

Глинкин Михаил Евгеньевич

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ**

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Липецк-2004

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор КАЛИНИН В.Ф.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор МЕЩЕРЯКОВ В.Н.;

кандидат технических наук

ЧЕНЦОВ К. Ю.

Ведущая организация

Тамбовский военный авиационный инженерный институт (г. Тамбов)

Защита диссертации состоится 09 апреля 2004 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 в Липецком государственном техническом университете по адресу: 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, административный корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Липецкого государственного университета.

государственного технического университета.

Автореферат разослан « » марта 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



В.И. Бойчевский

Подписано к печати 25.02.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 154

Издательско-полиграфический центр ТГТУ

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется использованием промышленными предприятиями энергоемких электрических аппаратов, в том числе электродвигателей, для которых затраты на электроэнергию являются основополагающими. Электродвигатели переменного тока, в частности асинхронные двигатели (АД), находят очень широкое применение ввиду их простоты, надежности и безопасности в химическом и взрывоопасном производствах. Высокие эксплуатационные показатели АД предъявляют аналогичные требования к системам автоматического управления ими. Однако в настоящее время эти системы не отвечают указанным требованиям, сложны и громоздки и снижают достоинства АД. Оптимизация процесса управления позволяет экономить до 17 % потребляемой электроэнергии за счет снижения потерь в АД. Самый прогрессивный способ управления – частотный – требует применения специальных тиристорных преобразователей частоты, стоимость которых в 5 – 10 раз больше, а надежность – на порядок ниже, чем самого АД, из-за большого числа коммутирующих силовых элементов. Таким образом, разработка метода проектирования системы частотного управления АД с функциями регулирования, реализованными на информационном уровне, универсальной силовой частью и согласованными с ними аппаратными и метрологическими средствами, математическим и программным обеспечением, является актуальной задачей.

Цель работы: создание метода проектирования системы частотного управления асинхронным двигателем с широтно-импульсным регулированием в широком диапазоне с заданной точностью.

Идея работы заключается в разработке метода проектирования системы частотного управления асинхронным двигателем с широтно-импульсным регулированием путем формирования многоступенчатого напряжения на статоре, учитывающего технологические особенности работы асинхронного двигателя.

В ходе работы ставились и решались следующие задачи:

- информационный анализ известных методов проектирования систем частотного управления АД;
- математическое моделирование частотного регулирования как системы управляемых выпрямителя, инвертора и асинхронного двигателя;
- создание испытательного стенда на базе АД, проведение экспериментальных исследований;
- оценка эффективности результатов, полученных в ходе экспериментов и математического моделирования.

Методы исследования. Поставленные задачи решались методами математического моделирования с помощью специализированного программного обеспечения, численными методами решения с помощью ЭВМ, методом экспериментального подтверждения.

Научная новизна:

- создан метод проектирования системы частотного управления АД с широтно-импульсным регулированием для определения характеристик управляемых многофазных выпрямителя и инвертора;
- предложена универсальная математическая модель для синтеза и анализа преобразователей электроэнергии с амплитудно-частотно-широтным управлением;
- разработан способ частотного регулирования многофазного преобразователя электроэнергии с широтно-импульсным формированием многоступенчатого напряжения за счет программного управления с заданной точностью в широком диапазоне.

Практическая ценность. На основании метода проектирования системы частотного управления АД разработаны:

- архитектура на уровне схем аппаратных средств и блок-схем программного обеспечения управляемых выпрямителей и инверторов, согласованная с информационными процессами преобразования энергии;

– алгоритмы и схемы интерфейсов измерения скорости, управления частотой и напряжением для регулирования АД;

– пакет программ моделирования для оценки эффективности системы частотного управления АД, доказывающей снижение на порядок погрешности регулирования, расширение диапазона регулирования с заданной точностью, что обеспечивает уменьшение потерь в АД на 17 % .

Достоверность полученных результатов подтверждается математическим моделированием, результатами проведенных экспериментальных исследований и сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории электропривода.

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли применение на ОАО «ЭЛТРА» г. Рассказово, а также используются в учебном процессе по курсам «Физика нелинейных элементов», «Автоматизированный электропривод» и на практике в лаборатории «Применение микропроцессорной техники в ВЭЛ» кафедры «Электрооборудование и автоматизация» ТГТУ. Ожидаемый экономический эффект составит около 160 тыс. руб. в год.

Апробация результатов работы. Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на Международной научно-технической конференции «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация» (Гомель, 2001), VI научно-технической конференции ТГТУ (Тамбов, 2001), 9-й Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника и энергетика» (Москва, 2003), VIII научной конференции ТГТУ (Тамбов, 2003), VI Международной научно-методической конференции «НИЭТ-2003» (Астрахань, 2003).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Общий объем диссертации 156 страниц, в том числе 125 страниц основного текста, 62 рисунка, список литературы из 75 наименований, 5 приложений на 25 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности внедрения метода проектирования системы частотного управления АД, сформулирована цель и определены задачи работы, изложена научная новизна и практическая ценность диссертации.

В первой главе представлен анализ известных решений частотного управления АД и выявлена информационная технология разработки преобразователей энергии, целесообразная для создания метода проектирования системы частотного управления АД. Показаны недостатки жесткой структуры регулирования, приводящие к управлению по фиксированному алгоритму, без учета физики работы выпрямителей и инверторов. Проанализированы схемотехника управляемых вентилях, которые не позволяют согласовать между собой аппаратные средства и программное обеспечение, алгоритмы математического обеспечения и метрологические средства. Выявлены закономерности эволюции привода в электро-механический преобразователь энергии по вектору научно-технической революции за счет интеграции механизации и автоматизации, электрификации и инфор-

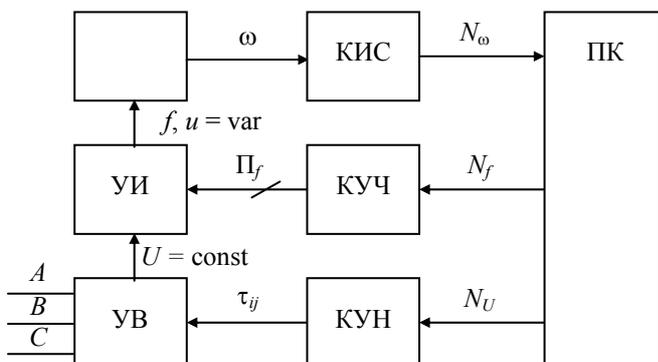


Рис. 1. Обобщенная схема управления

матизации для организации информационной методики проектирования системы частотного управления АД. Предложена обобщенная схема (рис. 1) системы управления АД, организующая следящую обратную связь асинхронного двигателя (АД), последовательно включенного в цепь управляемых инвертора (УИ) и выпрямителя (УВ), связанных с персональным компьютером (ПК) соответственно по каналам измерения скорости (КИС), управления частотой (КУЧ) и напряжением (КУН). Создан метод проектирования системы частотного управления АД для автоматизации технологических процессов и электрооборудования. Приведен синтез и анализ архитектуры на структурном уровне. Доказана низкая эффективность частотного управления АД из-за несогласованных информационных процессов преобразования энергии его компонент, проектируемых комбинаторными методами итерационного анализа. Выявлена информационная технология проектирования преобразователей энергии, целесообразная для создания метода проектирования системы управления асинхронным двигателем.

Во второй главе развит метод проектирования системы частотного управления АД с широтно-импульсным регулированием. Создана универсальная математическая модель для проектирования адекватных физике преобразователей электроэнергии с амплитудно-частотно-широтным управлением. Синтезирован n -фазный мостовой управляемый выпрямитель в основных формах представления функции: структурных схемах и формулах, таблицах состояния и семействах временных диаграмм, с жесткой структурой и регламентированным алгоритмом, задаваемым сетью. Структурной схеме выпрямителя сопоставлен сигнальный граф, которому по законам Кирхгофа соответствует математическая модель:

$$U_B = \sum_{j=1}^{2m} \sum_{n=1}^m A_n (\alpha_{j,2n-1} + \alpha_{j,2n}); \quad \alpha_{2n-1} = \frac{Y_{2n-1}}{\sum_{n=1}^3 Y_{2n-1}}; \quad \alpha_{2n} = \frac{Y_{2n}}{\sum_{n=1}^3 Y_{2n}}, \quad (1)$$

где Y_i – проводимости вентиля выпрямителя. Алгоритм работы выпрямителя в соответствии с математической моделью (1) однозначно определяется таблицей кодов для анодной 1, 3, 5 и катодной 2, 4, 6 групп вентиля и таблицей состояния выпрямленного напряжения U на нагрузке (табл. 1). Алгоритм коммутации тиристоров определяется циклической последовательностью изменения значения амплитуды U_i на нагрузке по правилу:

$$\text{если } U_i \begin{cases} < U_{0i} \\ \geq U_{0i} \end{cases}, \text{ то } Y_{2n-1}, Y_{2n} \Rightarrow \begin{cases} 0 \\ \infty \end{cases}. \quad (2)$$

Показана прямая зависимость между абсолютной Y_i и нормированной (относительной) α_i электропроводностями, связанными мнемоническим правилом

$$\text{если } Y_i \Rightarrow \begin{cases} 0 \\ \infty \end{cases}, \text{ то } \alpha_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}. \quad (3)$$

Принцип аналогии между физикой и мнемотехникой позволяет трактовать нормированную проводимость $\alpha_i = \{0,1\}$ как вес единичного кода N позиционного типа: $N = \sum_{i=1}^{2n} \alpha_i 1_i$. Например, для пятого такта трехфазного выпрямителя (табл. 1) код $N_5 = \{001100\}$ соответствует позициям $\{\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6\}$, поэтому в пятом состоянии цикла работы моста $\alpha_5 = \alpha_2 = 1, \alpha_i = 0$ для $i \neq 2; 5$. После подстановки найденных значений в модель (1), находим напряжение на нагрузке $U_5 = A\alpha_2 + C\alpha_5$ или амплитуду напряжения в пятом такте алгоритма $U_5 = C - A$.

Таблица 1

Коды (а) и состояния (б) трехфазного мостового выпрямителя

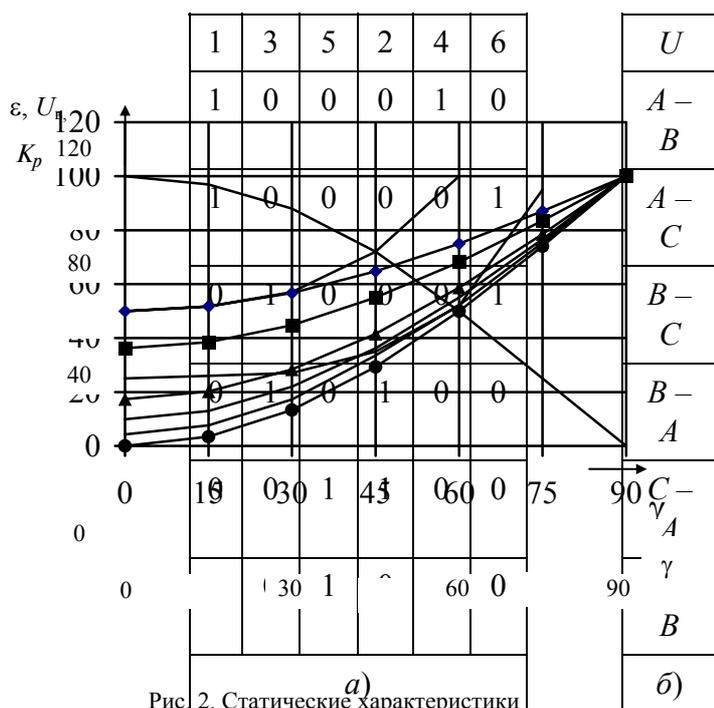


Рис. 2. Статические характеристики многофазных выпрямителей

Таблица 1 отражает жесткий алгоритм работы выпрямителя, регламентируемый сетью, в соответствии с временными диаграммами, адекватными физике процессов выпрямления энергии. Показано, что статическая характеристика $U(\gamma)$ связывает амплитуду U_B средневывпрямленного значения с углом регулирования γ по закону косинуса от максимума до нуля при увеличении коэффициента пульсации K_p и погрешности ϵ выпрямления по обратной функции (рис. 2). Трехфазный инвертор, как логическое развитие выпрямителя, спроектирован в согласованных формах техники и науки: аппаратных средствах и программном обеспечении, математическом обеспечении и метрологических средствах.

Многофазный инвертор спроектирован по принципам аналогии и инверсии с выпрямителем и позволяет осуществлять программное управление в широком диапазоне в соответствии с математической моделью:

$$U_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\xi_{j,2k-1} E_1 + \xi_{j,2k} E_2); \quad (4)$$

$$\xi_{j,2k-1} = \frac{Y_{j,2k-1}}{Y_{jk}}; \quad \xi_{j,2k} = \frac{Y_{j,2k}}{Y_{jk}}; \quad \xi_{j,2k-1} = \frac{Y}{Y_{jk}},$$

где $Y_{jk} = Y_{2k-1} + Y_{2k} + Y$ – суммарная проводимость k -го фазного узла структуры инвертора на j -м состоянии, причем четные $\xi_{j,2k}$ и нечетные $\xi_{j,2k-1}$ веса кодов N_j инвариантны прямым $\alpha_{j,k}$ и инверсным $\overline{\alpha}_{j,k}$ термам физического состояния проводимости вентиля инвертора, аналогичному алгоритму (3) выпрямителя. Схема инвертора функционирует по программе, заданной таблицей коммутации (табл. 2), по математической модели (4), согласно алгоритмам коммутации (последовательного, параллельного или смешанного) вентиля, в зависимости от схем включения нагрузки «звезда» или «треугольник», в соответствии с временными диаграммами, адекватными физике процессов инвертирования энергии. В отличие от выпрямителя, функционирующего по жесткому алгоритму электрической сети (табл. 1), таблица 2 отражает гибкий алгоритм работы инвертора, задаваемый программно по смешанному закону коммутации для нагрузки, включенной по схеме «звезда».

Таким образом, создана универсальная математическая модель программно-управляемых многофазных выпрямителя и инвертора с нормированными параметрами проводимостей тиристоров, определяемых кодами и алгоритмами коммутации по таблицам состояния, для проектирования адекватных физике преобразователей электроэнергии с амплитудно-частотно-широтным управлением. Предложен метод проектирования

Таблица 2

Таблицы коммутации (а) и состояния (б) инвертора

1	3	5	2	4	6
1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0
0	0	1	0	1	0
а)					

A	B	C
2	-4	2
3	-3	0
4	-2	-2
3	0	-3
2	2	-4
0	3	-3
-2	4	-2
-3	3	0
-4	2	2
-3	0	3
-2	-2	4
0	-3	3
б)		

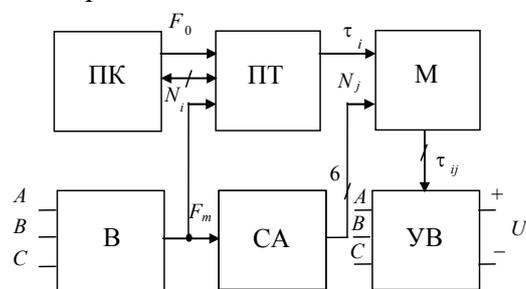
системы частотного управления асинхронным двигателем с гибкой архитектурой, информативным математическим обеспечением и эффективными метрологическими средствами для определения характеристик управляемых многофазных выпрямителя и инвертора.

В третьей главе разработан способ формирования выходного напряжения преобразователя постоянного напряжения в многофазное многоступенчатое напряжение, за счет широтно-импульсного управления частотой и амплитудой с программной точностью. В отличие от известных решений, способ позволяет повысить на порядок точность регулирования параметров выходного напряжения. Ступенчатое напряжение U_j (рис. 3, а, б, в) на нагрузке получают коммутацией анодных $2k - 1$ и катодных $2k$ ключей инвертора по циклической программе, составленной по математической модели (4), состоящей из последовательности j состояний, определяемых j -ми строками таблицы коммутации (табл. 2), что соответствует последовательному, параллельному и смешанному соединению источника энергии и нагрузки. Управление напряжением на нагрузке производится по широте импульсов τ . Измеряют действующее значение ступенчатого напряжения U_j , которое сравнивают с мерой U_s :

$$\text{если } U_j \begin{cases} < \\ \geq \end{cases} U_s, \text{ то } \tau = \begin{cases} \tau + \Delta\tau \\ \tau - \Delta\tau \end{cases}, \text{ так как } \xi_{j,k} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \text{ для } j = \begin{cases} j+1 \\ j-1 \end{cases}. \quad (5)$$

Управляют амплитудой ступенчатого напряжения U_j относительно амплитуды эталонного сигнала U_3 по алгоритму (5) за счет изменения шириты импульса τ длительностью Δt последовательности «1» в первом столбце таблицы коммутации (табл. 2, а). При амплитуде ступенчатого напряжения U_j меньшей амплитуды эталонного сигнала U_3 , добавляют число «1» при возрастании напряжения (уменьшают при убывании напряжения), добиваясь минимальной разницы амплитуд ступенчатого напряжения U_j и эталонного сигнала U_3 , определяемого заданной погрешностью, регламентированной одним состоянием (рис. 3).

По информационной методике спроектированы каналы управления напряжением, частотой и скоростью вращения асинхронного двигателя, приведены примеры реализации интерфейсов. Предложена реализация



канала управления напряжением (КУН) асинхронного двигателя в основных формах архитектуры: аппаратных средствах и программного обеспечения. Спроектирован канал управления частотой вращения асинхронного двигателя в

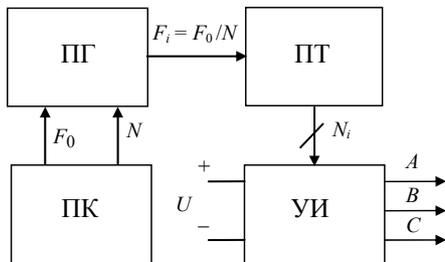


Рис. 5. Структурная схема канала управления частотой

низации коммутации тиристоров управляемого инвертора (УИ) из кода компьютера (ПК) и тактовой частоты F_0 микропроцессора ПК.

$N = N_f$ персонального

Синтезирован канал измерения скорости вращения асинхронного двигателя на базе многофазного трансформатора по информационной технологии в комбинаторной и матричной логике. Приведен расчет первичного преобразователя на уровне мнемо- и схемотехники (программ и таблиц истинности, принципиальных и функциональных схем).

Таким образом, разработан способ регулирования многофазного амплитудно-частотного преобразователя скорости вращения двигателя с программным обеспечением на уровне электроэнергии с широтно-импульсным формированием многоступенчатого напряжения за счет программного управления с заданной точностью в широком диапазоне. Спроектированы интерфейсы управления частотой, напряжением и скорости в виде блок-схем программ, таблиц коммутации тиристоров и таблиц состояния напряжения на нагрузке, обеспечивающие снижение потерь в асинхронном двигателе.

В четвертой главе проводится оценка эффективности системы частотного управления с широтно-импульсным регулированием с помощью программного комплекса MathCad для операционной системы Windows. Для моделирования работы управляемого выпрямителя разработана программа, позволяющая анализировать характеристики выходного напряжения n -фазного выпрямителя по методу спектрального анализа. Управляемый n -фазный инвертор смоделирован в программах для нагрузок, соединенных по схемам «звезда» и «треугольник» соответственно. Результаты, полученные с помощью ПК, сопоставляются с данными, снятыми экспериментально с выпрямителя и инвертора. Согласно математической модели n -фазного управляемого выпрямителя (1) разработана программа, моделирующая его работу, с помощью которой сняты характеристики выпрямителя (рис. 6): амплитуды выпрямленного напряжения U_v , коэффициента пульсаций K_p , погрешности выпрямления ε и относительной погрешности при пульсации ε_p в зависимости от угла открытия вентилей γ . Показано, что диапазон регулирования управляемого выпрямителя ограничивается коэффициентом пульсации и составляет $0 - 30^\circ$ для трехфазной системы.

Разработано программное обеспечение для моделирования управляемого n -фазного инвертора для нагрузок, подключенных по схемам «треугольник» и «звезда», используя которое построены характеристики (рис. 7)

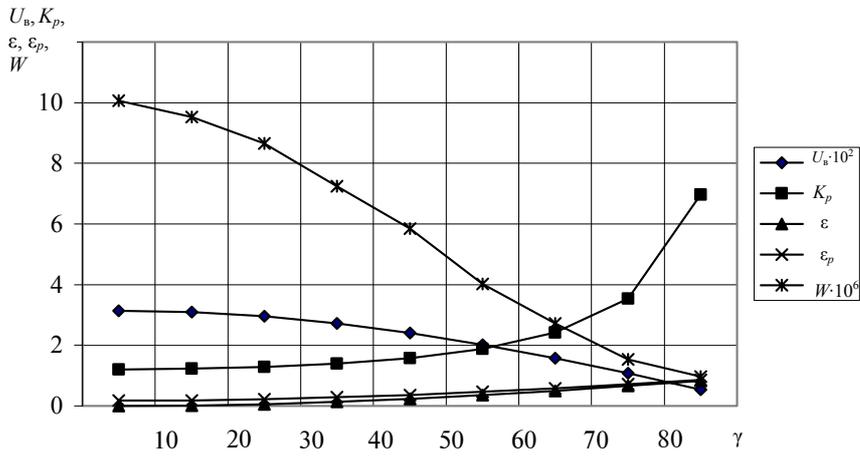


Рис. 6. Характеристики трехфазного управляемого выпрямителя

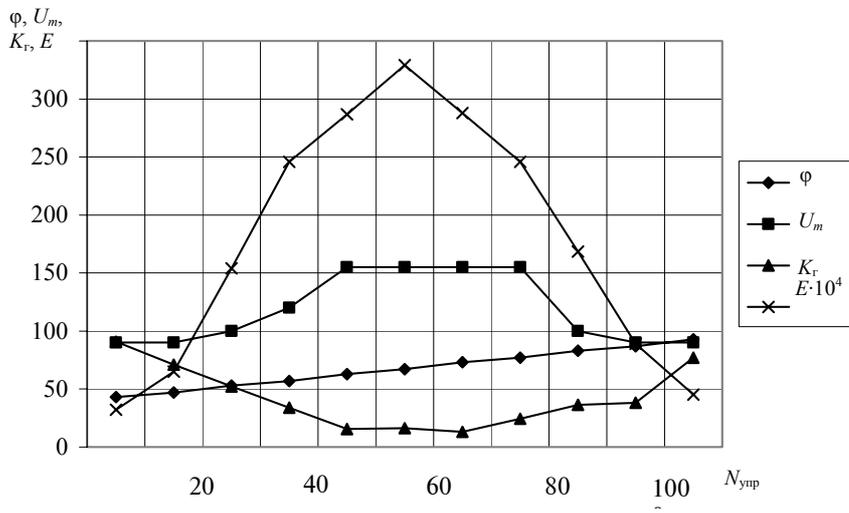


Рис. 7. Характеристики трехфазного инвертора

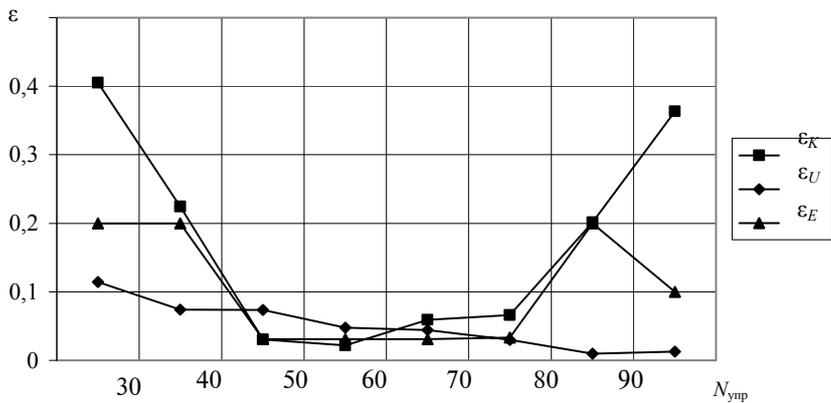


Рис. 8. Относительные погрешности экспериментальных и расчетных характеристик

инвертора: амплитуды U_m и фазы φ выходного напряжения, коэффициента высших гармоник K_g и энергии E на нагрузке в зависимости от управляющего кода $N_{упр}$. Диапазон значений управляющего кода инвертора составляет 30...100 для трех фаз и ограничивается коэффициентом высших гармоник в спектре выходного напряжения. Проведено экспериментальное исследование трехфазной системы частотного управления АД со снятием характеристик нагрузки в зависимости от угла открытия вентиля γ и управляющего кода $N_{упр}$. Доказана адекватность математической модели путем сопоставительного анализа характеристик, снятых экспериментально и полученных с помощью математической модели, по относительной погрешности. Проанализированы относительные погрешности для коэффициента высших гармоник ϵ_K , амплитуды выходного напряжения ϵ_U и энергии на нагрузке ϵ_E (рис. 8). Характеристики, снятые во время эксперимента, совпадают с графиками, построенными по математической модели с погрешностью до 10 % в диапазоне управляющего кода $N_{упр} = 45...75$, что доказывает ее адекватность.

Таблица 3

Эффективность системы широтно-импульсного управления

Показана использования частотного широтно-	Амплитуда выходного напряжения, В	Энергия на нагрузке, Дж	Коэффициент гармоник, %	эффективность системы управления АД с импульсным регулированием выражающаяся в точности и регулирования известных решений коэффициента гармоник в 2,6 раз позволяет снизить 17 %. Система внедрена на ОАО
	U_m	E	K_g	
(табл. 3), увеличении диапазона относительно при снижении высших за, что потери в АД на управления	Стандартный инвертор	115	$2,458 \cdot 10^6$	9,847
	Система частотного управления	150	$2,867 \cdot 10^6$	3,781
	Эффективность, раз	1,3	1,17	2,6

«Элтра», г. Рассказово и в учебном процессе кафедры «Электрооборудование и автоматизация» ТГТУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной задачи – создание метода проектирования системы частотного управления АД с широтно-импульсным регулированием путем формирования многоступенчатого напряжения на статоре, учитывающего технологические особенности работы асинхронного двигателя. Основные результаты работы:

1. Анализ известных решений показывает низкую эффективность систем частотного управления асинхронным двигателем из-за несогласованных информационных процессов преобразования энергии ее компонент, проектируемых комбинаторными методами итерационного анализа. Выявлена информационная технология проектирования преобразователей энергии, целесообразная для создания метода проектирования системы управления асинхронным двигателем.

2. Создана универсальная математическая модель программно-управляемых многофазных выпрямителя и инвертора с нормированными параметрами проводимостей тиристоров, определяемых кодами и алгоритмами коммутации по таблицам состояния, для проектирования адекватных физике преобразователей электроэнергии с амплитудно-частотно-широтным управлением.

3. Предложен метод проектирования системы частотного управления асинхронным двигателем с гибкой архитектурой, информативным математическим обеспечением и эффективными метрологическими средствами для определения характеристик управляемых многофазных выпрямителя и инвертора.

4. Разработан способ регулирования многофазного амплитудно-частотного преобразователя электроэнергии с широтно-импульсным формированием многоступенчатого напряжения за счет программного управления с заданной точностью в широком диапазоне.

5. Спроектированы интерфейсы управления частотой, напряжением и измерения скорости вращения двигателя с программным обеспечением на уровне блок-схем программ, таблиц коммутации тиристоров и таблиц состояния напряжения на нагрузке, обеспечивающие снижение потерь в асинхронном двигателе.

6. Система частотного управления асинхронным двигателем с широтно-импульсным регулированием внедрена на ОАО «Элтра», г. Рассказово и в учебном процессе кафедры «Электрооборудование и автоматизация» ТГТУ и позволяет снизить на порядок погрешность регулирования, расширить диапазон регулирования с заданной точностью, что обеспечивает снижение до 17 % потерь энергии в асинхронном двигателе.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Глинкин Е.И. Схемотехника БИС. Выпрямители и инверторы / Е.И. Глинкин, М.Е. Глинкин. – Тамбов: ТГТУ, 1999. – 72 с.

2. Глинкин Е.И. Схемотехника МИС: Компьютерный электропривод / Е.И. Глинкин, М.Е. Глинкин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 76 с.

3. Глинкин Е.И. Информационная технология проектирования трехфазного реле / Е.И. Глинкин, М.Е. Глинкин // Электрика. 2003. – № 1. – С. 36 – 38.

4. Глинкин М.Е. Инвертор электроэнергии / М.Е. Глинкин, С.В. Петров // Труды ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 9. – С. 104 – 107.

5. Глинкин М.Е. Программно-управляемые преобразователи энергии / М.Е. Глинкин, В.Ф. Калинин // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация». – Гомель: ГГТУ, 2001. – С. 104 – 106.

6. Глинкин М.Е. Технология проектирования преобразователей электроэнергии / М.Е. Глинкин // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация». – Гомель: ГГТУ, 2001. – С. 106.

7. Глинкин М.Е. Математическое моделирование трехфазного мостового выпрямителя / М.Е. Глинкин // Тез. докл. VI науч.-конф. ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – С. 264.

8. Глинкин М.Е. Информационная модель микропроцессорных систем / М.Е. Глинкин // 9-я Международная науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника и энергетика». – М.: МЭИ, 2003. – С. 391 – 392.

9. Глинкин М.Е. Компьютерный электропривод / М.Е. Глинкин // Тез. докл. VIII науч. конф. ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Ч. 1. – С. 146 – 147.

10. Глинкин М.Е. Информационное обеспечение компьютерного электропривода / М.Е. Глинкин // Труды ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 168 – 173.

11. Глинкин М.Е. Математическое моделирование трехфазного мостового выпрямителя / М.Е. Глинкин // НИЭТ-2003: Материалы VI Междунар. науч.-метод. конф. – Астрахань: АГТУ, 2003. – С. 211 – 216.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: в [1], [2] представлены математические модели управляемых выпрямителей и инверторов, многофазного трансформатора в составе частотного электропривода; в [3] разработано аппаратное и программное обеспе-

чения многофазного реле; в [4] предложена архитектура управляемого инвертора напряжения; в [5] представлена методика проектирования программно-управляемых преобразователей энергии.