

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ  
"КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

На правах рукописи

УДК 62-83

МАДХИ Халед Фатхи Абдул-Фаттах  
(Иордания)

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ  
НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1997

621.5-1

AB 36.772

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена на кафедре  
ности Национального технического  
политехнический институт"

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00760847 (W)

Научный руководитель -

доктор технических наук,  
профессор В.М.Чермалых

Официальные оппоненты -

доктор технических наук,  
профессор В.Н.Исаков

кандидат технических наук,  
доцент В.М.Мамалыга

Ведущая организация -

Научно-производственная  
корпорация "Киевский институт  
автоматики"

Защита диссертации состоится " 10 " 02 \_\_\_\_\_ 1997 г.

в 15 часов на заседании специализованного совета К 01.02.04  
в Национальном техническом университете Украины "Киевский политех-  
нический институт" по адресу:

252056, г.Киев, пр.Победы, 37, КПИ (корп. 22, ауд. 608)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан " 10 " 01 \_\_\_\_\_ 1997 г.

Ученый секретарь  
специализованного совета  
канд. техн. наук, доцент

В.В.Прокопенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Внедрение передовых технологий и создание современного оборудования требуют обеспечения высокой точности, быстродействия, широкого диапазона регулирования координат в процессе воспроизведения заданных траекторий движения исполнительных органов сложных электромеханических систем. В успешном решении данных задач существенная роль отводится автоматизированному электроприводу. Успехи в создании микропроцессорной техники, развитии теории цифрового управления позволили коренным образом изменить сам подход к построению как систем управления, так и силовых стем электроприводов. Это, главным образом, относится к приводу переменного тока, который имеет ряд важных преимуществ перед приводом постоянного тока, который до настоящего времени был основным для машин и установок, требующих регулирования координат в широких пределах.

Прогресс в области полупроводниковой техники открыл возможности для разработки регулируемых приводов переменного тока, в том числе и асинхронных с фазным ротором, которые находят широкое применение во многих отраслях промышленности и достигают мощности 1000 кВт и более. Применяемые электроприводы такого типа в настоящее время в основном работают с релейно-контактными системами реостатного управления, энергетические и регулировочные показатели которых весьма низки, что приводит к значительным потерям электроэнергии и затрудняет автоматизацию технологических процессов. Без коренного улучшения этих показателей невозможно решить задачу энергосбережения и повышения надежности и долговечности оборудования.

Все сказанное в первую очередь относится к электроприводам, работающим в циклическом режиме (шахтная подъемная машина, грузо-

ЛНБ ім. В. Стефанька  
АН України

подъемные краны различного типа), а также требующим технологического регулирования скорости (конвейерные установки, турбомеханизмы). Подавляющее большинство этих машин и установок оборудовано асинхронным реостатным электроприводом. Существенной трудностью на пути повышения технического уровня действующих машин указанного типа было отсутствие до последнего времени экономичной, глубоко- и плавнорегулируемой и в то же время простой и надежной в работе асинхронной машины (АМ) с фазным ротором. Одним из путей преодоления этой трудности явилось создание системы электропривода, в которой АМ работает в режиме вентильного двигателя (ВД). Созданию первого промышленного образца такого привода для шахтной подъемной установки мощностью 320 кВт предшествовали научно-исследовательские и экспериментальные работы, которые выполнялись в лаборатории электропривода НИИГМ им.М.М.Федорова и на кафедре автоматизации горной промышленности КПИ по целевой комплексной отраслевой программе (ЦКОП) Минуглепрома ЦОУО410.

ВД представляет собой основу перспективной системы тиристорного электропривода переменного тока, приближающаяся по своим регулировочным и энергетическим показателям к тиристорному приводу постоянного тока. В последние два десятилетия в странах СНГ и за рубежом накоплен немалый опыт создания ВД на основе общепромышленных синхронных машин или машин специальной конструкции для мощностей от нескольких ватт до десятков мегаватт. Одновременно появился ряд фундаментальных работ, посвященных теории электромагнитных процессов в ВД. В то же время ВД на основе АМ с фазным ротором исследован недостаточно как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении. Поэтому проведение такого рода исследований является актуальной задачей, главным образом, с точки зрения реконструкции электроприводов с АМ. Актуальным является также повы-

шение качества и сокращение сроков проектирования на основе получения и использования достоверной информации о структуре и параметрах объекта управления.

Цель диссертации – разработка комбинированной по заданным воздействиям системы управления вентильным двигателем на основе достоверной информации о выходных переменных и синтезе линеаризованной передаточной функции объекта для улучшения качества регулирования и энергетических показателей электроприводов переменного тока.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе анализа выполненных исследований, связанных с установлением зависимостей характеристик ВД на основе АМ с фазным ротором от параметров силовой схемы с учетом компенсации реакции якоря и оптимизации режимов работы индуктора построить систему управления, позволяющую наряду с замкнутыми контурами регулирования тока и скорости использовать прямые передачи по выходным сигналам задающей модели (ЗМ) для компенсации инерционности системы;
- учитывая, что система электромеханического преобразования энергии в ВД рассматриваемого типа является нелинейной разработать метод получения линеаризованной передаточной функции силовой схемы по реальным значениям выходных переменных для возможности использования при синтезе САР стандартных настроек регуляторов;
- обосновать целесообразность при синтезе дискретной передаточной функции и переходе к непрерывной использовать метод Z-форм в сочетании со схемами в переменных состояниях;
- модернизировать ЗМ третьего порядка для возможности формирования управляющих сигналов, соответствующих многопериодным диаграммам скорости с изменяющимися ограничениями координат и разработать универсальный алгоритм реализации ЗМ при помощи микроЭВМ;

– разработать методику определения передаточных функций прямых передач по идентифицированной математической модели ВД и обосновать возможность перехода от дифференцирующих прямых передач к пропорциональным, используя свойства ЭМ высокого порядка.

Методы исследований. Использованы численно-аналитические методы расчета нелинейных систем, цифровое моделирование на основе Z-форм и метода переменных состояния передаточных функций объекта управления. Основные теоретические выводы подтверждены исследованием предложенных систем на ЦЕМ, а также на лабораторном стенде.

Научная новизна диссертации заключается в разработке:

– функциональной схемы системы комбинированного управления ВД на основе АМ с многоканальной ЭМ и контурами компенсации реакции якоря, обеспечивающими работу привода при знакопеременной нагрузке по заданной программе;

– алгоритмов формирования многопериодных управляющих сигналов в ЭМ третьего порядка с автоматическим изменением структуры и оптимальных ограничений производных выходной переменной по времени с целью достижения максимальной точности обработки заданной траектории движения;

– метода определения математической модели ВД путем дискретного измерения ординат реального графика переходной функции, используя схемы в переменных состояния и Z-формы для определения порядка и коэффициентов характеристического уравнения замкнутой системы;

– методики выбора структуры и параметров прямых передач по идентифицированной модели системы, содержащей контуры подчиненного регулирования тока и скорости, и перехода от дифференцирующих звеньев к пропорциональным, используя структуру линейной части ЭМ.

Практическая ценность. Предложенная система управления, в которой наряду с общепринятыми замкнутыми контурами регулировании

тока и скорости, используются прямые передачи, позволяет без предварительных расчетов определять количество этих передач и их коэффициентов по реальному графику переходного процесса, полученному при наладке привода. Идентификация структуры силовой схемы ВД одновременно выполняет задачу линеаризации математической модели, что дает возможность реализовать систему автоматического регулирования путем стандартной настройки регуляторов при модернизации действующих электроприводов.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы при разработке лабораторного стенда для экспериментальной проверки соответствия характеристик ВД, полученных методом моделирования, реальным. Исследования показали, что режим работы ВД при движущем моменте, не превышающем  $0,8 M_H$ , практически такой же, как и в естественной схеме включения при номинальном моменте на валу. Качество процесса регулирования на различных участках сложной тахограммы близок к аналогичным процессам в приводе постоянного тока.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференции с Международным участием "Проблемы и перспективы развития горной техники" (г. Москва, 1994 г.); 2-ой и 3-ей Украинской конференции по автоматическому управлению (г. Львов, 1995 г., г. Севастополь, 1996 г.); в НИИГМ им.М.М.Федорова (г. Донецк, 1996 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в пяти печатных работах.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы и приложений. Содержит 122 страницы машинописного текста, 33 рисунка, 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы задачи исследований, которые вытекают из проблем создания регулируемых электроприводов переменного тока, обеспечивающих широкий диапазон регулирования, высокие энергетические показатели, надежность в сложных режимах работы с изменяющейся в больших пределах нагрузкой.

В первой главе рассмотрены основные направления и современное состояние исследований электроприводов переменного тока. Показано, что несмотря на широкое применение регулируемых приводов с двигателями постоянного тока, во всех странах наблюдается тенденция создания систем управления технологическими процессами и промышленными установками с использованием двигателей переменного тока. По данным ряда зарубежных фирм наиболее перспективные электроприводы базируются на следующих машинах переменного тока: синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов или с обмоткой возбуждения; асинхронная машина двойного питания с роторной обмоткой и фазными кольцами; асинхронная машина с короткозамкнутым ротором; реактивный шаговый двигатель. Во всех случаях применяются статические преобразователи со звеном постоянного тока и без звена постоянного тока.

Системы управления машинами переменного тока отличаются от машин постоянного тока большей сложностью. Однако развитие средств вычислительной техники обеспечило возможность контроля и управления текущими координатами машин переменного тока в различных осях отсчета и открыло новые возможности развития и совершенствования систем управления.

В заключении главы показано, что наиболее универсальным типом привода переменного тока является вентильный двигатель (ВД), в ко-

тором регулирование скорости и вращающего момента осуществляется подводимым напряжением, током возбуждения, углом опережения включения вентиля преобразователя при самоуправлении по частоте питания. ВД обладает регулировочными качествами машины постоянного тока и надежностью систем переменного тока.

Вторая глава посвящена вопросам построения вентильного двигателя на основе асинхронной машины с фазным ротором. Широкое применение АМ с фазным ротором с релейно-контактным управлением привлекло внимание специалистов к поиску путей создания на ее основе регулируемого привода переменного тока по схеме ВД. Под ВД понимают машинно-вентильную систему, содержащую, помимо многофазной электрической машины, вентильный преобразователь и датчик, обеспечивающий управление вентильным преобразователем синхронно с вращением ротора.

Наиболее важные теоретические исследования процессов в ВД на основе АМ выполнены Д.И.Родькиным, В.М.Шевченко (Криворожский технический университет) и В.А.Баринбергом (НИИГМ им.М.М.Федорова, г.Донецк). При переводе АМ в режим ВД в качестве якоря целесообразно использовать ротор. Статор в этом случае является индуктором, в него подается постоянный ток возбуждения подобно тому, как это имеет место при динамическом торможении. К особенностям АМ по сравнению с синхронной машиной, на основе которой обычно выполняется ВД, относятся значительно меньший воздушный зазор. Поэтому на характеристики ВД повышенное влияние оказывает реакция якоря. С другой стороны на индукторе ВД на основе АМ располагаются три фазные обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 120 эл.градусов. Это представляет широкие возможности для гибкого управления амплитудой и пространственным положением МДС индуктора с целью компенсации реакции якоря.

Для осуществления компенсации реакции якоря результирующая МДС индуктора должна содержать две составляющие: постоянную МДС возбуждения и МДС компенсации, изменяющуюся пропорционально изменению тока якоря. Это условие выполняется, если ток каждой из фаз индуктора (статора) содержит два слагаемых, пропорциональных току возбуждения ( $I_B$ ) и току компенсации ( $I_K$ ):  $I_A = (K_{AB}I_B + K_{AK}I_K)K_1\sqrt{2}$ ;  $I_B = (K_{BB}I_B + K_{BK}I_K)K_1\sqrt{2}$ ;  $I_C = (K_{CB}I_B + K_{CK}I_K)K_1\sqrt{2}$ , где  $I_A, I_B, I_C$  - ток в фазах А, В, С индуктора;  $K_1 = 3/(2K_T)$ ;  $K_T$  - коэффициент трансформации АМ;  $K_{AB}, K_{BB}, K_{CB}, K_{AK}, K_{BK}, K_{CK}$  - постоянные коэффициенты взаимосвязи токов.

Из условия минимальных суммарных потерь в меди трехфазного индуктора выбираются коэффициенты взаимосвязи, чему должно соответствовать равенство  $I_A + I_B + I_C = 0$ , то есть симметричное включение фаз индуктора. Специфической особенностью ВД на основе АМ является также влияние режима индуктора на коэффициент использования мощности электрической машины.

Практическая реализация компенсации якоря возможна с помощью двух типов схем. К первому типу относится схема ВД со смешанным возбуждением, в которой две фазные обмотки индуктора включаются в цепь выпрямленного тока на входе инвертора и выполняют функции компенсационных обмоток, а третья фаза подключается к нерегулируемому источнику постоянного напряжения и является обмоткой независимого возбуждения. Второй тип представляет трехфазный мостовой выпрямитель с независимым управлением анодной и катодной группами вентилей. При использовании такого возбудителя фазные обмотки индуктора соединяются в симметричную звезду или треугольник. Этим автоматически обеспечивается выполнение условия оптимального распределения токов в фазах индуктора.

Упрощенная функциональная схема комбинированной по задающему воздействию системы управления ВД показана на рис. I, а. По своей структуре она представляет собой стандартную систему подчиненного регулирования, дополненную двумя контурами регулирования токов фаз индуктора с блоком компенсации реакции якоря (БК) и задающей моделью (ЗМ). ЗМ формирует сигнал заданной скорости ( $U_{в.о.}$ ), а также сигналы, пропорциональные динамической составляющей тока якоря ( $U_{\alpha}$ ) и производной тока по времени ( $U_{\rho}$ ). Сигналы  $U_{\rho}$  и  $U_{\alpha}$  подаются на вход регулятора тока, повышая тем самым эффективность компенсации реакции якоря и быстродействие системы в переходных режимах. В большинстве случаев достаточно использовать только сигнал  $U_{\alpha}$ .

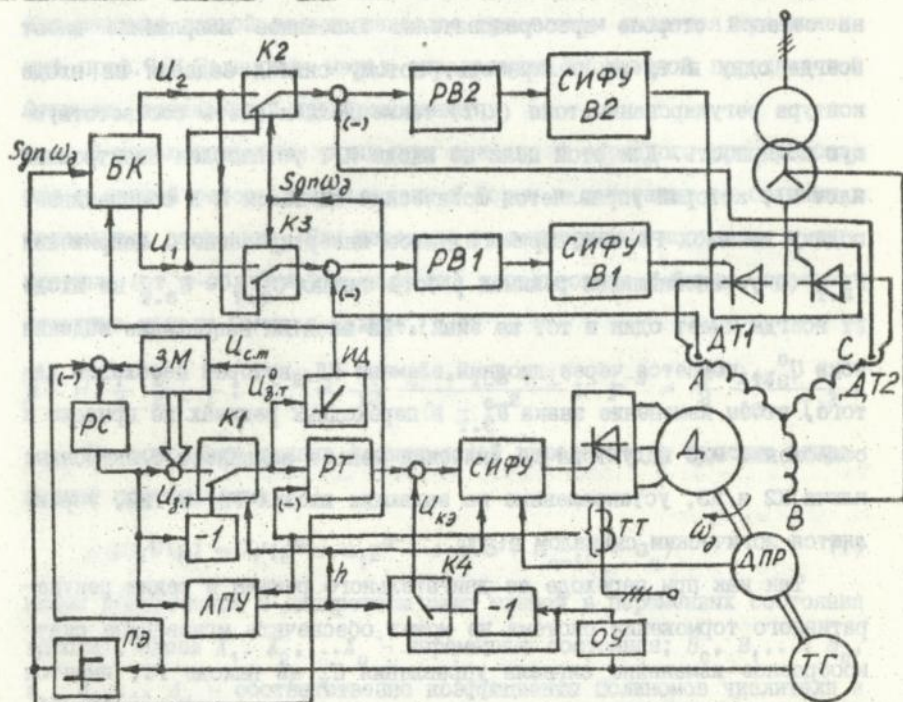


Рис. I

Регуляторы контуров регулирования токов фаз РВ1 и РВ2 осуществляют компенсацию реакции якоря потому, что сигналы  $U_1$  и  $U_2$  каждого из указанных контуров содержат слагаемые, пропорциональные заданному току ротора ( $U_{\text{Э.Т}}^0$ ). Требуемые значения параметров  $K_B$  и  $K_K$ , а также угол компенсации  $\Phi_K$  (угол между током компенсации  $I_K$  и фазной ЭДС холостого хода ротора  $E_0$ ) задаются в БК. Функции обеспечения заданного направления движения и необходимого режима работы (двигательного или рекуперативного торможения) выполняет логическое переключающее устройство ЛПУ.

В качестве сигнала обратной связи по току якоря используется выпрямленное напряжение с трансформаторов тока (ТТ), установленных на сетевой стороне преобразователя. Указанное напряжение имеет всегда одну и ту же полярность, потому сигнал задания на входе контура регулирования тока (КРТ) также должен иметь соответствующую полярность. Для этой цели на входе КРТ установлен электронный ключ К1, который управляется логическим сигналом  $\lambda$  и обеспечивает подачу на вход РТ либо прямого, либо инвертированного напряжения  $U_{\text{Э.Т}}$  (в установившихся режимах работы сигнал  $U_{\text{Э.Т}}^0 = U_{\text{Э.Т}}$  на входе РТ всегда имеет один и тот же знак). На вход БК напряжение задания тока  $U_{\text{Э.Т}}^0$  подается через диодный элемент ИД, который необходим для того, чтобы изменение знака  $U_{\text{Э.Т}}^0$  в переходных режимах не привело к ослаблению МДС индуктора до значений меньше заданных. Электронные ключи К2 и К3, установленные на задающих входах РВ1 и РВ2, управляются логическим сигналом  $\text{sgn} \omega$ .

Так как при переходе из двигательного режима в режим рекуперативного торможения система не может обеспечить мгновенное скачкообразное изменение сигнала управления  $U_y$  на выходе РТ, имеется узел компенсации (УК) противо-ЭДС, в состав которого входят инвертор и электронный ключ К4. На вход УК подается сигнал, пропорцио-

нольный скорости (ЭДС), а с выхода сигнал  $U_{кв}$  суммируется с выходным напряжением РТ. Благодаря тому, что ключ К4 управляется логическим сигналом  $h$ , независимо от направления вращения,  $U_{кв} > 0$  в двигательном режиме и  $U_{кв} < 0$  в режиме рекуперативного торможения.

В третьей главе рассмотрены вопросы определения структуры и параметров математической модели ВД по реальному графику переходной функции силовой части системы. Данный вопрос является важным, так как аналитическое определение передаточной функции ВД может быть получено только приближенно. Поэтому целесообразно в процессе наладки системы управления произвести уточнение параметров звеньев замкнутых контуров и прямых передач комбинированного управления. Для решения данной задачи наиболее приемлемым является предложенный проф. С.Н. Радимовым метод определения дискретной передаточной функции, используя  $Z$ -преобразование.

С целью упрощения процедуры прямого и обратного преобразования в данной работе использованы  $Z$ -формы в сочетании со схемами в переменных состояния. Для перехода от непрерывных координат к дискретным (от  $p$ -области к  $z$ -области) использованы  $Z$ -формы, соответствующие методу Боксера-Талера, т.е.

$$p^{-1} = \frac{T}{z} \frac{z+1}{z-1}; \quad p^{-2} = \frac{T}{1z} \frac{z^2 + 10z + 1}{(z-1)^2}; \quad p^{-3} = \frac{T^3}{z} \frac{z(z+1)}{(z-1)^3}.$$

На основании данных зависимостей передаточную функцию непрерывной системы вида

$$Y(p)/U(p) = K/(p^q + a_1 p^{q-1} + \dots + a_{q-1} p + a_q) \quad (1)$$

можно представить в дискретном виде схемой в переменных состояния (рис. 2). Здесь  $X_1, X_2, \dots, X_q$  - переменные состояния;  $B_0, B_1, \dots, B_q, A_1, A_2, \dots, A_q$  - соответственно коэффициенты полиномов числителя и знаменателя дискретной передаточной функции;  $T$  - период дискрети-

зации;  $z^{-1}$  - представляет собой идеальное запаздывание.

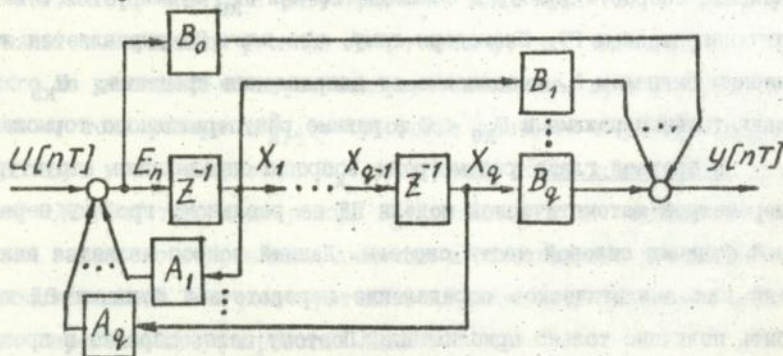


Рис.2

Согласно схеме рис.2 при скачкообразном входном воздействии ( $U[nT] = U$ ) можно записать уравнения, связывающие выходную переменную  $y$  для каждого значения  $n = 1, 2, 3, \dots$  с коэффициентами системы для любой степени  $q$  характеристического полинома. Как показали исследования при определении коэффициентов  $A_1$  по дискретным значениям выходной переменной  $y_n$ , все коэффициенты числителя, кроме  $B_q$ , можно принять равными нулю.

Следовательно, нужно определять коэффициенты знаменателя для дискретной передаточной функции:

$$W(z) = \frac{Bz^{-q}}{1 + A_1z^{-1} + \dots + A_qz^{-q}} \quad (2)$$

Так, для  $q = 3$ ,  $U = \text{const}$  можно записать зависимости:

по прямому каналу

$$y_n = E_{n-3}B, \quad y_{n+1} = E_{n-2}B, \quad y_{n+2} = E_{n-1}B; \quad (3)$$

по обратным связям

$$E_{n-1}A_1 + E_{n-2}A_2 + E_{n-3}A_3 = E_n - U. \quad (4)$$

Из (3) и (4) находим

$$E_n = (UB + y_n A_3 + y_{n+1} A_2 + y_{n+2} A_1) / B. \quad (5)$$

Записав выражение (5) для четырех смежных значений  $E$  ( $E_n$ ,  $E_{n-1}$ ,  $E_{n-2}$ ,  $E_{n-3}$ ) и решая совместно с (3), (4) систему восьми уравнений, получаем:

$$\left. \begin{aligned} y_{n+1} - y_n &= A_1(y_n - y_{n-1}) + A_2(y_{n-1} - y_{n-2}) + \\ &+ A_3(y_{n-2} - y_{n-3}); \\ y_{n+2} - y_{n+1} &= A_1(y_{n+1} - y_n) + A_2(y_n - y_{n-1}) + \\ &+ A_3(y_{n-1} - y_{n-2}); \\ y_{n+3} - y_{n+2} &= A_1(y_{n+2} - y_{n+1}) + A_2(y_{n+1} - y_n) + \\ &+ A_3(y_n - y_{n-1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Откуда находятся коэффициенты  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

В работе получена система уравнений (7), позволяющая определять коэффициенты характеристического полинома любой степени  $q$ :

$$y_{n+j} - y_{n+j-1} = \sum_{i=1}^q A_i (y_{n+j-i} - y_{n+j-i-1}), \quad j = 1, 2, \dots, q, \quad (7)$$

Искомые коэффициенты находятся решением системы алгебраических уравнений по любым  $2q + 1$  смежным значениям ординат экспериментальной переходной функции  $y[nT]$ .

$$\text{Для } q = 1 \quad A = (y_{n+1} - y_n) / (y_n - y_{n-1}).$$

Для  $q = 2$

$$A_1 = \frac{(y_{n+2} - y_{n+1})(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_{n+1} - y_n)(y_n - y_{n-1})}{(y_{n+1} - y_n)(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_n - y_{n-1})^2};$$

$$A_2 = \frac{(y_{n+1} - y_n)^2 - (y_{n+1} - y_n)(y_n - y_{n-1})}{(y_{n+1} - y_n)(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_n - y_{n-1})^2}.$$

Чтобы перейти от дискретной передаточной функции к непрерыв-

ной, нужно в последней выразить операторы  $p$  через  $z$ , используя приведенные выше соотношения. Тогда характеристический полином (1) запишется так:

$$D(z) = z^q + A_1^* z^{q-1} + A_2^* z^{q-2} + \dots + A_q^* \quad (8)$$

где  $A_1^* = f_1(T, a_1, a_2, \dots, a_q)$ ,  $\dots$ ,  $A_q^* = f_q(T, a_1, a_2, \dots, a_q)$ .

Приравняв коэффициенты с одинаковыми индексами характеристических полиномов (8) и (2),  $A_1^* = A_1$ ,  $A_2^* = A_2, \dots, A_q^* = A_q$ , получим систему уравнений, из которой находим коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_q$ . Коэффициент передачи  $K$  в выражении (1) определяется по установившемуся значению экспериментального графика  $U_{уст}$ :  $K = a_q U_{уст}$ . Поскольку степень полинома  $q$  заранее неизвестна, то предложено определять ее методом цифрового моделирования переходного процесса по полученной переходной функции для принятого ориентировочно значения  $q$ . Последовательно увеличивая  $q$  и проверяя соответствие переходной функции модели реальной, легко находится линеаризованная передаточная функция, наилучшим образом соответствующая реальному объекту.

В четвертой главе изложены вопросы построения комбинированной системы управления ВД по идентифицированной передаточной функции. Если экспериментально полученная передаточная функция силовой части имеет вид  $W(p) = \omega_d(p)/U_y(p) = K/(p^2 + a_1 p + a_2)$ , где  $U_y$  - скачкообразный сигнал на входе СИЗУ, то можно перейти к нормальной схеме, аналогичной приводу постоянного тока с электромеханической постоянной времени  $T_M = I/a_1$  и коэффициентом передачи  $K_d = I/C_d = K/a_2$ . По данным соотношениям определяется эквивалентное сопротивление якорной цепи  $R_d = T_M C_d^2 / J$  и строится система подчиненного регулирования с регуляторами тока и скорости.

Для более полной компенсации инерционности системы целесообразно использовать прямые передачи по сигналам, формируемым в ЭМ. Коэффициенты прямых передач наиболее эффективно выбирать по коэффициентам характеристического полинома идентифицированной передаточной функции контура регулирования скорости (КРС). Такая система управления справедлива и для позиционного электропривода, в котором, кроме КРТ и КРС, используется и контур регулирования положения (КРП) с регулятором положения (РП). Для управления такой системой применяется ЭМ третьего порядка, в которой формируются четыре управляющих сигнала, пропорциональных заданным диаграммам перемещения ( $U_{\Pi}$ ), скорости ( $U_{\dot{C}}$ ), ускорения ( $U_{\ddot{C}}$ ) и рывка. Для построения комбинированной системы управления экспериментально определяется передаточная функция КРС по переходной функции, получаемой подачей на вход РС скачком постоянного сигнала. В большинстве случаев достаточно представить такую модель с  $q = 2$ , т.е. передаточная функция КРС будет иметь вид, как показано на рис.3,а. Передаточная функция компенсирующей прямой передачи  $W_K(p) = U_K(p)/U_{\Pi}(p) = 1/W_{0.у}(p)$ , где  $W_{0.у}(p) = K_d K_{\Pi} / (p^3 + \alpha_1 p^2 + \alpha_2 p)$ , для ее реализации необходимы дифференцирующие звенья высоких порядков. Поэтому без применения ЭМ реализовать такую систему практически невозможно. Если же использовать дополнительные выходные сигналы ЭМ, кроме основного  $U_{\Pi}$ , то все прямые передачи будут пропорциональными. Это объясняется тем, что выходной каскад ЭМ представляет собой последовательное соединение интегрирующих звеньев, входные сигналы которых пропорциональны производным выходного сигнала последнего интегратора по времени, как показано на рис.3,б.

В данной главе приведены результаты, относящиеся к синтезу параметров ЭМ третьего порядка по желаемым диаграммам управляемых координат при заданных ограничениях. Выполнены исследования дина-

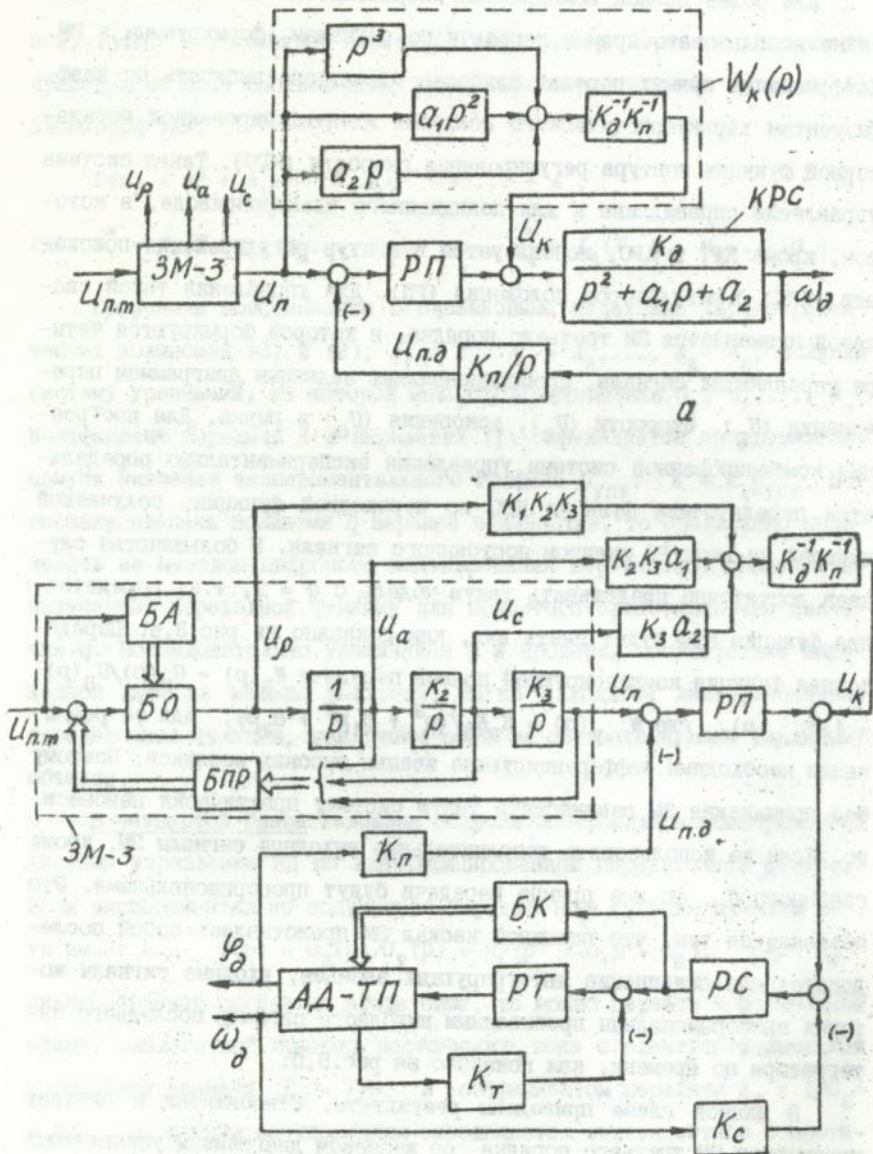


Рис.3

б

мических режимов при различных методах синтеза системы подчиненного регулирования. В заключении главы приведены алгоритмы оптимального управления электроприводом при многопериодных диаграммах скорости. Такие режимы характерны для ряда машин и механизмов, которые в силу специфических требований (из условий безопасности, высокой точности позиционирования, особенностей технологического процесса) в начале и в конце рабочего цикла или на промежуточных участках диаграммы скорости должны работать на пониженных скоростях и с меньшими ускорениями по отношению к основному режиму. Предложенные алгоритмы обеспечивают также автоматический выбор оптимальных ограничений управляемых координат при изменении режимов работы. Универсальность данных алгоритмов заключается в том, что для перехода от общей структуры значительной сложности, ориентированной на ее реализацию с помощью микроЭВМ, к более простым, достаточно изменить только входные величины.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для большого числа машин и установок, оборудованных асинхронными двигателями с фазным ротором, важной проблемой является улучшение динамических свойств такого рода привода, для которого до настоящего времени отсутствует экономичная, достаточно надежная, и обеспечивающая плавное регулирование во всех режимах работы система управления.

2. Наиболее простую схему управления, подобную приводу постоянного тока, имеет созданный в последние два десятилетия универсальный тип привода - вентильный двигатель (ВД), основу которого составляет синхронная машина. Выполненный ряд теоретических и экспериментальных исследований подтверждает возможность построения системы привода по схеме ВД на основе асинхронной машины (АМ) с фазным ротором.

3. ВД на основе АМ наряду с известными недостатками, обусловленными конструктивными особенностями самой электрической машины, имеет и определенные достоинства в случае использования в качестве индуктора статора, а в качестве якоря ротора, к которому в данном варианте привода подводится основная мощность. Такая схема является перспективной для реконструкции действующих приводов с высоковольтными АМ (шахтные подъемные машины, конвейерные установки большой мощности, турбомашин).

4. Поскольку ВД на основе АМ с фазным ротором представляет собой сложный динамический объект, математическая модель которого может быть получена только приближенно, в данной работе предложено для синтеза параметров регуляторов использовать идентифицированную передаточную функцию, полученную по реальному графику переходного процесса, снятому при наладке привода.

5. Для получения передаточной функции ВД по дискретным значениям переходной функции разработан метод, основанный на использовании Z-форм при прямом и обратном преобразовании в сочетании со схемами в переменных состояния.

6. Как показали исследования, исходя из свойств рассматриваемой системы привода при идентификации достаточно определить коэффициенты характеристического полинома дискретной передаточной функции по любым  $2q + 1$  смежным ординатам реального переходного процесса при ступенчатом входном воздействии ( $q$  - предполагаемая степень полинома). Коэффициент передачи находится по установившемуся значению контролируемой переменной.

7. Так как все вычисления, связанные с идентификацией, выполняются на ЭВМ, то реальную величину  $q$  предложено определять методом цифрового моделирования переходного процесса по полученной переходной функции для конкретного значения  $q$ . Последовательно увеличивая  $q$  и

проверяя соответствие переходной функции модели реальной, легко находится желаемая линеаризованная передаточная функция ВД.

8. Ввиду того, что в случае  $q > 2$  переход от полученной математической модели в виде дробно-рациональной функции к нормальной структуре, аналогичной силовой схеме привода постоянного тока, представляет определенные трудности, предложено применить комбинированное управление по задающему воздействию с коэффициентами прямых передач, определенными с учетом параметров идентифицированной передаточной функции объекта. При этом сохраняются контуры подчиненного регулирования тока и скорости.

9. Разработанная универсальная структурная схема управляющего алгоритма позволяет, используя многоканальную задающую модель третьего порядка в режиме комбинированного управления получить любую встречающуюся на практике диаграмму скорости. Кроме этого, данная система осуществляет автоматический выбор ограничений, удовлетворяющих определенным критериям оптимального управления.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Чермалых Т.В., Мадхи Халед Ф.А., Шабо Камил. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью. - Киев, 1994.- 49 с.- (Препр./НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 762).

2. Чермалых Т.В., Мадхи Халед Ф.А., Аль-Дсеф Ахмад. Автоматическое управление вентильным двигателем с задающими моделями // Труды 2-й Украинской конференции по автоматическому управлению, том 2. - Львов, 1995. - С.64,65.

3. Чермалых В.М., Яценко О.Я., Мадхи Халед Ф.А. Система управления сложными электромеханическими объектами с переменной структурой в

скользящем режиме // Труды 3-й Украинской конференции по автоматическому управлению, том 3. - Севастополь, 1996. - С.59,60.

4. Алгоритмы оптимального управления электроприводом с многопериодной диаграммой скорости / Чермалых В.М., Яценко О.Я., Мадхи Халед Ф.А.: Нац.техн.ун-т Украины "Киев.политехн.ин-т"- Киев, 1996. - 12 с.: ил. - Библиогр.: 2 назв. - Рус. - Деп. в УкрИНТЭИ 27.03.96, № 798 - Ук96, аннотировано ВИНТИ, 1996, № 7 (295), б/о ПБ.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: разработка структуры и алгоритмов функционирования ЗМ третьего порядка [1,3], методика выбора параметров прямых передач комбинированного управления ВД [2], Алгоритмы оптимального управления электроприводом с многопериодной диаграммой скорости [4].

Ключові слова: вентильний двигун, задавача модель, комбіноване керування, ідентифікація.

## АННОТАЦІЯ

Мадхи Халед Ф.А. Комбинированная система управления вентильным двигателем (ВД) на основе асинхронной машины с фазным ротором. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. - Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование. Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт, Киев, 1997.

Защищаются методы построения структуры и алгоритмов функционирования системы управления ВД с трехфазным индуктором и многоканальной задающей моделью, которая формирует и подает по прямым каналам на регуляторы тока и скорости оптимальные задающие воздействия. Предложено для уточнения математической модели ВД использовать действительный график переходной функции объекта, полученный при наладке привода, используя метод Z-форм совместно со схемами в переменных состояния. Получены формулы для определения коэффициентов характеристического полинома любой степени.

## ANNOTATION

Khaled Fathi Madhi. Combined sistem of control of permanent magnet motor (PMM) on the base of asynchronous machines with phases rotor. Dissertation submitted for a Technikal Sciences candidate's degree for speciality 05.09.03. - Electrotechnical Complexes and Systems Including Their Control and Regulation. National technical University of Ukraine "Kiev polytechnic institute", Kiev, 1997.

The author is defending methods of construction of structure and algorithms of function the System of control PMM with 3-Phases inductor and manychannels supplied model, which formulates and supply by direct connection or current and velocity regulator optimal supplied inf supplied influctions. The usage real graphic of transfer function of object for determination of mathematical model of PMM, received of treating the drive, using the Z-Form method with conjunction of scheme in changing condition are offering. The formulation of coefficients characteristic polinom any rang are received.

Ключові слова: вентильний двигун, задаюча модель, комбіноване керування, ідентифікація.

441317

Ав 36.772  
**Ав 36.772**

Поля, в печ. 09.07.77. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага тип. № 1. Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 1,16.  
Услови. кр.-отт. 1,27. Уч.-изд. л. 1,0.  
Тираж 100. Зак. № 7-29.

---

Фирма «ВІПОЛ»  
252151, г. Киев, ул. Волинская, 60.