

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

ВОЙТЕХ Владимир Александрович

РЕГУЛИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СИСТЕМЕ ИСТОЧНИК ТОКА-АСИНХРОННЫЙ  
ДВИГАТЕЛЬ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Киев – 1992

Работа выполнена в Институте электродинамики АН Украины

Научный руководитель - ведущий научный сотрудник,  
кандидат технических наук  
В.Н. ИСАКОВ

Официальные оппоненты - доктор технических наук  
В.А. ЛЕСНИК

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00825546 (U)

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Д.В. ПРИМАЧЕНКО

Ведущая организация - НПО "Киевский институт автоматики"  
г. Киев

Защита диссертации состоится "29" декабря 1992 г.  
в 14 часов на заседании специализированного совета  
К 016.63.01 в Институте проблем энергосбережения АН Украины.

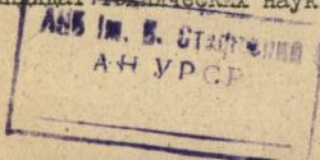
Адрес: 252070 Киев, ул. Покровская, 11  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "27" ноября 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук

*Иванюк*

Н.В. РАМОН



## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время электрический привод является основным источником механической энергии в современных технологических установках. В связи с ужесточением требований к промышленным технологиям, всё большее распространение получает регулируемый электропривод, позволяющий по сравнению с нерегулируемым не только улучшить качество выпускаемой продукции, но и получить значительную экономию ресурсов.

Одним из основных противоречий развития современного регулируемого электропривода является то, что обеспечение новых законов управления, повышение их точности и расширение диапазона регулирования приводит к усложнению схем электроприводов и, как следствие, к снижению надёжности, повышению стоимости, усложнению обслуживания, наладки и ремонта. Это препятствует широкому распространению регулируемых электроприводов в такие области как сельское хозяйство, строительство, перерабатывающая промышленность, где требования надёжности и простоты обслуживания являются определяющими. Одним из путей преодоления этого противоречия является применение нетрадиционных для электропривода источников питания - источников тока на базе индуктивно-ёмкостных преобразователей /ИЭИ/.

Ещё в 60-х годах в Институте электродинамики АН Украины была предложена система электропривода источник тока-двигатель постоянного тока /ИТ-Д/, позволяющая благодаря стабилизации якорного тока формировать механические характеристики двигателя с постоянным моментом. В дальнейших работах подобные характеристики были получены для электропривода ИЭИ-асинхронный двигатель с фазным ротором /ИЭИ-АД/.

В то же время вопросы динамики электропривода ИЭИ-АД были изучены недостаточно. Кроме того возникает потребность в использовании в таких электроприводах асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, которые гораздо проще и надёжней, а также могут использоваться в средах с повышенной запылённостью и взрывоопасностью, что часто характерно для сельского хозяйства, строительства и перерабатывающей промышленности.

Диссертация содержит результаты исследований, проведенных в Институте электродинамики АН Украины по темам: "Резонанс-2" "Исследовать гибридные токовые системы, состоящие из полупроводниковых и параметрических электромагнитных преобразователей и разработать на их

основе источниками электропитания промышленных технологических установок" Постановление Президиума АНУ №474 от 27.12.1985г., "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 АНУ от 27.12.1990г., Протокол №17. Об актуальности и важности этих исследований для народного хозяйства Украины свидетельствует то, что они проводились также в рамках "Национальной программы производства на предприятиях Украины технологических комплексов, машин и оборудования для сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности и промышленности строительных материалов" по разделу "Ириборн, системы контроля и управления технологическими процессами".

Целью диссертационной работы является разработка и исследование регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями в системе с источником тока на базе ИЭИ, позволяющих формировать разнообразные механические характеристики, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями и адаптированных к широкому классу промышленных механизмов.

Поставленная цель потребовала решения следующих основных задач:

- построения математической модели и проведения анализа процессов при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором в системе ИЭИ-АД;
- исследования механических характеристик и анализа работы асинхронного двигателя с фазным ротором при использовании статорных обмоток в качестве элементов ИЭИ;
- исследования статических и динамических характеристик и анализа работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при питании от системы неизменных токов регулируемой частоты;
- разработки принципов построения и практической реализации питания асинхронного двигателя от источника тока регулируемой частоты на базе ИЭИ;
- выбора уровня стабилизированного тока, а также схемы ИЭИ, обеспечивающих надёжную работу электропривода;
- внедрения полученных результатов в промышленности при создании электроприводов различных технологических установок.

Методы исследования. Задачи, поставленные в работе, решались на базе использования основ теории электропривода и электрических машин, методов анализа линейных и нелинейных электрических цепей, методов математического моделирования переходных процессов в электромеханических системах. Экспериментальные исследования по проверке теоретических положений выполнены на физических моделях в лабораторных и промышленных условиях, а также в процессе эксплуатации серийных образцов электроприводов.

Автор защищает следующие основные научные и практические результаты работы: 1. Математическую модель и результаты исследований динамических процессов в асинхронном двигателе с фазным ротором в системе ИЭП-АД. 2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований статических и динамических характеристик АД с КЭР, питаемого от источника тока регулируемой частоты. 3. Структуры и принципы построения электропривода в системе ИЭП-преобразователь частоты-асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. 4. Рекомендации по применению рассмотренных в работе электроприводов, в которых обмотки двигателя питаются стабилизированным током от ИЭП.

Научная новизна: 1. Впервые созданы математические модели и проведено исследование переходных процессов в электроприводах на базе асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором при питании обмоток стабилизированным током неизменной и регулируемой частоты. 2. Проведены теоретические и экспериментальные исследования статических механических характеристик и анализ работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника тока регулируемой частоты. 3. Предложены принципы построения регулируемых асинхронных электроприводов в системе с источником тока и разработаны новые схемы, реализующие эти принципы. 4. Изучено влияние стабилизирующих свойств источника тока на базе ИЭП на механические характеристики двигателя и сформулированы критерии выбора схемы источника тока, исходя из конкретных технических требований к электроприводу.

Практическая ценность. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, могут быть использованы для построения электроприводов с источниками тока в силовых цепях и создании на их основе простых и надежных электромеханических систем различного технологического применения.

Внедрение результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований реализованы в:

- регулируемом электроприводе вибровстряхивателя ВВ-1 для медицины и микробиологии. Серийный выпуск ВВ-1 освоен ОКБ Института физиологии им. А.А. Богомольца АНУ;

- системе из 12-ти частотно-регулируемых электроприводов для цеха по производству комбикормов типа ОКЦ50 на Ярмолинецком комбикормовом заводе (Жемльинская область Украины). Система эксплуатируется с весны 1991 года;

- серии частотно-регулируемых электроприводов типа ЭИД-1 для шнековых дозаторов различных материалов. Выпускается серийно с 1992 года на заводе "Автоштамп" (г. Александрия Кировоградской области Украины);

- электроприводе многофункционального малогабаритного деревообрабатывающего станка, выпуск которого планируется на заводе "Автоштамп". В настоящее время в рамках "Национальной программы производства на предприятиях Украины технологических комплексов, машин и оборудования для сельского хозяйства, гнцевой и перерабатывающей промышленности и промышленности строительных материалов" ведётся разработка серии электроприводов типа ЭИД мощностью от 0,75 до 5 кВт с последующим их серийным выпуском.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на IV и V Всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемы преобразовательной техники", г. Чернигов 1987, 1991г.г., V Всесоюзной научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов", г. Каунас 1988г., III Всесоюзной конференции "Импульсные источники энергии", г. С.-Петербург 1989г., 2-й Дальневосточной региональной научно-технической конференции, г. Комсомольск-на-Амуре 1990г., Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электропитания промышленности и транспорта", г. Днепропетровск 1990г.

Публикации. По результатам работы опубликовано 8 статей и тезисов докладов, получено два авторских свидетельства на изобретения и одно положительное решение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений и содержит 142 страницы основного машинописного текста, 5 таблиц, 81 рисунок.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и перечислены задачи, возникающие при решении проблемы регулирования и стабилизации параметров электроприводов по системе источник тока-асинхронный двигатель.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса и постановке задачи исследований при разработке электроприводов со стабилизированным током в силовых цепях. На основании анализа современного состояния регулируемого электропривода переменного тока показано, что в механизмах, не предъявляющих высоких требований к перегрузочной способности и динамическим характеристикам, в традиционных системах электропривода для формирования механических характеристик с широким диапазоном регулирования скорости и момента двигателя требуются сложные замкнутые системы регулирования. Это является одной из причин, препятствующих распространению регулируемых электроприводов переменного тока для механизмов в сельском хозяйстве, перерабатывающей промышленности, строительстве и других, где определяющим являются требования высокой надежности и простоты обслуживания. Показано, что в электроприводе переменного тока с питанием силовых цепей стабилизированным током от ИЭП осуществимо формирование различных механических характеристик как постоянства момента, так и постоянства скорости в разомкнутой системе при обеспечении высокой надежности. В работе проведен анализ существующих регулируемых электроприводов по системе ИЭП-АД с фазным ротором, рассмотрены их статические характеристики и области применения. С учетом преимуществ асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором перед двигателем с фазным ротором, в диссертационной работе рассмотрены схемы и характеристики существующих электроприводов с питанием обмоток статора от ИЭП. С помощью анализа энергетических характеристик асинхронного двигателя при питании от ИЭП в работе обосновано применение таких систем для механизмов с нагрузочной характеристикой близкой к постоянству момента ( $M=const$ ) и не менее 0,5 номинального момента двигателя. В этом случае питание двигателя от системы неизменных токов не ухудшает его основных рабочих характеристик.

Задача регулирования и стабилизации параметров электроприводов по системе источник тока-асинхронный двигатель рассматривается состоящей из двух разделов. Первый из них связан с анализом и формированием динамических характеристик асинхронных двигателей с фаз-

ным ротором в системе с ИЭП. Второй - с анализом и формированием статических и динамических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с питанием от источника тока регулируемой частоты на базе ИЭП и созданием эффективных электроприводов, реализующих такое питание.

Во второй главе получена математическая модель, проведен анализ динамических характеристик, а также рассмотрены различные способы формирования характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором в системе с ИЭП.

Основываясь на известной схеме электропривода ИЭП-АД рис.1, которая благодаря стабилизации выпрямленного тока  $I_d$ , формирует у двигателя механические характеристики типа "постоянства момента" рис.2, был проведен в мгновенных значениях токов ротора анализ коммутационных процессов в роторном выпрямителе В2.

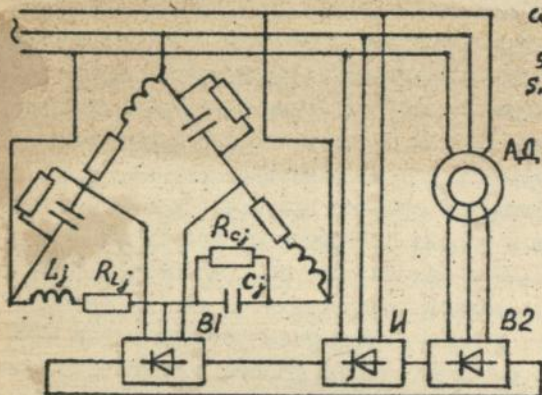


Рис. 1



Рис. 2

В результате решения системы уравнений по I и II законам Кирхгофа для мгновенных значений токов через вентили В2 и фазы ротора АД были получены минимальные значения токов и скольжений ротора  $S_{min}$  при которых начинается коммутация диодов в выпрямителе В2 и благодаря этому формирование у двигателя характеристики "постоянства момента".

Для анализа процессов в электроприводе ИЭП-АД, происходящих при пуске двигателя, была построена математическая модель схемы в мгновенных значениях токов в координатах А, В, С.

$$L_j \frac{di_{Lj}}{dt} + i_{Lj} R_{Lj} = U_{Lj}$$

$$C_j \frac{dU_{Cj}}{dt} = i_{Cj} - \frac{U_{Cj}}{R_{Cj}}$$

$$U_i = R_i i_i + \frac{d\psi_i}{dt}$$

$$\psi_i = \sum_{j=A,B,C} L_{ij} (i_j + i_i)$$

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{14} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ a_{41} & \dots & a_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_{cA}}{dt} \\ \frac{di_{cB}}{dt} \\ \frac{di_{p\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{p\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (I)$$

где  $L_j, R_{Lj}, C_j, R_{Cj}$  - параметры ИЭП,  $U_i$  - напряжение на статоре двигателя,  $R_i, L_i$  - параметры двигателя,  $\psi_i$  - потокоцепные,  $\omega$  - скорость вращения ротора,  $\rho$  - число пар полюсов машины,  $J$  - момент инерции,  $a_{11} \dots a_{44}$  коэффициенты, полученные путем обхода соответствующего контура по схеме рис. I,  $b_1 \dots b_4$  правые части дифференциальных уравнений, также получаемые путем обхода соответствующих контуров. При этом диоды учитывались как конечные сопротивления, в зависимости от тока через них - прямые или обратные. По математической модели (I) была составлена программа на ЭВМ IBM-PC AT и произведен расчет пусковых характеристик двигателя в системе ИЭП-АД. В работе показано, что двигатель в системе ИЭП-АД сохраняет характеристику постоянства момента как в статике, так и в динамике, что даёт основание рекомендовать её для пуска агрегатов, в которых необходимо обеспечить в течение всего времени пуска неизменный момент двигателя. В качестве примера был произведен расчет пуска мощного маховичного агрегата с инерционными накопителями энергии. Было получено выражение для тока ротора двигателя и показано, что пуск такого агрегата математически описывается как заряд емкости, энергетические характеристики которого оптимальны при неизменной величине зарядного тока. Показано, что наилучшие энергетические характеристики пуска маховичных агрегатов достигаются в системе электропривода ИЭП-АД.

В работе рассмотрен способ регулирования момента двигателя с помощью изменения угла между ЭДС и током ротора двигателя в схеме рис. I. Для этого роторный выпрямитель В2 выполняется управляемым, момент двигателя

$$M = c \Phi I_2 \cos \psi'_2 \quad (2)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток статора,  $I_2$  - ток ротора,  $\psi'_2$  - угол между ЭДС и током ротора,  $c$  - постоянная двигателя.

Изменяя угол управления выпрямителя  $\alpha$ , можно изменять и величину  $\psi'_2$ .

$$\psi_2' = \arccos\left(\frac{z_2}{(X_2 S_{min})^2 + z_2^2}\right) + \alpha, \quad (3)$$

где  $z_2, X_2$  - параметры схемы замещения двигателя. Механические характеристики рис. 3 такого электропривода сохраняют постоянство момента для каждого из значений  $\psi_2'$ .

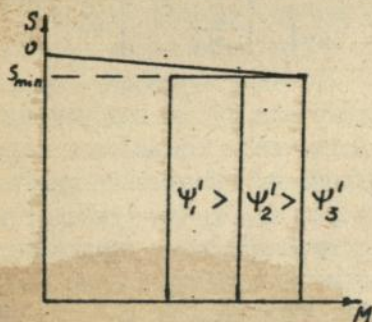


Рис. 3

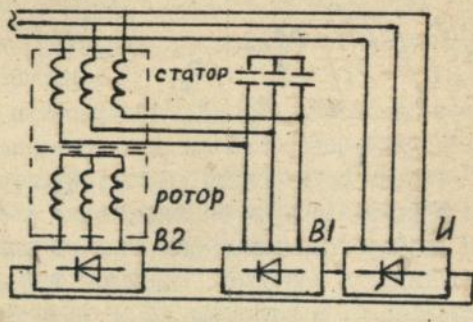


Рис. 4

В работе также рассмотрен вопрос формирования механических характеристик двигателя с постоянным моментом в системе ИЭП-АД с элементами совмещения функций АД и ИЭП в схеме рис. 4. По схемам замещения двигателя в электроприводе рис. 4 был проведен анализ энергетических и механических характеристик, получены выражения для расчета и выбора элементов ИЭП. Показано, что схема обеспечивает двигателю механические характеристики, подобные рис. 2 практически без ухудшения энергетических показателей.

Третья глава посвящена анализу и формированию статических и динамических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при питании от источника тока регулируемой частоты. Используя схему замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, питаемого от источника тока регулируемой частоты, были получены выражения для расчета механических характеристик, критического и пускового момента двигателя. При неизменных параметрах двигателя критический момент пропорционален квадрату тока источника тока и не зависит от частоты тока статора и скольжения, а регулирующим параметром для изменения величины критического момента является ток источника тока  $I_1$ .

$$M_K = \frac{3 I_1^2}{2 \omega_{1ном}} \cdot \frac{x_0^2}{x_0 + x_2'} = K I_1^2, \quad (4)$$

где  $M_k$  - критический момент,  $I_1$  - ток статора,  $\omega_{ном}$  - номинальная скорость вращения двигателя,  $X_0$ ,  $X'_2$  - параметры схемы замещения. В работе было показано, что при питании от источника тока, вследствие насыщения магнитной цепи,  $X_0$  не остается неизменным при изменении скольжения. Величина  $X_0$  определялась с помощью полученной экспериментально характеристики холостого хода. Путём линеаризации этой характеристики методом кусочно-линейной аппроксимации, нелинейные процессы в двигателе рассматривались по совокупности линейных схем замещения для каждой точки расчета. На рис. 5 приведены: 1-4 расчетные механические характеристики асинхронного двигателя, питаемого от источника тока регулируемой частоты; 5 - естественная характеристика. Установлено, что рабочие участки (от  $S_0$  до  $S=S_k$ ) механических характеристик 1-4 рис. 5 параллельны. Жёсткость их в 1,5 раза выше жёсткости естественной характеристики двигателя. Это позволяет использовать такие характеристики для поддержания с достаточно высокой точностью неизменной скорости вращения двигателя без применения обратных связей. В работе двигатель был также представлен в виде эквивалентного сопротивления  $Z_\partial = R_\partial + jX_\partial$  и показано, что для рабочих участков механических характеристик, модуль  $Z_\partial$  практически не изменяется, изменяется только аргумент этого сопротивления.

Для анализа переходных процессов была построена математическая модель двигателя в  $\alpha$ ,  $\beta$  координатах, питаемого от источника тока регулируемой частоты.

$$i_{s\alpha} = i_{sA} = I_{1m} \sin \omega_0 t, \quad i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sB} - i_{sC}) = -I_{1m} \cos \omega_0 t$$

$$\frac{di_{z\alpha}}{dt} = -(i_{z\alpha} R_2 + \omega_1 i_{z\beta} + L_0 \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_0 \omega_1 i_{s\beta}) / L_2$$

$$\frac{di_{z\beta}}{dt} = -(i_{z\beta} R_2 - \omega_1 i_{z\alpha} + L_0 \frac{di_{s\beta}}{dt} - L_0 \omega_1 i_{s\alpha}) / L_2, \quad (5)$$

$$M = \frac{3}{2} p L_0 (i_{z\alpha} i_{s\beta} - i_{s\alpha} i_{z\beta})$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c)$$

$I_{1m}$  - амплитуда тока статора;  $i_{sA}$ ,  $i_{sB}$ ,  $i_{sC}$  - мгновенные значения фазных токов статора;  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  - токи статора;  $i_{z\alpha}$ ,  $i_{z\beta}$  - токи ротора;  $L_2$ ,  $L_0$  - индуктивности ротора и цепи намагничивания АД.

Для учёта насыщения определялось мгновенное значение тока намагничивания  $i_{0\alpha} = i_{s\alpha} + i_{z\alpha}$ ;  $i_{0\beta} = i_{s\beta} + i_{z\beta}$ , а его действующее значение  $I_0 = \sqrt{i_{0\alpha}^2 + i_{0\beta}^2} / \sqrt{2}$ , и величина  $X_0$  определялась аналогично, как и при расчете статических характеристик.

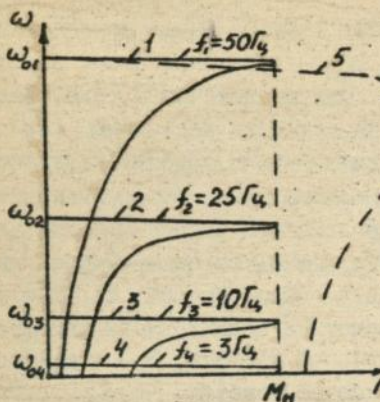


Рис. 5

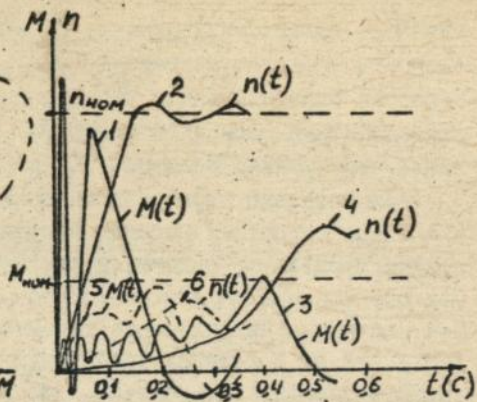


Рис. 6

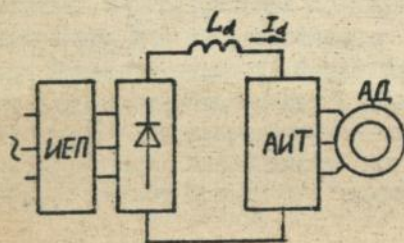


Рис. 7

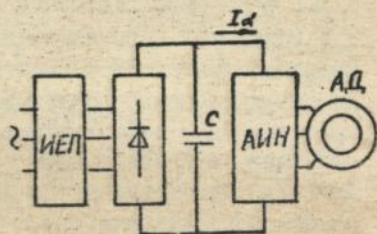


Рис. 8

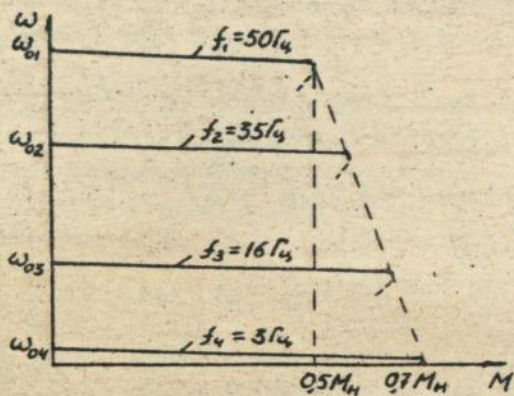


Рис. 9

На рис. 6 представлены расчетные пусковые характеристики  $M=f(t)$  и  $n=f(t)$  при питании двигателя от сети (кривые 1, 2) и от источника тока при частоте 25 Гц (кривые 3, 4) и 10 Гц (кривые 5, 6).

Анализ статических и динамических характеристик показал, что питание двигателя от источника тока регулируемой частоты целесообразно применять для механизмов, не требующих высокого быстродействия, перегрузочной способности и работающих с моментом нагрузки на валу не менее  $0,5M_n$ .

Питание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника тока регулируемой частоты в работе рассматривается для двух схем электроприводов: рис. 7 - ИЭП-автономный инвертор тока-асинхронный двигатель (ИЭП-АИТ-АД) и рис. 8 - ИЭП-автономный инвертор напряжения-асинхронный двигатель (ИЭП-АИН-АД). В схеме ИЭП-АИТ-АД используются два источника тока (ИЭП и дроссель  $L_d$ ). Поэтому выпрямленный ток  $I_d$  имеет только одно направление. В работе показано, что амплитуда тока, протекающего по обмоткам статора практически не зависит от частоты тока и нагрузки на валу, а определяется только параметрами ИЭП. Отличие (примерно на 10%) расчетных и экспериментальных характеристик связано с неидеальностью ИЭП как источника тока и влиянием высших гармоник тока статора.

Учитывая особенности работы АИТ с помощью таблицы переключения ключей инвертора, была построена математическая модель для анализа динамики электропривода по системе ИЭП-АИТ-АД с учетом несинусоидальной формы тока статора и проведены расчеты пуска двигателя в такой системе для различных частот и величин токов статора.

В результате анализа работы электропривода ИЭП-АИН-АД установлено, что выпрямленный ток во время коммутаций может изменять свое направление, это нарушает стабилизацию амплитуды тока в обмотках двигателя. В работе установлено, что действующее значение фазного тока  $I_{\phi\lambda}$  в обмотках двигателя связано со средним значением выпрямленного тока  $I_{d\text{ср}}$  ИЭП при соединении обмоток двигателя в "звезду":

$$I_{\phi\lambda} = \frac{\sqrt{2} I_{d\text{ср}}}{3 \cos \theta} \quad (6)$$

где  $\cos \theta$  - коэффициент мощности нагрузки.

Были получены выражения для расчета  $\cos \theta$  с учетом насыщения магнитной цепи и проведен анализ стабильности тока в обмотках статора двигателя. В результате анализа был определен диапазон мощностей (до 100 Вт) двигателя, при которых в электроприводе ИЭП-АИН-

-АД сохраняется свойство источника тока регулируемой частоты.

На основе расчета потерь в двигателе и теплоотдачи с обдуваемой поверхности для наиболее неблагоприятного по охлаждению режима - частоте тока статора 2+3 Гц, в работе был произведен выбор величины стабилизированного тока, не приводящий к перегреву машины в широком диапазоне изменения частот вращения и нагрузок.

Четвертая глава посвящена выбору схемы источника тока и регулированию амплитуды тока в электроприводе источник тока-преобразователь частоты-асинхронный двигатель. Асинхронный двигатель и АИТ в электроприводе ИИП-АИТ-АД были представлены в виде двух сопротивлений  $R_{эКВ}$  и  $\omega L_d$ , где  $\omega = 314 \cdot 6$  - частота пульсирующий выпрямленного тока. В результате анализа электромагнитных процессов, происходящих в электроприводе ИИП-АИТ-АД, было определено условие стабилизации амплитуды тока в обмотках статора двигателя при широком диапазоне изменения частоты тока статора и нагрузки на валу:

$$\omega L_d \geq R_{эКВ} \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

В работе было получено выражение для расчета выпрямленного тока  $I_d$ , который в то же время является амплитудой стабилизированного тока регулируемой частоты в обмотках статора двигателя:

$$I_d = \frac{R_{эКВ} \cdot \pi \cdot I_{ИИП}}{\sqrt{2} \cos^2\left(\frac{\alpha + \varphi}{2}\right) \sqrt{(\omega L_d)^2 + R_{эКВ}^2}} \quad (8)$$

где  $\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_d}{R_{эКВ}}$ , а  $\sin \alpha = \sin \varphi \cdot e^{-\left[\alpha + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right] \operatorname{ctg} \varphi}$   
 $I_{ИИП}$  - ток источника тока.

На основе (7) и (8) была разработана методика расчета элементов схемы электропривода ИИП-АИТ-АД и выходного тока ИИП, исходя из параметров асинхронного двигателя и заданной величины стабилизированного тока.

В результате проведенного в работе анализа различных схем источников тока, применительно к электроприводе ИИП-АИТ-АД, установлено, что наилучшими массогабаритными и энергетическими показателями при работе электропривода от трехфазной сети обладают нерезонансные схемы ИИП. Проведен анализ работы различных нерезонансных схем ИИП на сопротивлениях  $R_{эКВ}$  и  $\omega L_d$ , на основании которого были разработаны рекомендации по выбору схемы источника тока, обладающего высокими энергетическими характеристиками и стабильностью. В результате экспериментальных исследований в работе показано, что механические характеристики

двигателя в системе ИЭП-АИТ-АД рис.(9), когда ИЭП выполнен по нерезонансным схемам, отличаются от характеристик рис. 5, где источник тока является идеальным, лишь некоторым (примерно на 30%) уменьшением величины критического момента, что допустимо для многих механизмов в сельском хозяйстве, строительстве и т.д.

В работе также рассмотрен вопрос о регулировании амплитуды тока в электроприводе ИЭП-АИТ-АД и представлены схемы его реализующие, а также рекомендованы области их практического применения. При этом были рассмотрены различные варианты регулируемых электроприводов: при питании от однофазной и от трехфазной сети.

В пятой главе рассмотрены особенности технической реализации асинхронных электроприводов с источниками тока на основе ИЭП. Произведен расчет работы и мощности совершаемой электроприводом в вибрационных стендах с эксцентриситетом, проведен анализ нагрузочных характеристик и обоснована целесообразность использования электропривода по системе ИЭП-АИТ-АД. Рассмотрены принципиальные схемы электропривода и приведены фотографии серийно выпускаемых приборов ВВ-1.

Рассмотрена кинематическая схема и нагрузочная характеристика шнекового дозатора для дозирования компонент при производстве комбикормов, обосновано применение электропривода по системе ИЭП-АИТ-АД. Приведены схемы, фотографии и результаты испытаний серийно выпускаемых электроприводов ЭИД-1. В работе проведен анализ работы электропривода от однофазной сети, рассмотрены особенности его схемной реализации. Приведены схемы силовой части и системы управления, временные диаграммы управляющих импульсов, поступающих на ключи инвертора, а также рассмотрены различные варианты соединения обмоток двигателя. Представлены фотографии и результаты испытаний макета электропривода многофункционального деревообрабатывающего станка, его механические и энергетические характеристики.

В приложениях содержатся листинги программ и акты внедренных результатов диссертационной работы.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Построена математическая модель и проведен анализ пусковых процессов в электроприводе по системе ИЭП-АД с фазным ротором. Обосновано применение таких электроприводов для пуска мощных махо-

вичных агрегатов с инерционными накопителями энергии и показано, что пуск двигателя в такой системе математически описывается как заряд емкости неизменным током и является оптимальным с точки зрения энергетических показателей.

2. Рассмотрена структура регулируемого электропривода по системе ИЭП-АД с фазным ротором с фазовым регулированием момента, проведен анализ механических характеристик привода в такой системе и рекомендованы области его применения.

3. Проведен анализ возможности совмещения функций ИЭП и обмоток асинхронного двигателя, предложена схема его реализующая и исследованы механические и энергетические характеристики такого электропривода.

4. Исследована работа асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от источника тока регулируемой частоты и получены выражения для расчета механических характеристик.

5. Построены математические модели для расчета переходных процессов в асинхронном двигателе при питании от источника тока регулируемой частоты и проведен анализ пусковых характеристик двигателя при различных величинах и частотах тока статора.

6. Предложены структуры построения регулируемых электроприводов на базе ИЭП, позволяющие реализовать питание асинхронного двигателя от источника тока регулируемой частоты.

7. На основе анализа совместной работы ИЭП, преобразователя частоты и двигателя показано, что электропривод по системе ИЭП-АИИ-АД может быть рекомендован для приводов малой мощности (десятки Ватт), в то время как электропривод по системе ИЭП-АИГ-АД для мощностей до десятков киловатт.

8. Произведен расчет уровня стабилизированного тока в обмотках статора двигателя при широком диапазоне регулирования и изменения нагрузки на валу для обеспечения работы двигателя без перегрева.

9. Теоретические и экспериментальные исследования легли в основу разработанных в ИЭД АНУ электроприводов виброустойчивателей для медицинской и микробиологической промышленности, выпускаемых в настоящее время серийно в ОКП Института им. А.А. Богомольца (г. Киев), 12 пневматических электроприводов для дозирования компонентов при производстве комбикорма для межколхозного комбикормового завода (г. Ярмолинцы), серийный выпуск которых начат заводом "Автоштамп" (г. Александрия), электропривода многофункционального деревообрабатыва-

шего станка, выпуск которого планируется заводом "Автоштамп".

Результаты диссертации отражены в II-ти опубликованных работах:

1. 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 проблем энергосбережения, Ин-т электродинамики, 1988. - С.125-129.

2. 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 Всесоюзная конф. "Импульсные источники энергии", Ленинград, июнь 1989г.: Тез. докл. - М.: ЦНИИ атоминформ, 1989. - С.230.

3. Ковальчук А.В., Восканян Г.Г., Войтех В.А. Исследование на ЦВМ переходных и установившихся процессов в системе электропривода индуктивно-емкостный преобразователь-асинхронный двигатель // Пробл. преобразоват. техники: Тез. докл. IV Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киев: ИЭД АН УССР, 1987. - Ч. III. - С.121.

4. 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 1986г.: Тез. докл. - Каунас: Каунасский политехн. ин-т, 1988. - Ч.3 - С.48.

5. Акинин К.П., Войтех В.А., Исаков В.Н. Регулирование момента в асинхронном электроприводе по системе источник тока-асинхронная машина // Всесоюз. науч.-техн. конф. "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта", Днепропетровск, октябрь 1990 г.: Тез. докл. - Днепропетровск, ДПИ, 1990. - С.333.

6. 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 1991 г.: Тез. докл. - Киев: Ин-т электродинамики, 1991. - Ч. I. - С.82-83.

7. И.В. Волков, В.Н. Исаков, В.А. Войтех Применение обмоток асинхронного двигателя с фазным ротором в качестве индуктивных элементов стабилизатора тока в электроприводе со свойствами "источника момента"

та" // Тез. докл. 2-й Дальневосточной региональной науч.-техн. конф. - Комсомольск-на-Амуре, 1989. - С. 71.

8. Акинин К.П., Войтех В.А., Исаков В.Н. Фазовое регулирование электромагнитного момента асинхронного двигателя с фазным ротором в электроприводе со свойствами "источника момента" // Труды IV Республиканской школы-семинара молодых ученых и специалистов: электромагнитные и тепловые процессы в электромеханических и полупроводниковых преобразователях. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР. Деп. в ВИНЦТУ.

9. А.С. I50I242 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Электропривод переменного тока / И.В.Волков, В.Н.Исаков, А.П.Плугатарь, В.А.Войтех. - Оpubл. 15.08.89; Бюл. № 30.

10. А.с. I568I91 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. 30.05.90; Бюл. № 20.

II. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 476038I/24 от 7.02.91. 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.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве состоит в следующем: (1,3,5,6,8) - исследованы статические и динамические характеристики электроприводов со стабилизированным током в силовых цепях; (2,4,7) - проведен анализ результатов исследований, предложены принципы построения регулируемых электроприводов; (9 - II) - разработаны новые схемы электроприводов и выполнено аналитическое описание процессов в статических и динамических режимах электроприводов переменного тока с стабилизированным током в силовых цепях.

Список литературы

Подписано к печати 27.II.1992. Формат 60x84/16. . .  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ.лист. 1,0.  
Тираж 150 экз. Бесплатно.

---

Отпечатано в Институте проблем энергосбережения  
АН Украины  
254070, Киев-70, ул. Покровская, 11.

469057

AB 26.187