время как гидравлическая позволяла осуществлять эти операции только до трехбалльного шторма.

2. Электромеханическая система нагружательного стенда для испытания якорно-швартовых механизмов морских судов большого водоизмещения на Черноморском судостроительном заводе (г. Николаев).

3. Агрегатно-модульный электропривод транспортной подсистемы гибкого автоматизированного участка по изготовлению фланцев судовых трубопроводов для Черноморского судостроительного завода (г. Николаев).

4. Электроприводы лентопотяжного тракта линий по производству полимерных пленок, выполненные для УкрНИИпластмаш (г. Киев). Они эксплуатируются в количестве более трехсот экземпляров на десятках предприятий Украины и за ее пределами.

5. Электропривод транспортного тракта линии индукционного отжига цветных металлов на заводе обработки цветных металлов (г. Киров).

6. Устройство для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором привода кантователя для металлургического комбината (г. Алчевск). В настоящее время готовится серийный выпуск этих устройств.

7. Электромеханическая система пуска и торможения асинхронного двигателя с фазным ротором в приводах агрегатов кратковременного действия с инерционными накопителями энергии.

Разработка передана для использования во ВНИИэлектромаш (г. С.-Петербург).

8. Регулируемый электропривод вибровстряхивателя ВВ-1.

Серийный выпуск ВВ-1 освоен Опытным производством Института физиологии им. А.А.Богомольца АН Украины.

9. Система из 12-ти электроприводов для цеха по производству комбикормов типа ОКЦ-50 на Ярмолинцевском комбикормовом заводе (Хмельницкая область Украины).

Система эксплуатируется с 1991 года.

10. Электропривод бурового станка СКБ-4.

Разработка передана управлению СевУкргеология (г. Киев).

11. Комплект электроприводов для кинооператорского крана, разработанный по заказу РПТЦ "Арт-Фильмотехник" (г. Минск).

В настоящее время готовится мелкосерийное производство этих электроприводов.

12. Электропривод многофункционального малогабаритного деревообрабатывающего станка, серийный выпуск которого запланирован с IV квартала 1992 г. на заводе "Автоштамп".

13. Серия электроприводов типа ЭШД1 для шнековых дозаторов различных материалов.

Электроприводы ЭШД1 выпускаются с 1992 года серийно на заводе "Автоштамп" (г. Александрия, Кировоградской области).

Последняя из упомянутых разработок имеет особое значение для народного хозяйства Украины. Электроприводы ЭШД1 предназначены для работы в механизмах транспортирования, дозирования и перемешивания компонентов и готовой продукции на перерабатывающих предприятиях сельского хозяйства и пищевой промышленности.

Новый привод обеспечивает регулирование скорости механизма в широком диапазоне, плавный пуск и останов механизмов, ограничение потребляемого из сети тока на заданном уровне, автоматическое управление технологическим процессом по заданной циклограмме. Использование этого привода позволяет увеличить производительность

труда в 2-3 раза; резко повысить надежность электродвигателей за счет гарантированного снижения тока в пусковых и стопорных режимах; повысить надежность и долговечность механизмов (шнеков, прессов, дробилок, грануляторов и т.п.) за счет ограничения динамических моментов на допустимом уровне; повысить качество приготовления продуктов за счет увеличения точности дозирования ингредиентов в 2-3 раза; снизить себестоимость продукции за счет уменьшения числа обслуживающего персонала, резкого сокращения ремонтных работ и эксплуатационных расходов, отказа от дорогостоящих двигателей постоянного тока. На Украине с ее мощным агропромышленным и строительным комплексом потребность в электроприводах такого типа весьма высока. Только в комбикормовой промышленности работают 155 государственных и 450 межколхозных заводов, на каждом из которых потребность оценивается по 20 электроприводов. Общая потребность по Украине оценивается в 20-30 тыс. экземпляров. О народно- хозяйственном значении решения этой проблемы свидетельствует то, что предложения ИЭД АН Украины, в разработке которых принимал участие автор, включены в Национальную программу Украины. Эта программа предусматривает в течение 1992-1994 гг. разработку, освоение и серийный выпуск ряда электроприводов типа ЭШД мощностью 1...5 кВт.

Экспериментальная проверка достоверности научных положений, выводов и рекомендаций осуществлялась на физических моделях в лабораторных условиях, моделированием на ЭВМ, на экспериментальных образцах и серийных устройствах. В результате были сформулированы требования к проектированию предложенных электроприводов нового типа, которые положены в основу разработанных инженерных методик расчета силовых цепей и цепей управления электроприводов с источниками тока в силовых цепях [1,2,4,22].

Из изложенного можно сделать вывод, что внедрение электроприводов переменного тока по системе источник тока - двигатель позволяет эффективно решать вопросы преобразования электрической энергии в механическую благодаря хорошей управляемости, простоте, надежности и высоким энергетическим показателям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых автор оценивает как крупное достижение в развитии теории автоматизированного электропривода переменного тока, имеющее важное народно-хозяйственное значение для повышения эффективности электромеханического преобразования энергии.

Наиболее важные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Теоретически и экспериментально доказана жизнеспособность концепции питания силовых цепей электроприводов переменного тока стабилизированным током.

На основе этой концепции удалось создать простые, надежные и экономичные электроприводы, в которых источники тока на базе индуктивно-емкостных преобразователей, помимо выполнения основных функций, одновременно являются и элементами защиты двигателей, механизмов и преобразователей частоты от перегрузок, и фильтро-стабилизирующими устройствами, а также компенсаторами реактивной мощности.

2. Разработаны научные основы и сформулированы условия реализации силовых цепей и цепей управления электромеханических систем на базе предложенного класса электроприводов переменного тока. Показано, что для обеспечения работы асинхронного двигателя в режиме источника момента необходимо обеспечить постоянство активной мощности, потребляемой двигателем из сети, вывод энергии скольжения из ротора во внешнюю цепь и стабилизацию действующего значения активной составляющей тока ротора.

3. Исследована работа асинхронного электропривода со свойствами управляемого источника момента в различных режимах (двигательный, противовключения, рекуперативное и динамическое торможение). Получены соотношения для расчета механических характеристик асинхронной машины при работе в этих режимах.

4. Предложены и апробированы эффективные способы управления моментом и скоростью в электроприводах переменного тока с источниками тока в силовых структурах. Показано, что электроприводы с источниками тока обладают свойством равноправности каналов управления моментом двигателя: со стороны статора — напряжением, а со стороны ротора — током источника тока. Это позволило предложить ряд новых схем регулируемых электроприводов переменного тока.

5. Предложены и исследованы структуры регулируемых электроприводов переменного тока с источниками тока в силовых цепях, позволяющие реализовать питание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника тока регулируемой частоты.

6. На основе анализа совместной работы источника тока, преобразователя частоты и двигателя установлены области предпочтительного использования преобразователей частоты на основе автономных инверторов напряжения (сотни ватт) и автономных инверторов тока (десятки киловатт).

7. Разработаны математические модели и соответствующие программы расчета основных структур новых электроприводов переменного тока и с их помощью исследованы электромагнитные и электромеханические процессы в этих электроприводах, предложена методика расчета и выбора элементов индуктивно-емкостных преобразователей, параметров двигателя и силовых полупроводниковых элементов преобразовательных устройств.

8. Описан способ структурного синтеза схем источников тока на базе индуктивно-емкостных преобразователей и приведены результаты сопоставительного анализа схем ИЕП, рекомендованных к использованию в электроприводах переменного тока. Определены и обоснованы критерии выбора оптимальной схемы источника тока, исходя из

динамических свойств ИЕП и их влияния на работу предложенных электроприводов переменного тока с учетом условий эксплуатации электрооборудования.

9. Показано, что областями рационального использования электроприводов с источниками тока являются технологические системы и механизмы, требующие стабилизации либо ограничения момента (усилия) в рабочем органе и регулирования в широких (до 20 раз) пределах скорости вращения исполнительного двигателя при условии ограничения быстродействия регулирования (стабилизации) этих величин на уровне 0,05 с.

10. Результаты исследований, выполненных в настоящей работе, позволили разработать и реализовать ряд новых технических решений, организовать серийное производство и внедрение электроприводов с источниками тока, наметить перспективы дальнейшего применения предложенных разработок в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства Украины.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Монографии

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации индуктивно-емкостных преобразователей. – Киев: Наук. думка, 1981. – 176 с.
2. Волков И.В., Исаков В.Н. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.

II. Препринты, статьи и доклады

3. Волков И.В., Исаков В.Н., Губаревич В.Н. Дроссели с вращающимся магнитным полем в трехфазных регулируемых индуктивно-емкостных преобразователях. – Киев, 1976. – 62 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 113).
4. Волков И.В., Исаков В.Н., Губаревич В.Н. Расчет и практическое применение регулируемого индуктивно-емкостного преобразователя. – Киев, 1976. – 39 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 119).
5. Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П., Сладкова Е.П. Мостовые схемы индуктивно-емкостных преобразователей. – Киев, 1978. – 43 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 161).
6. Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П., Сладкова Е.П. Индуктивно- емкостные преобразователи мостовой структуры с магнитно связанными обмотками дросселей. – Киев, 1978. – 59 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 172).
7. Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П., Сладкова Е.П. Несимметричные трехэлементные схемы индуктивно-емкостных преобразователей. – Киев, 1980. – 55 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 227).

8. Стяжкин В.П., Исаков В.Н., Волков И.В. Установившиеся и переходные процессы в неуправляемом электроприводе по системе индуктивно-емкостный преобразователь – асинхронный двигатель с фазным ротором. – Киев, 1990. – 30 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 643).

9. Волков И.В., Стяжкин В.П., Исаков В.Н., Аркушин В.П. Анализ и моделирование управляемых электроприводов по системе индуктивно-емкостный преобразователь – асинхронный двигатель с фазным ротором. – Киев, 1990. – 47 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 645).

10. Плугатарь А.П., Исаков В.Н., Волков И.В. Электропривод переменного тока со свойствами источника момента. – Киев, 1990. – 41 с. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики, № 660).

11. Исаков В.Н. Расчетные параметры трехфазных регулируемых индуктивно-емкостных преобразователей // Системы стабилизированного тока. – Киев: Наук. думка, 1976. – С. 26–33.

12. Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П., Александров М.М. Нерезонансные режимы работы индуктивно-емкостных преобразователей // Регуляторы и стабилизаторы тока. – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 38–45.

13. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Фазовое регулирование выходного тока в индуктивно-емкостных преобразователях // Расчет и оптимизация систем стабилизированного тока. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 15–23.

14. Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Определение расчетного значения нагрузки индуктивно-емкостных преобразователей // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1978, вып. 67. – С. 7–10.

15. Аркушин В.П., Губаревич В.Н., Исаков В.Н. Регулирование уровня неизменного тока в Г-образных индуктивно-емкостных преобразователях // Техн. электродинамика. – 1981. – №1. – С. 47–53.

16. Аркушин В.П., Губаревич В.Н., Исаков В.Н. Стабилизаторы тока на основе линейных дросселей-трансформаторов // Техн. электродинамика. – 1981. – №5. – С. 35–41.

17. Исаков В.Н., Плугатарь А.П. Анализ работы асинхронной машины от источника тока // Устройства электропитания со стабилизированными параметрами. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 62–70.

18. Исаков В.Н., Плугатарь А.П. Анализ рабочих характеристик асинхронной машины, питаемой от источника неизменного тока // Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 87–91.

19. Исаков В.Н., Плугатарь А.П., Стяжкин В.П. Система регулирования частоты вращения и электромагнитного момента асинхронного электропривода со свойствами источника момента // Техн. электродинамика. – 1985. – №6. – С. 49–55.

20. Исаков В.Н., Плугатарь А.П., Стяжкин В.П. Анализ установившихся процессов в электроприводе по системе индуктивно-емкостный преобразователь – асинхронный двигатель с фазным ротором // Техн. электродинамика. – 1988. – №1. – С. 43–48.

21. Аркушин В.П., Войтех В.А., Исаков В.Н. Совмещение функций асинхронного двигателя и стабилизатора тока в электроприводе со свойствами "источника момента" // Силовые полупроводниковые преобразователи и электрооборудование для энергосберегающих технологий. — Киев: АН УССР, Ин-т электродинамики, Ин-т проблем энергосбережения, 1988. — С. 125–129.

22. Исаков В.Н., Акинин К.П. Анализ работы индуктивно-емкостных преобразователей Г- и П-образных структур в электроприводах по системе источник тока — асинхронная машина // Силовые полупроводниковые преобразователи и электрооборудование для энергосберегающих технологий. — Киев: АН УССР, Ин-т электродинамики, Ин-т проблем энергосбережения, 1988. — С. 130–135.

23. Волков И.В., Исаков В.Н., Плугатарь А.П. О возможности построения разомкнутых систем электропривода с постоянным крутящим моментом // Третья всесоюз. конф. "Проблемы преобразовательной техники", Киев, октябрь 1983г.: Тез. докл. — Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1983. — Ч. 5. — С. 216–219.

24. Волков И.В., Исаков В.Н., Плугатарь А.П., Бибик В.А., Аркушин В.П. Асинхронный электропривод со свойствами источника момента // Всесоюз. научно-техническая конференция "Применение преобразовательной техники в электроэнергетике, технологических установках и электроприводе", Тольятти, октябрь 1984г.: Тез. докл. — Куйбышев: Политех. ин-т, 1984. — С. 71–72.

25. Волков И.В., Исаков В.Н. Электропривод переменного тока для робототехники и гибких автоматизированных систем // I-я Дальневосточная региональная научно-практическая конференция "Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий", Комсомольск-на-Амуре, май 1986г.: Тез. докл. — Комсомольск-на-Амуре: К-на-АПИ, 1986. — С. 156.

26. Волков И.В., Исаков В.Н., Корчинский А.Н. Регулируемый асинхронный привод с цифровой системой управления // Научно-техн. конференция "Современный металлургический электропривод, автоматизация и САПР промышленных установок", Харьков, сентябрь 1986г.: Тез. докл. — Харьков: УГППКИ ТПЭП., 1986. — С. 274.

27. Исаков В.Н., Плугатарь А.П., Бибик В.А. Электропривод с аккумулятором энергии для механизмов со знакопеременным моментом нагрузки // Научно-техн. семинар "Проблемы энергосбережения в проектировании и эксплуатации новых видов электроприводов", Москва, декабрь 1986г.: Тез. докл. — М.: МЭИ, 1986. — С. 112.

28. Исаков В.Н., Носко А.А., Корчинский А.Н. Цифровая система управления приводом со свойствами источника момента // Научно-технический семинар "Проблемы энергосбережения в проектировании и эксплуатации новых видов электроприводов", Москва, декабрь 1986: Тез. докл. — М.: МЭИ, 1986. — С. 115.

29. Акинин К.П., Исаков В.Н. Анализ динамических свойств индуктивно-емкостных преобразователей в электроприводах по системе источник тока — асинхронная машина // Четвертая всесоюз. конф. "Проблемы преобразовательной техники", Чернигов, сентябрь 1987г.: Тез. докл. — Киев: Ин-т электродинамики, 1987г. — Ч. 5. С. 12–13.

30. Исаков В.Н., Войтех В.А. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором в системе с источником тока // Пятая всесоюз. конф. "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов", Каунас, сентябрь 1988г.: Тез.докл. – Каунас: Каунасский политехн. ин-т, 1988. – Ч.3. – С. 48.

31. Волков И.В., Исаков В.Н., Войтех В.А. Пуск и торможение асинхронного двигателя с фазным ротором в приводах агрегатов кратковременного действия с инерционными накопителями энергии // Третья всесоюз. конф. "Импульсные источники энергии", Ленинград, июнь 1989г.: Тез.докл. – М.: ЦНИИАтоминформ., 1989. – С. 230.

32. Акинин К.П., Войтех В.А., Исаков В.Н. Регулирование момента в асинхронном электроприводе по системе источник тока – асинхронная машина // Всесоюзная научно-техническая конференция "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта", Днепропетровск, октябрь 1990г.: Тез.докл. – Днепропетровск: ДГИ, 1990. – С. 333.

33. Волков И.В., Исаков В.Н., Стяжкин В.П. Параметрическая стабилизация момента и мощности в асинхронном электроприводе // Всесоюзная научно-техническая конференция "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта", Днепропетровск, октябрь 1990г.: Тез.докл. – Днепропетровск: ДГИ, 1990. – С. 338–340.

34. Исаков В.Н. Эффективность использования систем неизменного тока в электроприводе // Пятая всесоюз. конф. "Проблемы преобразовательной техники", Чернигов, сентябрь 1991г.: Тез.докл. – Киев: Ин-т электродинамики, 1991. – Ч.4. – С. 59–61.

35. Войтех В.А., Исаков В.Н. Преобразователь частоты для регулируемого асинхронного двигателя на базе источника тока и автономного инвертора напряжения // Пятая всесоюз. конф. "Проблемы преобразовательной техники", Чернигов, сентябрь 1991г.: Тез.докл. – Киев: Ин-т электродинамики, 1991. – Ч.1. – С. 82–83.

III. Авторские свидетельства на изобретения

36. А.с. 555394 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/04. Трехфазный регулируемый индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, В.П.Кабан, Н.Ф.Берестов. – Оpubл. 1977, Бюл. № 15.

37. А.с. 615469 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/06, H 05 B 7/18. Трехфазный регулируемый индуктивно-емкостный преобразователь / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, В.П.Кабан. – Оpubл. 1978, Бюл. № 26.

38. А.с. 642696 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/04. Регулируемый трехфазный индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, В.П.Кабан, Е.П.Сладкова. – Оpubл. 1979, Бюл. № 2.

39. А.с. 736078 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/06. Трехфазный регулируемый индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, В.П.Кабан, Е.П.Сладкова. — Оpubл. 1980, Бюл. № 19.

40. А.с. 758108 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/04. Трехфазный индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, В.П.Кабан, Е.П.Сладкова. — Оpubл. 1980, Бюл. № 31.

41. А.с. 826321 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/06, H 05 B 7/144. Трехфазный индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, Е.П.Кабан, Е.П.Сладкова. — Оpubл. 1981, Бюл. № 16.

42. А.с. 907534 СССР, МКИ G 05 F 3/06. Устройство для регулирования переменного тока / И.В.Волков, К.А.Липковский, М.М.Александров, З.Н.Губаревич, Н.И.Гирич, В.Н.Исаков. — Оpubл. 1982, Бюл. № 7.

43. А.с. 935927 СССР, МКИ G 05 F 3/06, H 02 M 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь источника напряжения в источник тока / В.П.Аркушин, И.В.Волков, В.Н.Губаревич, В.Н.Исаков, Ю.М.Осецкий. — Оpubл. 1982, Бюл. № 22.

44. А.с. 1100705 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Электропривод переменного тока / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, В.А.Бибик, Л.И.Корсунский, В.П.Аркушин, Ю.М.Осецкий. — Оpubл. 1984, Бюл. № 24.

45. А.с. 1272454 СССР, МКИ H 02 P 5/36. Устройство для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором / И.В.Волков, В.И.Гольцев, В.Н.Исаков, В.В.Калужный, А.П.Плугатарь, Н.Ф.Спикторенко. — Оpubл. 1986, Бюл. № 43.

46. А.с. 1272463 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Электропривод переменного тока / В.Н.Исаков, В.П.Аркушин, В.А.Бибик, И.В.Волков, В.А.Мелешук, А.А.Носко, Ю.М.Осецкий, А.П.Плугатарь, А.Л.Радченко. — Оpubл. 1986, Бюл. 43.

47. А.с. 1379933 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Электропривод переменного тока / В.П.Аркушин, И.В.Волков, Г.Г.Восканян, В.Н.Исаков, А.В.Ковальчук, А.П.Плугатарь, А.Л.Радченко, В.П.Стяжкин. — Оpubл. 1988, Бюл. № 9.

48. А.с. 1381679 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, В.П.Стяжкин, А.В.Ковальчук, Г.Г.Восканян, Ю.М.Осецкий, В.П.Аркушин, А.Л.Радченко. — Оpubл. 1988, Бюл. № 10.

49. А.с. 1408516 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, В.П.Стяжкин, А.В.Ковальчук, Г.Г.Восканян, В.П.Аркушин, А.Л.Радченко. — Оpubл. 1988, Бюл. № 25.

50. А.с. 1431027 СССР, МКИ H 02 P 7/62. Электропривод переменного тока / В.П.Аркушин, И.В.Волков, Г.Г.Восканян, В.Н.Исаков, А.В.Ковальчук, А.П.Плугатарь, А.Л.Радченко, В.П.Стяжкин. — Оpubл. 1988, Бюл. № 38.

51. А.с. 1476590 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / В.П.Аркушин, И.В.Волков, Г.Г.Восканян, В.Н.Исаков, А.В.Ковальчук, А.П.Плугатарь, А.Л.Радченко, В.П.Стяжкин. — Оpubл. 1989, Бюл. № 16.

52. А.с. 1501242 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, В.А.Войтех. — Оpubл. 1989 Бюл. № 30.

53. А.с. 1568194 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / В.П.Аркушин, И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, А.Л.Радченко, В.А.Войтех. — Оpubл. 1990, Бюл. № 20.

54. А.с. 1684902 СССР МКИ Н 02 Р 7/63, 7/74. Электропривод / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, А.П.Рашепкин, В.А.Крутилин, И.В.Назарчук, Ю.В.Васенин, Г.Г.Лосев. — Оpubл. 1991, Бюл. № 38.

55. А.с. 1723652 СССР МКИ Н 02 Р 7/62. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором и устройство его осуществления / К.П. Акинин, В.Н. Исаков, И.В. Волков, В.А. Войтех, А.П. Плугатарь — Оpubл. 1992, Бюл. № 12.

56. А.с. 1725360 СССР МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / И.В. Волков, В.П. Стяжкин, В.П. Аркушин, В.Н. Исаков — Оpubл. 1992, Бюл. № 13.

57. А.с. 1742975 СССР МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / И.В. Волков, Е.Н. Исаков, Г.В. Иванов, А.П. Плугатарь, К.П. Акинин — Оpubл. 1992, Бюл. № 23.

Личный вклад автора в основных публикациях — монографиях [1,2]: в [1] лично автором написаны глава 4 и приложение 2, а также раздел 2 главы 1, где для расчета многофазных индуктивно-емкостных преобразователей используется предложенная автором комплексная функция связи; в [2] лично автором написаны главы 2,3,4 и разделы 5.7, 6.2 — 6.5, посвященные электроприводам переменного тока с источниками тока в силовых цепях. В преринтах [3,4,8,9,10], статьях [17–22] и докладах [23–33,35], написанных в соавторстве, соискателю принадлежит научная постановка задачи, анализ результатов и обобщение выводов. Работы [11,34] написаны автором самостоятельно. В остальных работах: преринтах [5,6,7], статьях [12–16] вклад авторов равновелик, а в авторских свидетельствах на изобретение [36–57] определяется справками о творческом участии.

Соискатель

В.Н. Исаков

Подписано к печати 14 . 01. 1993 г.
Бумага офсетная. Усл.-печ.лист. 2,0
Тираж 110. Заказ 31. Бесплатно

Форм. г 60x84/16
Уч.-изд.лист. 2,0

ФОЛ Института электродинамики АН Украны
252057, г.Киев-57, проспект Победы, 56

1150220

AB 26.527