

Уральский политехнический институт

имени С.М. Кирова

На правах рукописи

ЖМАК Валентина Алексеевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В
СИСТЕМЕ "НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ЧАСТОТЫ - АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ"

Специальность 08.09.01

"Электрические машины"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Свердловск, 1977

Работа выполнена на кафедре "Автоматика и телемеханика"
Челябинского политехнического института имени Ленинского
комсомола.

Научный руководитель -
кандидат технических наук, доцент

И.С. Пинчук

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
кандидат технических наук, доцент

А.А. Пястолов;

В.Н. Бреев .

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский проектно-
конструкторский и технологический институт электромашиностро-
ения (НИПТИЭМ), г. Владимир.

Защита состоится 12 декабря 1977 г., в 14 час. 45 мин.,
на заседании специализированного совета К-30/4 при Ураль-
ском политехническом институте имени С.М. Кирова.

Ваши отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенных
гербовой печатью, просим направлять по адресу:
620002 Свердловск, К-2, УПИ, главный корпус, ученому секре-
тарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат направлен 12 ноября 1977 года.

Ученый секретарь совета

П.И. Бартоломей

Актуальность проблемы. Важнейшей проблемой теории и практики современных систем управления является проблема создания частотнорегулируемых систем переменного тока с использованием короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД). АД отличается конструктивной простотой, малыми габаритами, низкой стоимостью, высоким КПД, надежностью, хорошими динамическими свойствами и практически незаменимы при работе в условиях, когда применение коллекторных машин недопустимо.

Основной задачей частотного управления является создание экономичной регулируемой быстродействующей и бесконтактной системы управления переменного тока общего назначения. Решение этой проблемы в целом можно разделить на два направления:

- создание сравнительно простых и экономичных вентильных преобразователей частоты (ВПЧ), позволяющих управлять амплитудой и частотой питающего напряжения;
- разработка теоретических основ частотного управления АД; обоснование структур систем частотного управления и способов их реализации; изучение статических и динамических режимов в системе; разработка методов расчета систем с использованием ЦВМ; исследование свойств АД как элемента системы частотного управления и т.п.

В материалах VI Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу отмечается, что многие вопросы теории и практики частотного управления еще не нашли своего решения. Это определяет необходимость проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по частотноуправляемым системам.

Цель работы. Исследование электромагнитных процессов в системе, образованной непосредственным преобразователем частоты с естественной коммутацией и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором на цифровой модели.

В связи с этим оказалось необходимым:

1. Разработать математическое описание системы "вентильный преобразователь частоты - асинхронный двигатель" для силовых схем преобразователей с непосредственной связью и естественной коммутацией тиристоров, позволяющее производить математическое моделирование:
 - в различных режимах работы асинхронного двигателя (двигательный, генераторный, реверс, торможение, разгон и т.д.);

- при различных способах управления тиристорами преобразователя в широком диапазоне регулирования выходных частот;

- с учетом процессов коммутации тиристоров.

2. Разработать методику учета в модели вытеснения тока в проводниках ротора.

3. Разработать алгоритм и программу цифрового моделирования системы "многообмоточный преобразователь частоты - асинхронный двигатель".

4. На цифровой модели системы "многообмоточный преобразователь частоты - асинхронный двигатель" исследовать:

- квазистационарные режимы системы ВПЧ-АД;

- способы управления тиристорами преобразователя в диапазоне регулирования выходных частот от нуля до частоты сети;

- влияние вытеснения тока в проводниках ротора на дополнительные потери в двигателе при питании его от непосредственного преобразователя частоты;

- гармонический состав кривых выходного напряжения, токов, потокоцеплений машины.

Методика выполнения исследований. С целью изучения электромагнитных процессов в системе ВПЧ-АД использовался метод цифрового моделирования. Математическое описание системы ВПЧ-АД с естественной коммутацией и непосредственной связью представлено дифференциальными, алгебраическими и логическими уравнениями.

Методика учета вытеснения тока основана на решении уравнений электромагнитного поля в проводящей среде в переходных режимах.

Алгоритм цифровой модели, позволяющий получить решение с заданной точностью, составлен для многоконтурных цепей с переменной структурой. Способы управления тиристорами преобразователя исследовались с помощью цифрового моделирования системы ВПЧ-АД путем анализа диапазона выходных частот преобразователя, энергетических показателей двигателя.

Научная новизна. Разработано математическое описание системы ВПЧ-АД с учетом вытеснения тока в роторе машины. Описание приведено для основных силовых схем преобразователей частоты (мостовая, нулевая, с многообмоточным трансформатором).

Разработана методика учета вытеснения тока в проводниках ротора с минимально возможным числом элементов схемы замещения, позволяющая проводить исследования системы без ограничений при

различных режимах работы двигателя.

Представлено описание алгоритма цифрового моделирования системы "многообмоточный преобразователь частоты - асинхронный двигатель", который позволяет с заданной точностью получать решение на каждом расчетном шаге.

Дано описание способов управления тиристорами силовой схемы многообмоточного преобразователя частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией.

Практическая ценность. Разработанная цифровая модель системы ВПЧ-АД для многообмоточного преобразователя частоты может быть использована для исследования различных режимов работы как самой системы, так и отдельных ее частей, например, для исследования режимов и параметров ВПЧ, нагруженного на АД, или для исследования параметров АД, питаемого от ВПЧ несинусоидальным напряжением.

Предложен способ учета вытеснения тока в проводниках ротора АД, который основан на замене проводника упрощенной схемой замещения с постоянными параметрами и минимально возможным числом элементов. Способ позволяет учитывать вытеснение тока в установившемся и в переходном режимах.

Внедрение цифровой модели как АД, так и всей системы ВПЧ-АД в практику научных исследований создает предпосылку для комплексного изучения и получения максимального количества информации о состоянии машины при питании ее синусоидальным и несинусоидальным напряжением, а также о всей системе ВПЧ-АД.

Реализация результатов исследований. Программа расчета электромагнитных процессов в короткозамкнутом АД с учетом и без учета вытеснения тока в проводниках ротора используется в отраслевой научно-исследовательской лаборатории преобразовательной техники Новосибирского электротехнического института связи, а также в научных работах проблемной лаборатории кафедры электрических машин МЭИ. Разработанный с помощью цифровой модели частотноуправляемый привод бурового станка за счет увеличения производительного времени позволяет сэкономить 8-10 тыс. рублей в год на один станок.

Апробация работы. Основные положения работы и ее отдельные разделы докладывались и обсуждались на:

- ежегодных научно-технических конференциях ЧИИ в 1970-1977 гг.
- II Всесоюзном совещании "Оптимизация систем электроснабжения"

- и режимов электропотребления в цветной металлургии", 1970 г.
- III научно-технической конференции по проблеме тиристорного асинхронного электропривода, Свердловск, 1974 г.
 - научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин переменного тока", Смоленск, 1975 г.
 - V Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, 1975 г.
 - IV научно-технической конференции по проблеме тиристорного асинхронного электропривода, Свердловск, 1977 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 статей, получено 1 положительное решение на авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация, включающая 144 страницы машинописного текста, состоит из 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан краткий обзор основных типов ВПЧ, обеспечивающих трехфазное выходное напряжение.

В работе рассматриваются только преобразователи частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией (НЧ), силовые цепи которых собраны по мостовой, нулевой, с многообмоточным трансформатором.

В работе более подробно рассматривается многообмоточный НЧ с естественной коммутацией, позволяющий получить широкий диапазон выходных частот вплоть до частоты сети. НЧ состоит из трансформатора с n комплектами трехфазных вторичных обмоток, э.д.с. которых сдвинуты по фазе на $2\pi/n$ эл. градусов сетевого напряжения (рис. 1а, $n=3$) и $3n$ тиристоров. Концы всех вторичных обмоток трансформатора присоединяются к нагрузке, а начала обмоток каждого комплекта соединяются в трехфазные группы переключкой, состоящей из трех тиристоров, включенных по кольцевой схеме. Частота и амплитуда входного напряжения НЧ формируется в соответствии с амплитудой и частотой напряжения задания, действующего в схеме управления.

Все тиристоры условно можно разбить на три группы: T_{1n} , T_{2n} , T_{3n} (n - номер переключки комплекта трехфазных вторичных обмоток), которые формируют выходные напряжения U_{a1} , U_{a2} , U_{a3} соответствен-

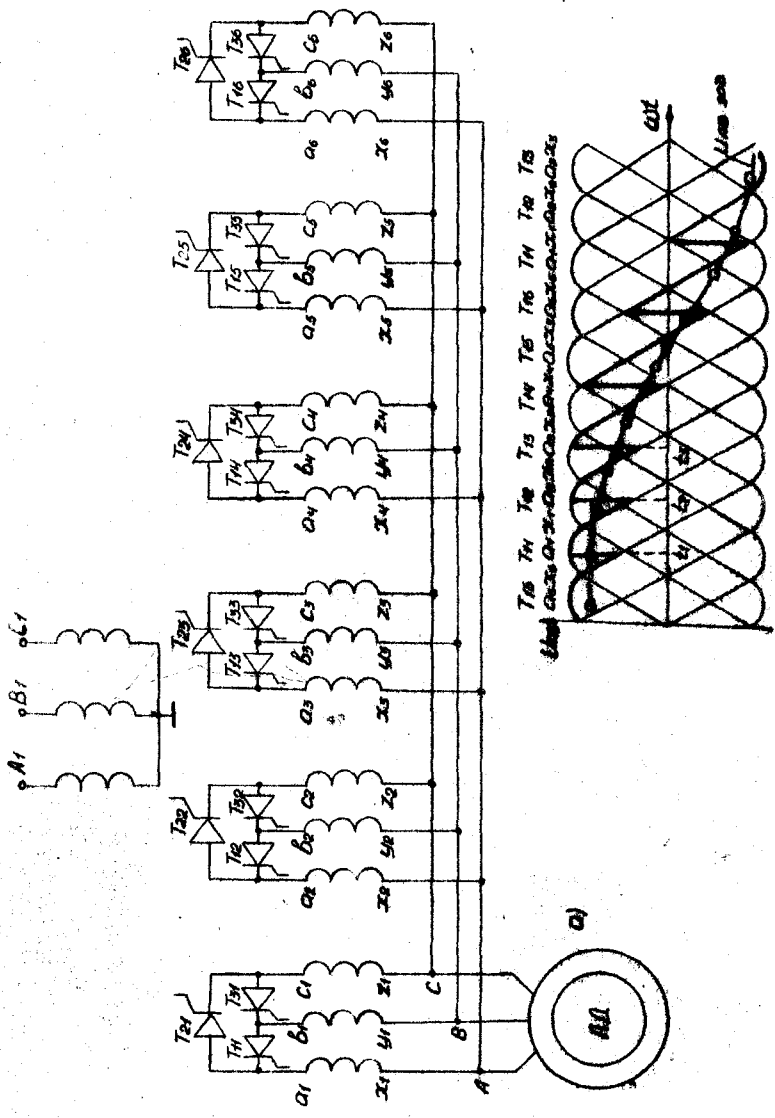


Fig. 1

5)

во. Включение любого тиристора из группы подключает к двигателю соответствующее линейное напряжение. Последовательность переключения тиристорov в группе выбирается такой, что к АД каждый раз подключается отстающее на $2\pi/n$ эл. градусов пикакшее напряжение. В результате этого происходит увеличение периода выходного напряжения. Для обеспечения трехфазного выходного напряжения ИЧ достаточно включить по одному тиристорy из двух групп. Во избежание короткого замыкания одновременное включение тиристорov из трех групп не допускается. На рис. 16 показано формирование выходного напряжения ИЧ тиристорами группы T_{1n} . В промежутке $(t_2 - t_1)$ работает T_{11} , затем схема управления дает команду на включение следующего тиристора этой группы - T_{12} . При включении T_{12} образуется контур коммутации тиристорov $a_2x_2x_1a_1y_1y_2$. После окончания процесса коммутации тиристор T_{11} выключится, а T_{12} будет продолжать формирование выходного напряжения U_{*a} . Переключение тиристорov в группе T_{1n} продолжается до тех пор, пока ток фазы А нагрузки не станет равным нулю, т.е. пока проводимость тиристорov совпадает с направлением тока нагрузки. Аналогично формируется выходное напряжение U_{*b} тиристорами группы T_{2n} . Форма напряжения, получаемого на выходе ИЧ, соответствует напряжению шестифазных схем с раздельным управлением. Сложный характер электромагнитных процессов в силовых цепях ИЧ, обусловленный непрерывным изменением углов отпирания вентилей в процессе формирования выходного напряжения вызывает значительные трудности расчетного порядка. Поэтому в настоящее время широко используется метод математического (цифрового) моделирования. Анализ состояния вопроса определил основные задачи работы.

Во второй главе рассматриваются вопросы математического описания АД с учетом вытеснения тока в проводниках ротора. Вопрос о вытеснении тока в проводниках ротора короткозамкнутого АД освещен в литературе недостаточно. Имеющиеся методы позволяют учесть эффект вытеснения тока только при синусоидальной форме и известной частоте тока ротора. При моделировании системы ИЧ-АД заранее неизвестны ни форма, ни частота тока ротора. В то же время вытеснение тока необходимо учитывать даже в квазиустановившихся режимах при малых скольжениях по основной гармонике. Поэтому необходимо разработать методику учета вытеснения тока, применимую как в квазиустановившихся, так и в переходных режимах с неизвестной заранее формой тока в роторе. Для цифровой модели описание роторной цепи АД с учетом вытеснения тока

необходимо представить в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, составляемых на основе схемы замещения роторной цепи. Схему замещения и ее параметры можно определить, исходя из приближительного соответствия либо частотных, либо временных характеристик схемы замещения соответствующим характеристикам проводника.

В работе предложена методика, основанная на решении уравнений электромагнитного поля в проводящей среде в переходных режимах (временной способ). При прямоугольной форме паза процессы в проводниках ротора описываются уравнениями вида:

$$\begin{cases} \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G_0 u(x,t) \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

где $G_0 = \frac{\gamma b}{l}$; $L_0 = \frac{\mu_0 l}{b}$; $R = \frac{1}{h G_0}$.

В этих уравнениях $i(x,t)$ представляет собой ток, протекающий в сечении проводника высотой x , в момент времени t (рис.2в), $u(x,t)$ — падение напряжения в слое, расположенном на высоте x . Уравнениям (1) соответствует схема замещения проводника ротора, представленная на рис.2а. Решение уравнений (1) для случая линейно нарастающего тока $i_0(t) = kt$ запишется:

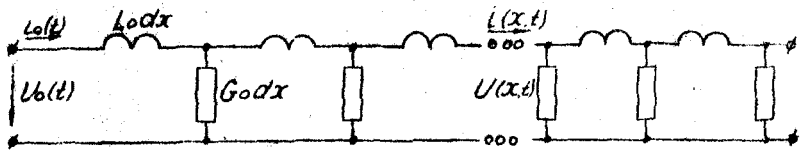
$$u(x,t) = \frac{1}{h G_0} i_0(t) + 2k \frac{h L_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cos \frac{m \pi x}{h} \cdot \frac{1}{m^2} \left(1 - e^{-\frac{m^2 \pi^2}{h^2 L_0 G_0} t} \right)$$

$$i(x,t) = \frac{x}{h} i_0(t) + 2k \frac{h^2 L_0 G_0}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \sin \frac{m \pi x}{h} \cdot \frac{1}{m^3} \left(1 - e^{-\frac{m^2 \pi^2}{h^2 L_0 G_0} t} \right)$$

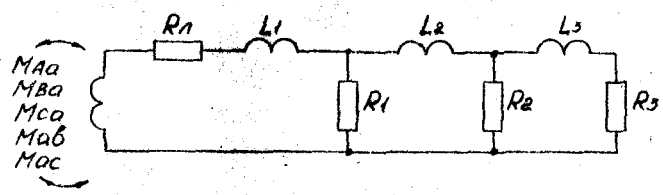
в частности, при $x=h$ активное падение напряжения в верхнем слое проводника будет:

$$u_0(t) = u(h,t) = \frac{1}{h G_0} i_0(t) + 2k \frac{h L_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left(1 - e^{-\frac{m^2 \pi^2}{h^2 L_0 G_0} t} \right) \quad (2)$$

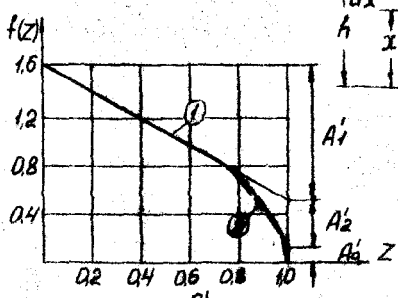
Оно же равно полному напряжению на любом слое за вычетом составляющей, обусловленной потоком Φ_1 , охватывающим весь проводник в целом (рис.2г). Последняя в схеме замещения проводника ротора (рис.2а), не учитывается, но учтена в полной схеме замещения фазы ротора АД (рис.2б). Для практических расчетов целесообразно второе слагаемое уравнения (2) (рис.2д, кривая 1) аппроксимировать более простым выражением с конечным числом членов (рис.2д, кривая 2), что соответствует переходу от схемы замещения рис.2а



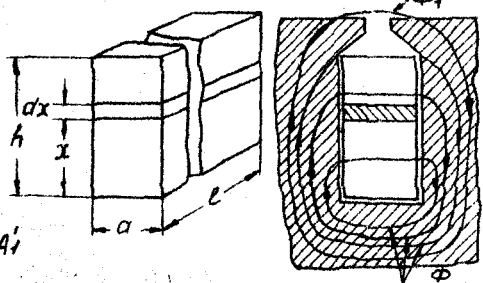
а)



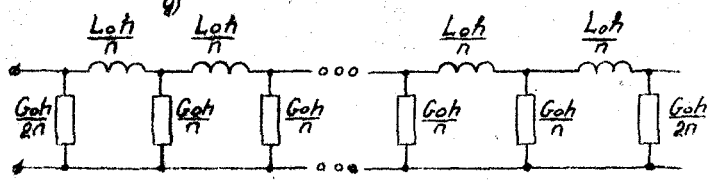
б)



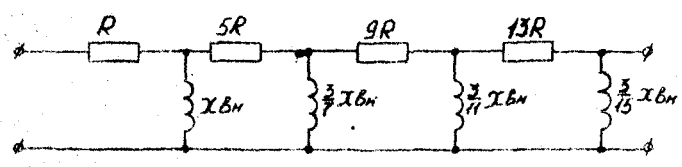
г)



д)



е)



ж)

Рис. 2

к схеме замещения с конечным числом звеньев. В большинстве случаев можно ограничиться тремя членами, чему соответствует схема замещения (рис.2б). При этом уравнение (2) примет вид:

$$U_0(t) = R \cdot i_0(t) + A_0 + A_1(1 - e^{-\alpha_1 t}) + A_2(1 - e^{-\alpha_2 t}), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= A'_0 k \frac{6}{\pi^2} L_{\text{вн}}; & \alpha_1 &= n_1 \frac{\pi^2}{h^2 L_0 C_0} = n_1 \frac{\pi^2 R}{3 L_{\text{вн}}}; \\ A_1 &= A'_1 k \frac{6}{\pi^2} L_{\text{вн}}; & \alpha_2 &= n_2 \frac{\pi^2 R}{3 L_{\text{вн}}}; & L_{\text{вн}} &= \frac{h L_0}{3}. \end{aligned}$$

Параметры схемы замещения (рис.2б) должны быть выбраны таким образом, чтобы они давали решение уравнения (3):

$$L_1 = \frac{A_0}{k}; \quad L_2 = \frac{R_1^2}{\alpha_1^2 \frac{A_1}{k} + \alpha_2^2 \frac{A_2}{k}}; \quad R_1 = R + \alpha_1 \frac{A_1}{k} + \alpha_2 \frac{A_2}{k};$$

$$\begin{aligned} R_2 &= L_2 \frac{\alpha_1^3 A_1 + \alpha_2^3 A_2}{\alpha_1^2 \frac{A_1}{k} + \alpha_2^2 \frac{A_2}{k}} - R_1; & L_3 &= \frac{L_2 R_2 (\alpha_1^3 A_1 + \alpha_2^3 A_2) - R_1 R_2 (\alpha_1^2 A_1 + \alpha_2^2 A_2)}{L_2 (\alpha_1^4 A_1 + \alpha_2^4 A_2) - (R_1 + R_2) (\alpha_1^3 A_1 + \alpha_2^3 A_2)}; \\ R_3 &= \frac{R_1 R_2 (\alpha_1^3 A_1 + \alpha_2^3 A_2) - [L_2 R_2 + L_3 (R_1 + R_2)] (\alpha_1^4 A_1 + \alpha_2^4 A_2) + L_2 L_3 (\alpha_1^5 A_1 + \alpha_2^5 A_2)}{L_2 (\alpha_1^4 A_1 + \alpha_2^4 A_2) - (R_1 + R_2) (\alpha_1^3 A_1 + \alpha_2^3 A_2)}. \end{aligned}$$

На рис.2д кривой 2 представлена аппроксимирующая функция второго слагаемого уравнения (2) при $n_1=1$; $n_2=6$; $A'_0=0,143$; $A'_1=1$; $A'_2=0,5$. При этих значениях коэффициентов аппроксимации параметры схемы замещения будут равны:

$$R_1 = 9R; \quad R_2 = 3,23R; \quad R_3 = 1,73R; \quad L_1 = 0,0869 L_{\text{вн}}; \quad L_2 = 0,648 L_{\text{вн}}; \quad L_3 = 1,21 L_{\text{вн}}.$$

Для определения параметров схемы замещения необходимо знать лишь активное сопротивление проводника R , высоту паза h и удельную электропроводность материала проводника γ .

Кроме того, в работе рассмотрены способы представления схемы замещения проводника ротора при равномерном делении его по высоте на слоев (рис.2е) и частотный способ учета вытеснения тока при неравномерном делении проводника ротора на слои. Для сравнения на рис.3 представлены кривые $K_r = f(\xi)$, $K_x = f(\xi)$ для трехзвенных схем замещения рассматриваемых способов учета вытеснения тока в роторе в установившемся режиме и при синусоидальной форме тока в роторе. Рассмотрение кривых (рис.3) показывает, что: 1) способ равномерного деления проводника по слоям (кривые 2³) имеет большую погрешность, однако, такой способ учета вытеснения тока в роторе дает более наглядную картину распределения тока по высоте проводника ротора; 2) сравнивая частотный (кривые 2³) и временной (кривые 4³) способы учета вытеснения тока при неравномерном делении проводника по слоям, необходимо отметить,

что для трехзвенных схем замещения точность временного способа выше. Увеличивая количество звеньев в схеме замещения, можно улучшить точность учета вытеснения тока в роторе. С другой стороны, увеличение числа звеньев схемы замещения приводит к увеличению числа дифференциальных уравнений, описывающих роторную цепь. В работе принят временной способ учета вытеснения тока, схема замещения роторной цепи АД представлена на рис.26. Данный способ позволяет учесть вытеснение тока в проводниках ротора как в установившемся так и в переходном режимах работы АД.

Учет степени насыщения главного магнитопровода АД осуществляется с помощью зависимости индуктивности намагничивающего контура от величины результирующего вектора потокоцеплений машины, создаваемого токами фаз двигателя.

В третьей главе рассматриваются вопросы математического описания системы НИЧ-АД трех силовых схем преобразователей (мостовая, нулевая, с многообмоточным трансформатором). В уравнениях системы НИЧ-АД не учитывались: потери в стали, активные сопротивления обмоток трансформатора, намагничивающий ток трансформатора, обратный ток при отключенном и прямое падение напряжения при включенном состоянии тиристора, параметры комплектов вторичных обмоток трансформатора полагаем одинаковыми, коэффициент трансформации равен единице.

В системе НИЧ-АД рассматривается АД с короткозамкнутым ротором с учетом насыщения стали главного магнитопровода и вытеснения тока в проводниках ротора. При цифровом моделировании АД совместно с НИЧ использованы непреобразованные уравнения АД, т.к. из-за нелинейности характеристик тиристоров применение преобразованных уравнений машины затруднительно. Уравнения, описывающие систему НИЧ-АД с мостовой, нулевой схемами, имеют одинаковый вид. В уравнениях системы НИЧ-АД с многообмоточным трансформатором имеются некоторые отличия, вызванные наличием многообмоточного трансформатора.

На алгоритм цифровой модели оказывает существенное влияние тип выбранной ЦВМ и ее математическое обеспечение. Для реализации предлагаемой модели использовалась ЦВМ Минск-22М в режиме Г. В алгоритме цифровой модели рабочая система дифференциальных уравнений состоит из постоянно включаемых дифференциальных уравнений, описывающих АД, и уравнений, входящих в работу в соответствии с контурами, образованными включенными тиристорами. Для вновь вводимых дифференциальных уравнений определяются начальные

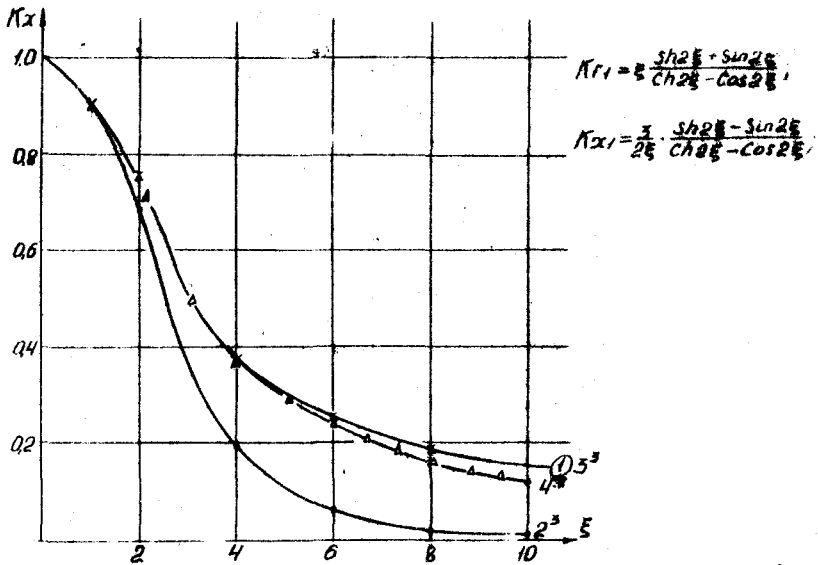
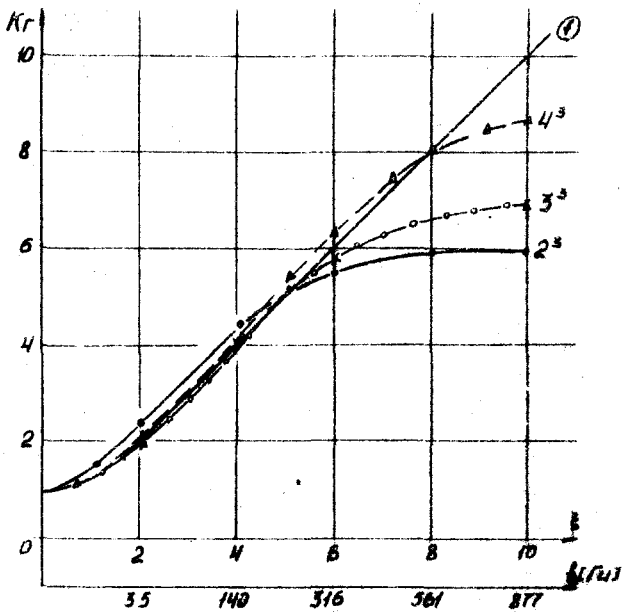


Рис. 3

условия. Соответственно перестраиваются и алгебраические уравнения, вычисляется порядок системы алгебраических и дифференциальных уравнений. Затем определяются переменные коэффициенты дифференциальных и алгебраических уравнений, зависящие от суммарного вектора потокосцеплений машины (учет степени насыщения главного магнитопровода АД). Далее осуществляется численное интегрирование рабочей системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага. В рассматриваемом алгоритме цифровой модели потокосцепления статора АД определяются с заданной точностью на каждом шаге интегрирования. Избежать погрешности при определении неявных переменных, зависящих от шага интегрирования, удалось с помощью введения новых переменных. Программа, реализующая описанный алгоритм, составлена для ЦМ Минск-22м, занимает в МОЗУ 17173₃ ячейки и позволяет исследовать как статические, так и динамические процессы в системе ПЧ-АД.

В четвертой главе рассматриваются вопросы управления тиристорами преобразователей частоты с непосредственной связью и результаты моделирования конкретной системы.

Известно, что максимальная частота для нулевой схемы ПЧ составляет не более 0,3 частоты сети; для мостовой схемы - 0,5 частоты сети. Для исследуемого многообмоточного ПЧ рассмотрены некоторые способы управления тиристорами, оценки эффективности которых определялась по диапазону плавнорегулируемой выходной частоты преобразователя, т.е. по величине достижимой частоты вращения АД, по степени подавления субгармоник в кривых потокосцеплений и токов АД, по отклонению потокосцеплений и токов машины от первой гармоники, по величине дополнительных потерь мощности в обмотках АД и т.д. Подробнее исследовался следующий способ управления тиристорами ПЧ, использующий обратную связь по потокосцеплениям, т.к. именно форма кривой потокосцеплений определяет, в первую очередь, дополнительные токи, моменты и потери мощности, обусловленные несинусоидальностью питающего напряжения.

Исследовалась система ПЧ-АД в диапазоне выходных частот преобразователя от 0 до 0,95 частоты сети на холостом ходу, под нагрузкой, в генераторном режиме АД. Во всех режимах моделирование проводилось с учетом и без учета вытеснения тока в роторе АД. Пример расчета приведен на рис.4, где показаны кривые линейного напряжения $U_{\Delta b}$, токов статора и ротора, момента, заданных и фактических потокосцеплений машины при указанных на рисунке выходной частоте ПЧ и скорости вращения АД в квазиустановившем-

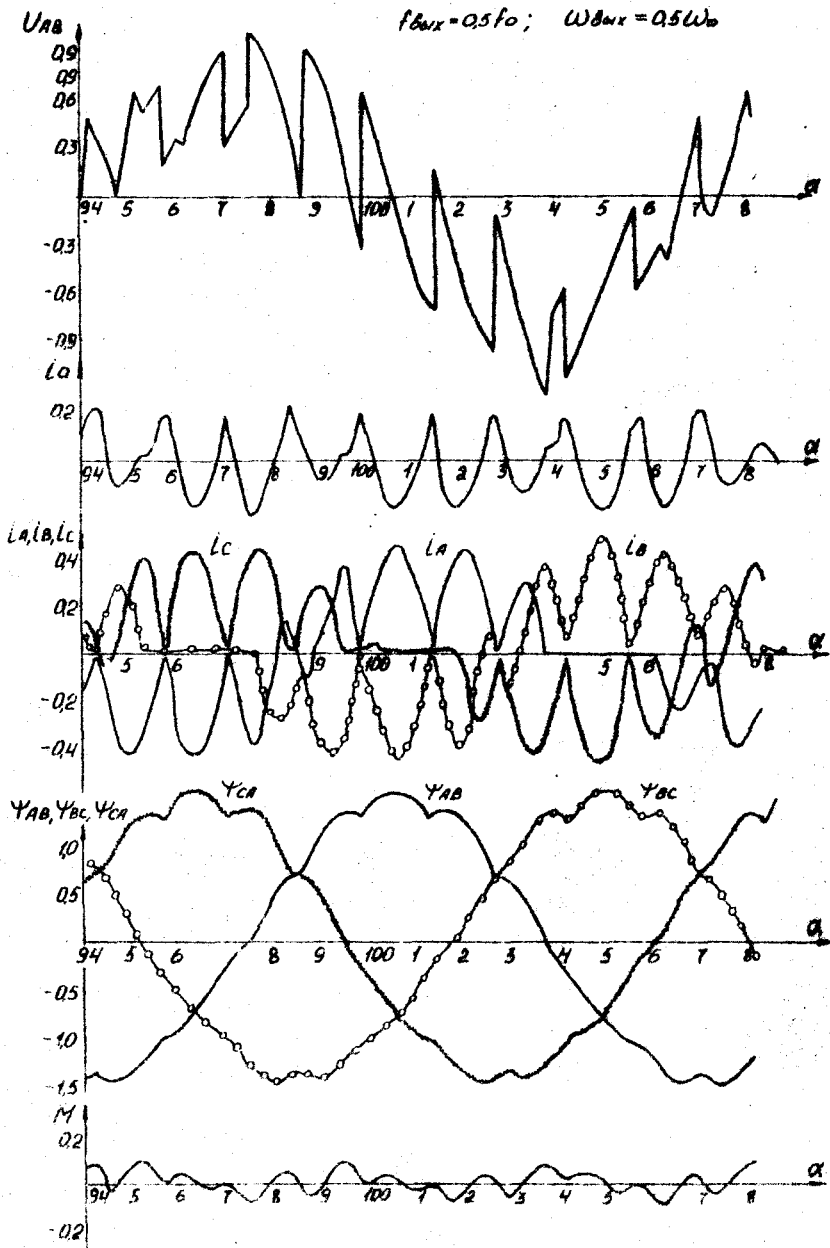


Fig. 4

ся режиме. Следует отметить, что при данном способе управления тиристорами ПЧ наблюдаются однофазные режимы, а при частотах более $2/3$ частоты сети кратковременное полное отключение АД от сети. Появление неполнофазных режимов способствует уменьшению отклонений потокосцеплений от синусоидальной кривой и позволяет расширить диапазон регулирования частоты вращения АД без резкого увеличения дополнительных моментов и потерь мощности. С целью определения величины дополнительных потерь мощности в обмотках АД, обусловленных несинусоидальностью питающего напряжения и вытеснения тока в проводниках ротора, были проведены расчеты системы ПЧ-АД и отдельно АД, питаемого синусоидальным напряжением, равным по амплитуде первой гармонике несинусоидального напряжения питания АД в системе ПЧ-АД в квазиустановившемся режиме. Увеличение потерь мощности в обмотках ротора объясняется как несинусоидальностью питающего напряжения, так в значительной степени вытеснением тока в проводниках ротора, например, для АД типа АС2-82-6 потери мощности в проводниках ротора составляют $(1,2+1,5)P_{гном}$.

С целью выявления гармонического состава кривых выходного напряжения, токов и потокосцеплений АД были рассчитаны коэффициенты Фурье для массивов названных величин системы ПЧ-АД с помощью ЦМ Минск-22М. Анализ полученных результатов разложения показывает, что гармонический состав зависит от выходной частоты и режима работы АД. При питании АД от ПЧ кривые выходных напряжений преобразователя не полностью симметричны. Первые гармоники токов и потокосцеплений двигателя, выходных напряжений ПЧ практически симметричны, т.к. в системе управления тиристорами задается симметричная система потокосцеплений, а высшие гармоники - не симметричны. В гармоническом составе содержится весь спектр гармоник, в том числе гармоники кратные трем, отсутствующие в симметричных трехфазных системах.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанное математическое описание системы ПЧ-АД позволяет рассчитать как установившиеся так и переходные процессы с учетом коммутации тиристоров, вытеснения тока в роторе при различных режимах работы двигателя в широком диапазоне выходных частот.
2. Существующие схемы ПЧ (мостовая, нулевая, с многосмоточным

трансформатором) описывается уравнениями одинакового вида.

3. Предложенный алгоритм цифровой модели для многоконтурных цепей с переменной структурой позволяет получить решение с заданной погрешностью на каждом расчетном шаге. Создана цифровая модель, позволяющая исследовать статические и динамические режимы в системе НЧ-АД в различных режимах работы АД и НЧ.

4. Предложена силовая схема многообмоточного НЧ с естественной коммутацией. При одинаковой форме выходного напряжения предлагаемая силовая схема преобразователя имеет вдвое меньшее количество тиристоров по сравнению с мостовой схемой, а следовательно и более простую схему управления преобразователем.

5. Принятый способ управления тиристорами многообмоточного НЧ допускает плавное регулирование выходной частоты от нуля до частоты питающей сети при удовлетворительных энергетических показателях АД.

6. Предложен способ учета вытеснения тока в проводниках ротора АД, питаемого от НЧ, который основан на замене проводника упрощенной схемой замещения с постоянными параметрами и минимально возможным числом элементов. Способ позволяет учитывать вытеснение тока как в установившемся, так и переходном режимах.

7. Методика определения параметров упрощенной схемы замещения базируется на строгом решении уравнений электромагнитного поля в проводнике ротора в переходных режимах.

8. Сравнение способов учета вытеснения тока в установившемся режиме и при синусоидальных токах ротора показывает, что способы неравномерного деления проводника на слои имеют более высокую точность по сравнению с равномерным способом деления при одинаковом числе слоев проводника.

9. Исследование системы НЧ-АД в квазиустановившемся режиме с учетом вытеснения тока в проводниках ротора показало, что дополнительные потери мощности в обмотках ротора возрастают при питании АД от НЧ. Поэтому пренебрегать явлением вытеснения тока в роторе нельзя, даже при малых скольжениях по основной гармонике.

10. Гармонический состав кривых выходного напряжения, токов и потокосцеплений АД зависит от выходной частоты НЧ и режима работы АД. При питании АД от НЧ высшие гармоники образуют несимметричные системы, в связи с чем присутствуют гармоники, кратные трем.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. И.С. Пинчук, А.Н. Салтыков, В.А. Жмак, В.Н. Калинин. "Преобразова-

- гель частоты с непосредственной связью. В сб.: Оптимизация систем энергоснабжения и режимов электропотребления в цветной металлургии, М., Дзеджетинформация, 1970.
2. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Метод оценки колебаний магнитного потока в асинхронном двигателе при питании от ТПЧ. Там же.
 3. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Метод определения дополнительных токов при питании двигателя от преобразователя частоты. В сб.: Вопросы автоматизации и защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий. Чебоксары, ЧГУ, 1971.
 4. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Об оценке дополнительных моментов асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты. В сб.: Приборы и устройства автоматики и телемеханики. № 132. Челябинск, ЧПИ, 1974.
 5. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Исследование статических режимов преобразователя частоты. Там же.
 6. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Анализ работы ТПЧ с помощью ЦВМ. В сб.: Электроснабжение и автоматизация промышленных предприятий. Ч. 2. Чебоксары, ЧГУ, 1975.
 7. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Методика расчета вытеснения тока в роторе короткозамкнутого асинхронного двигателя при питании от статического преобразователя частоты. РЖ ВНИИИ Электротехника и энергетика, св. г. №9, 1975, реф. 9435.
 8. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Метод оценки дополнительных моментов асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты. В сб.: Электрооборудование промышленных предприятий. Чебоксары, ЧГУ, 1976.
 9. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Вентильный преобразователь частоты с непосредственной связью. Заявка № 1370783/09 от 24.01.77 (положительное решение).
 10. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Преобразователь частоты с непосредственной связью. В сб.: Приборы и устройства автоматического регулирования. №33, Челябинск, ЧПИ, 1971.
 11. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Метод оценки колебаний магнитного потока в асинхронном двигателе при питании от ТПЧ. Там же.
 12. Пинчук И.С., Салтыков А.Н., Жмак В.А., Калинин В.Н. Система частотного управления асинхронным двигателем. В сб.: Информационно-управляющие системы и устройства. № 183, ЧПИ, Челябинск, 1975.