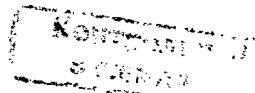


05.09.03

В469



*На правах рукописи*

**Вилячкин Леонид Владимирович**

**ИМИТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ  
АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА**

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

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор **Галишников Ю.П.**  
Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор, засл. деят. науки РФ,  
чл.-корр. АЭН РФ  
**Гафиятуллин Р.Х.,**  
кандидат технических наук,  
профессор **Кабанов И.Д.**  
Ведущая организация — СКБ “Ротор”.

Защита диссертации состоится 24 декабря 1997 года, в 10 часов,  
на заседании специализированного совета Д 053.13.07 Челябинского  
государственного технического университета по адресу: Челябинск,  
пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 1997 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



А.И. Сидоров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В мировой и отечественной электроэнергетике существует тенденция к возрастающему использованию регулируемых электроприводов переменного тока для собственных нужд тепловых электростанций. Эти привода, в целом отвечая требованиям политики энергосбережения, имеют ряд недостатков. В частности, регулируемый электропривод переменного тока по схеме асинхронного вентильного каскада обладает хорошей управляемостью в сочетании с высокой надежностью в работе и относительной простотой, но требует дополнительной реактивной мощности на управление преобразователями в роторной цепи. Для целей совершенствования электроприводов переменного тока оправданно применение имитационных компьютерных моделей, особенно в тех случаях, когда проведение испытаний на реальных устройствах невозможно или нецелесообразно. Однако существующие модели не лишены недостатков, в том числе связанных с точностью воспроизведения процессов в электромашино-вентильных системах и быстродействием. В то же время наибольший интерес представляет непосредственное комплексное воспроизведение процессов с расчетом мгновенных значений токов и момента всей электромашино-вентильной системы с учетом взаимного влияния отдельных ее составляющих друг на друга.

Актуальность настоящей работы подтверждается тем, что она выполнялась в соответствии с тематическим планом ЧГУ (единым заказ-нарядом), финансируемого министерством общего и профессионального образования РФ.

**Целью работы** является создание имитационной компьютерной модели электромашино-вентильной системы в виде асинхронного вентильного каскада, пригодной для моделирования как установившихся, так и переходных режимов работы, которая обеспечила бы достаточную точность в сочетании с высоким быстродействием.

**Идея работы** заключается в комплексном воспроизведении электромагнитных и механических процессов в установившихся и переходных режимах асинхронного вентильного каскада.

**Научные положения, разработанные лично автором и их новизна:**

— математическое описание электромашино-вентильной системы на примере асинхронного вентильного каскада, содержащего асинхронный электродвигатель, полупроводниковые преобразователи и трансформатор, созданное с использованием оригинального подхода и пригодное для детального и комплексного исследования электромагнитных и механических процессов в установившихся и переходных режимах его работы;

— модель запираемого (двухоперационного) тиристора, адекватно воспроизводящая процессы его открывания/закрывания и органично встраиваемая в общую модель электромашино-вентильной системы;

— имитационная компьютерная модель в виде пакета прикладных программ для ЭВМ, адекватно моделирующая процессы в асинхронном вентильном каскаде, обладающая высоким быстродействием, универсальностью и развитым пользовательским интерфейсом, позволяющая воспроизводить реальные процессы и проводить комплексный анализ таких устройств.

**Обоснованность и достоверность научных положений** обеспечена использованием математического описания электромагнитных и механических установившихся и переходных процессов при совместной работе всех устройств каскада в виде неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами с применением понятий тензорного анализа. Адекватность математической модели подтверждена путем сопоставления результатов расчета на ЭВМ с экспериментальными данными.

**Значение работы.** *Научное значение работы* состоит в том, что созданы с использованием оригинального подхода не имеющие аналогов математическое описание и имитационная компьютерная модель асинхронного вентильного каскада, позволяющие воспроизводить реальные процессы и проводить комплексный анализ таких устройств. Модель обладает высокой универсальностью и быстродействием. Предложена модель запираемого (двухоперационного) тиристора, адекватно воспроизводящая его процессы открывания/закрывания и органично встраиваемая в общую модель каскада. Впервые показано, что линейные многошаговые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений имеют ограниченную

область применения при моделировании переходных процессов в сложных электромашино-вентильных системах.

**Практическая значимость работы** заключается в создании пакета прикладных интерактивных программ, пригодного при проектировании силовой части АВК, разработке и оптимизации алгоритмов управления, а также интерпретации повреждений в разных частях схемы каскада, моделировании выхода из строя отдельных ее элементов для проектирования релейной защиты.

**Реализация работы.** Созданная модель АВК использована в учебном процессе для специальностей 1001 — “Электрические станции”, 1002 — “Электроэнергетические системы”, 2104 — “Автоматическое управление электроэнергетическими системами”.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены, обсуждены и получили одобрение на:

ежегодных научно-технических конференциях ЧГТУ (Челябинск, 1993-97 гг.);

учебно-методической конференции “Информационные технологии обучения энергетическим специальностям” (Екатеринбург, 1994 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 6 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и отдельного тома приложений, содержит 109 страниц машинописного текста, 75 рисунков, 12 таблиц, 229 страниц приложений. Библиография охватывает 130 работ российских и зарубежных авторов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности исследования и краткую аннотацию работы.

В первой главе приведен аналитический обзор литературы. В соответствии с указом президента Российской Федерации N 472 от 07.05.95 “Об основных направлениях энергетической политики и структурной перестройки ТЭК РФ на период до 2010 года” энергосбережение названо одним из главных приоритетов энергетической политики России. Общеизвестно, что одним из перспективных направлений политики энергосбережения является оснащение меха-

низмов собственных нужд ТЭС частотно-управляемыми электроприводами переменного тока. Установки на основе асинхронных электродвигателей достаточно просты, надежны и эффективны. Таков, например, асинхронный, вентильный каскад (АВК), хотя он и имеет пониженный коэффициент мощности. Исследования электромашино-вентильных систем с целью их совершенствования удобно проводить с применением имитационных моделей. Последние позволяют исследовать такие режимы работы электропривода, воспроизведение которых другими методами невозможно или нецелесообразно. Анализ литературы показал, что большое число работ посвящено обособленному рассмотрению электрических машин и полупроводниковых преобразователей, тогда как вопросы комплексного системного рассмотрения всей системы рассмотрены недостаточно. При моделировании электрических машин по-прежнему часто используются подходы, связанные с многократными преобразованиями координат, что влечет за собой большие затраты машинного времени. Основная трудность связана со сложностью взаимной координатной привязки вращающихся электрических машин и статических (полупроводниковых) преобразователей.

Особая сложность моделирования электромашино-вентильных систем заключается в необходимости рассмотрения совместного, а не раздельного функционирования устройства, существенно различающихся по своей структуре, физической природе и математическому описанию. Проблема успешно решается при моделировании в фазных координатах, хотя существующие модели электромашино-вентильных систем обладают недостаточным быстродействием для анализа переходных электромеханических процессов, что связано, на наш взгляд, с излишней усложненностью моделей и учетом слишком большого числа второстепенных факторов.

Предложенный ранее метод собственных (фазовых) координат, разработанный Галишниковым Ю.П., лишен этих недостатков. В этом случае не требуется переходов от одной системы координат к другой. Обеспечивается единообразие математического описания электрических машин, трансформаторов и полупроводниковых преобразователей. Метод позволяет создавать гибкие и универсальные модели, обладающие высоким быстродействием. Для применения метода в области электромашино-вентильных систем требуется дальнейшее его развитие.

Во второй главе представлено разработанное математическое описание АВК, содержащего асинхронный электродвигатель, полупроводниковые преобразователи и трансформатор. При этом использован подход с позиций собственных (фазовых) координат, согласно которому первоначальные математические описания отдельных устройств, входящих в рассматриваемую электрическую цепь, составлены в виде их элементарных аналогов.

Реальной асинхронной машине с тремя фазными обмотками на статоре и тремя фазными обмотками на роторе ставится в соответствие элементарный аналог с тем же числом обмоток на статоре и роторе, взаимное пространственное расположение которых такое же, как и в реальной машине. Реальный трехфазный двухобмоточный трансформатор с обмоткой высшего напряжения, соединенной в "звезду" и обмоткой низшего напряжения, соединенной в "треугольник", заменен соответствующим элементарным аналогом с тремя обмотками на сторонах высшего и низшего напряжения.

При формировании элементарных аналогов преобразователей на неуправляемых диодах и однооперационных тиристорах вентили представлены ветвями со скачкообразно изменяющимися свои величины активными сопротивлениями и индуктивностями. Величины индуктивности и активного сопротивления ветви элементарного аналога полупроводникового преобразователя зависят от состояния соответствующего вентиля таким образом, что в закрытом состоянии индуктивность и активное сопротивление вентиля имеют наибольшие, а в открытом - наименьшие значения. Установлено, что устойчивость расчетного процесса достигается при значениях активных сопротивлений и индуктивностей вентилях в открытом состоянии 0.0003 и 0.001 относительных единиц, а в закрытом — 3000.0 и 10000.0 о.е., соответственно, в широком диапазоне значений шага расчета (числа расчетных точек на период основной частоты).

Вопросы моделирования полупроводниковых преобразователей с запираемыми (двухоперационными) тиристорами изучены слабо. Установлено, что представление тиристора простой последовательной активно - индуктивной цепочкой неприемлемо, так как скачкообразным изменением значений индуктивности и активного сопротивления элементарного аналога не удается получить достаточно быстрое нарастание/снижение тока на коммутируемых двухоперационных вентилях. Поэтому предложена оригинальная схема замеще-

ния, адекватно воспроизводящая процесс включения/отключения запираемого вентиля в виде последовательно-паралельных цепочек  $R$ ,  $L$  и  $C$  (рис.1).

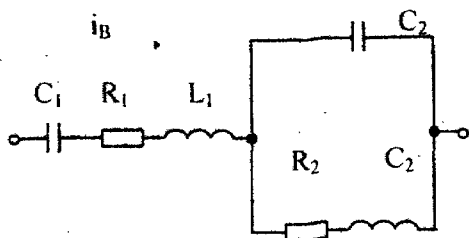


Рис.1. Схема замещения двухоперационного тиристора

Значения параметров в схеме замещения вентиля последовательных индуктивности  $L_1$  и активного сопротивления  $R_1$  скачком возрастают до наибольших при переходе тока вентиля через нуль. Нелинейная емкость  $C_1$  служит для резкого снижения тока в цепи до нуля. Сопоставление времени отключения, полученного расчетом разработанной схемы замещения (рис.2), с каталожными данными запираемого тиристора показало хорошую точность модели. Дополнительная последовательно - параллельная цепочка  $C_2$ ,  $R_2$  и  $L_2$  служит для создания переднего фронта тока вентиля при его включении.

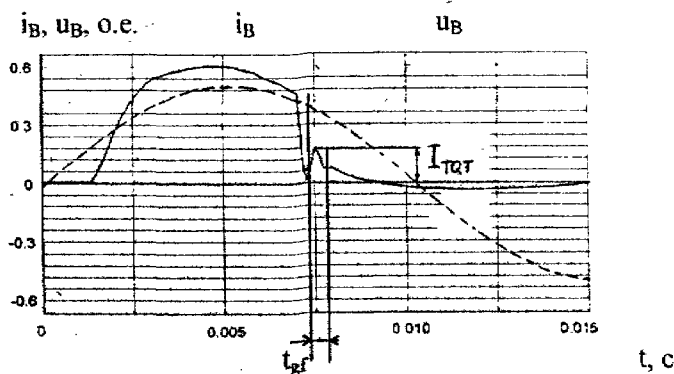


Рис.2. Диаграмма тока модели двухоперационного тиристора в процессе его отключения:



$t_{gf} = 2.2 \text{ мкс}$  — время спада тока;

$I_{TOT} = 0.14 \text{ о.е.}$ ,  $I_{TOT}^* = 19\%$  — ток медленного спада

Элементарный аналог двухоперационного тиристора на основе предложенной схмы замещения и элементарный аналог всего полупроводникового преобразователя описываются интегро-дифференциальными уравнениями.

В соответствии с развиваемым подходом, элементарный аналог всей силовой цепи образован как совокупность элементарных аналогов отдельных устройств, входящих в нее:

$$[L_{\Sigma}] = \begin{bmatrix} [L_{AD}] & & & \\ & [L_B] & & \\ & & [L_{И}] & \\ & & & [L_{ТР}] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[L_{AD}]$ ,  $[L_B]$ ,  $[L_{И}]$  и  $[L_{ТР}]$  — матрицы индуктивностей элементарных аналогов асинхронного электродвигателя, выпрямителя, инвертора и трансформатора, соответственно.

Сходным образом сформированы матрицы активных сопротивлений, производных индуктивностей и обратных емкостей элементарного аналога цепи.

Соединение ветвей рассматриваемой цепи между собой аналитически описывается матрицей инциденций второго рода  $[A]$ , которая, как известно, определяет соотношение между токами ветвей элементарной цепи и контурными токами интересующей цепи.

В случае инвертора на однооперационных тиристорах матричное дифференциальное уравнение равновесия напряжений в форме Коши имеет вид

$$p[i_K] = [L_K]^{-1} * \{[U_K] - p[L_K] * [i_K] - [r_K] * [i_K]\}, \quad (2)$$

где  $[L_K] = [A_i] * [L_{\Sigma}] * [A]$  — матрица контурных индуктивно-

стей моделируемой цепи с изменяющимися во времени коэффициентами:

$[r_K] = [A_1] * [r_3] * [A]$  — матрица контурных активных сопротивлений моделируемой цепи;

$p[L_K] = [A_1] * p[L_3] * [A]$  — матрица производных контурных индуктивностей моделируемой цепи.

В случае инвертора на двухоперационных тиристорах матричное уравнение моделируемой цепи после простых преобразований приобретает вид:

$$p[U_K] = p^2[L_K]*[i_K] + 2*p[L_K]*p[i_K] + [L_K]*p^2[i_K] + [r_K]*p[i_K] + [1/C_K]*[i_K], \quad (3)$$

где  $p[U_K]$  — контурная матрица производных напряжений моделируемой цепи в относительных единицах;

$p^2[L_K]$  — контурная матрица вторых производных индуктивностей моделируемой цепи в относительных единицах;

$p^2[i_K]$  — контурная матрица вторых производных токов моделируемой цепи в относительных единицах;

При моделировании принято, что в АВК стабилизация частоты вращения обеспечивается замкнутой системой регулирования с отрицательной обратной связью по частоте вращения и положительной по выпрямленному току. Поскольку система регулирования и управления инвертором оказывает непосредственное влияние на переходные процессы в АВК, в математическую модель она введена известным образом посредством передаточных функций.

Для расчета электромеханических процессов в АВК его математическое описание дополнено уравнением движения. Для этого на каждом расчетном шаге определяется мгновенное значение электромагнитного момента асинхронной машины. На основании общих соотношений электромеханического преобразования энергии получено выражение для мгновенного значения электромагнитного момента асинхронной машины:

$$M_{ЭМ} = (2/3) * L_{\mu} * \{ (i_A * i_a + i_B * i_b + i_C * i_c) * \sin(\alpha) + \\ + (i_A * i_b + i_B * i_c + i_C * i_a) * \sin(\alpha + 2\pi/3) + \\ + (i_A * i_c + i_B * i_a + i_C * i_b) * \sin(\alpha - 2\pi/3) \}, \quad (4)$$

где  $i_A, i_B, i_C$  — мгновенные значения токов статора в о.е.;  
 $i_a, i_b, i_c$  — мгновенные значения токов ротора в о.е.;  
 $L_{\mu}$  — взаимная индуктивность от поля воздушного зазора, о.е.

Уравнение движения ротора асинхронного двигателя в пренебрежении механическим демпфированием имеет вид

$$T_J * \frac{d\omega_{мех}}{dt} = M_{ЭМ} - M_C(t), \quad (5)$$

где  $T_J$  — постоянная времени инерции вращающихся масс;  
 $\omega_{мех}$  — угловая частота вращения ротора;  
 $M_C(t)$  — момент сопротивления на валу асинхронной машины, изменяющийся по тому, или иному закону.

Численное интегрирование уравнения движения производится совместно с матричным уравнением равновесия напряжений. Связь уравнений обеспечивается посредством  $M_{ЭМ}$  и угла  $\alpha$  между магнитными осями фазы А статора и фазы а ротора в произвольный момент времени. Таким образом, развитый подход дает возможность комплексного воспроизведения АВК с инвертором на однооперационных или на двухоперационных тиристорах, что весьма важно при изучении частотно-управляемых электроприводов переменного тока.

В третьей главе рассмотрена имитационная компьютерная модель АВК в виде алгоритма и пакета прикладных программ, пригодная для исследования установившихся и переходных процессов.

В состав имитационной компьютерной модели входят следующие блоки, выполненные в виде отдельных взаимосвязанных модулей:

— ввода исходных данных;

- формирования контурных матриц индуктивностей, производных индуктивностей, обратных емкостей и активных сопротивлений;
- расчета начальных условий;
- численного решения (интегрирования) уравнений равновесия напряжений и уравнения движения асинхронной машины;
- построения графиков;
- гармонического анализа кривых тока и напряжения.

Алгоритм расчета установившихся и переходных режимов АВК, положенный в основу имитационной компьютерной модели, выглядит так, как показано на рис.3.

При моделировании преобразователей важно точно определять моменты включения вентиля и момент перехода тока на нем через нуль в отрицательную область (условие закрывания неуправляемых диодов и однооперационных тиристоров). Предложенный алгоритм позволяет достичь требуемого результата при однократном изменении шага. Как показали расчеты, точность поиска нуля тока 2% достигается за 1-2 итерации, точность 0.2 % достигается за 2-3 итерации, таким образом, процесс хорошо сходится. Разработанный алгоритм позволил не только упростить программу, но и добиться высокого быстродействия. В случае применения метода Гира алгоритм несколько изменяется. Отличие состоит в том, что необходимо запоминать не одну, а три расчетных точки для правильной работы многошагового метода.

Пакет "AsMot12", реализующий разработанный алгоритм, построен по модульному принципу и состоит из нескольких взаимосвязанных частей. Пакет создан с использованием языка программирования Модуль-2, но подпрограмма расчета начальных условий сформирована с использованием языка программирования Фортран, а модуль формирования контурных матриц написан с использованием языка Си. Общий размер пакета (исполняемые и вспомогательные файлы) составляет около 565 Кбайт.

Затраты машинного времени зависят от числа расчетных точек на период основной частоты и точности поиска нуля тока на вентилях. При числе расчетных точек равному 180 и прочих одинаковых

условиях время расчета одного периода основной частоты составило: метод Рунге—Кутта 4-го порядка — 65 секунд; метод Гира — 45 секунд (компьютер IBM PS AT 486 DX, 33 МГц). Таким образом, переход к многошаговому методу дал выигрыш во времени расчета порядка 30% относительно затрат времени на расчет режима методом Рунге—Кутта 4-го порядка.

Для проверки адекватности модели произведено сравнение результатов расчета с осциллограммами, полученными на специально созданной экспериментальной установке АВК. Кривые получены с помощью светолучевого осциллографа Н115 при скольжении  $S=0.25$ . Угол открывания тиристорov инвертора составлял 102 градуса электрических. Полученные результаты показывают, что расхождение в расчетных и экспериментальных кривых тока статора не превышает 8% (рис.4). Здесь в опытной кривой (2) присутствуют высшие гармоники, обусловленные искажением распределения поля воздушного зазора, что вызвано наличием зубцов. Поскольку для упрощения зубцовые гармоники в модели не учтены, расчетная кривая (1) является гладкой. Расчетное установившееся значение скольжения двигателя равно 0.25 о.е., при этом замеренное значение скольжения  $S = 0.241$  о.е. Таким образом, расчетное значение скольжения отличается от замеренного не более, чем на 5%. Расхождение вызвано, в основном, измерительной погрешностью.

Угол опережения открывания вентилей инвертора  $\beta_i$  равен 77.2 град. эл., так что погрешность при расчете напряжения на вентиле не превышает 6% (рис.5). Различия в расчетной (1) и опытной (2) кривых тока на выходе инвертора (рис.6) незначительны.

Таким образом, разработанная с учетом принятых допущений и на основе оригинального подхода к математическому описанию электромашинно-вентильных систем компьютерная модель АВК обладает необходимой адекватностью.

В четвертой главе рассмотрены возможность и полнота исследований установившихся и переходных режимов работы АВК с использованием полученной модели. Результаты моделирования пуска асинхронного электродвигателя показали, что в случае применения метода Рунге—Кутта 4-го порядка кривые соответствуют теоретическим представлениям о ходе процесса. При использовании метода Адамса 4-го порядка расчетный процесс опрокидывается, что свиде-

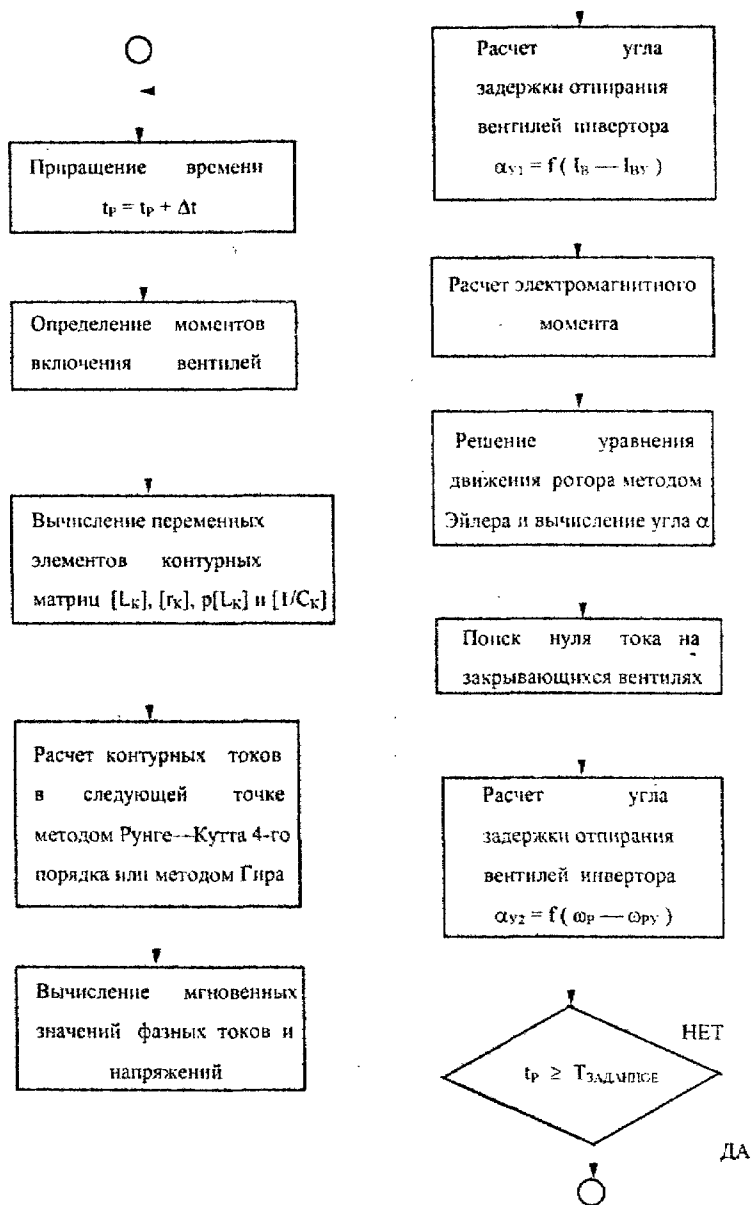


Рис.3. Основной расчетный алгоритм

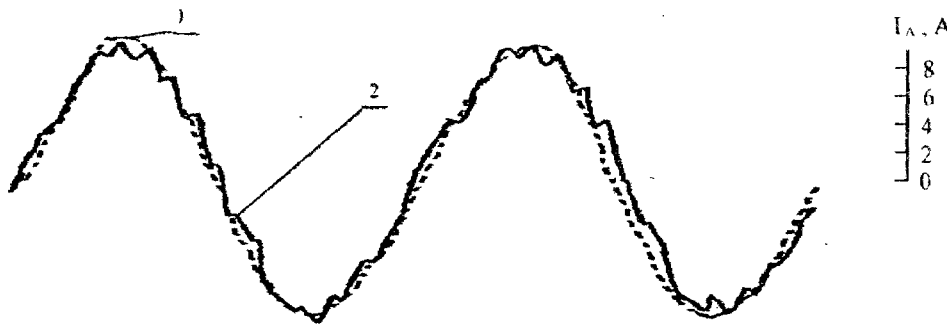


Рис.4. Ток фазы А статора асинхронного электродвигателя

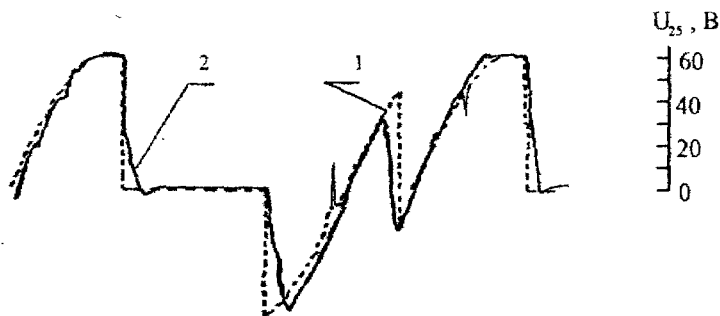


Рис.5. Напряжение на вентиле 25 инвертора

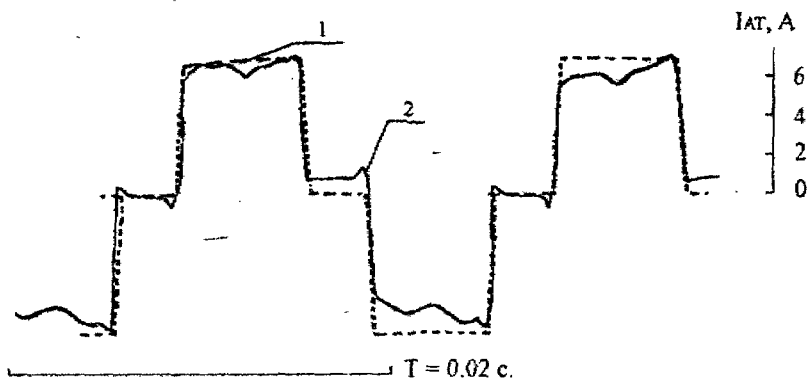


Рис.6. Ток на выходе инвертора (вентили 22 и 25)

гельствует об ограниченной области применения линейных многошаговых методов интегрирования дифференциальных уравнений в случае моделирования переходных режимов работы электромашино-вентильных систем.

Результаты, полученные при комплексном рассмотрении всего АВК с учетом влияния отдельных его устройств друг на друга, существенно отличаются от результатов, полученных на частичных моделях. В частности, это проявляется в искажении форм кривых при моделировании всего АВК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача комплексного имитационного компьютерного моделирования сложных электромашино-вентильных систем. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанное в развитие метода собственных координат математическое описание электромашино-вентильной системы в виде асинхронного вентильного каскада, содержащего асинхронную машину, полупроводниковые преобразователи и трансформатор, позволяет непосредственно воспроизводить электромагнитные и механические процессы, при установившихся и переходных режимах АВК с учетом взаимного влияния его составляющих друг на друга. Разработанная модель запираемого (двухоперационного) тиристора адекватно воспроизводит процессы его включения/отключения, что подтверждается сравнением результатов моделирования с каталожными данными. Она простым образом встраивается в общую модель всего АВК, позволяя исследовать режимы работы электропривода с инвертором на запираемых тиристорах.

2. Имитационная компьютерная модель АВК реализована в виде пакета прикладных программ на языках программирования Модула-2, Фортран и Си, который обладает высоким быстродействием, развитым интерфейсом и высокой степенью интерактивности, обеспечивая удобный ввод информации, диалог с пользователем (в том числе непосредственно в процессе расчета текущего режима) и широкие возможности анализа полученных результатов. Предложенный алгоритм итерационного поиска нуля тока на закрывающихся тиристорах



позволяет добиться высокой точности за 1-2 итерации, обеспечивая высокую точность и существенное снижение затрат машинного времени на определение моментов перехода через нуль тока тиристора. Проверка адекватности математической и имитационной компьютерной модели произведена путем сопоставления результатов расчетов на ЭВМ с экспериментальными данными. Погрешность не превышает 5-8 %.

3. Применение линейных многошаговых методов интегрирования дифференциальных уравнений при моделировании установившихся и квазиустановившихся процессов обеспечивает достаточную точность расчетов в сочетании со значительной экономией времени по сравнению с методом Рунге—Кутты 4-го порядка. Так, при моделировании всего АВК применение метода Гира 4-го порядка дает 30% выигрыш в скорости расчета по сравнению с методом Рунге—Кутты 4-го порядка при прочих равных условиях. В то же время, линейные многошаговые методы имеют ограниченную область применения при воспроизведении переходных режимов работы электромашино-вентильных систем.

4. Моделирование установившихся и переходных процессов показало, что результаты, полученные при комплексном моделировании всего АВК с учетом системных эффектов существенно отличаются в количественном и качественном отношении от результатов, полученных на частичных (упрощенных) моделях. Таким образом, исследование электроприводов переменного тока должно опираться на комплексный подход к моделированию всех устройств с учетом их взаимного влияния друг на друга.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Вилячкин Л.В., Галишников Ю.П. Универсальная компьютерная модель машино-вентильных систем // Информационные технологии обучения энергетическим специальностям: Тез. докл. учебно-методической конференции.—Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. —С.16.
2. Вилячкин Л.В., Галишников Ю.П. Пакет прикладных программ "Компьютерная модель асинхронного вентильного каскада, версия 11" (ППП AsMot11). Свидетельство об официальной регистрации программы для ПЭВМ № 940512 от 16 декабря 1994 г.

3. Имитационные исследования электрических систем и их элементов. (Отчет по НИР). Инв. № 01.9.30008151, ЧГТУ, Галишников Ю.П., Матвеев В.А., Вилячкин Л.В., 1994 г. — 58 с.
4. Вилячкин Л.В., Галишников Ю.П. Пакет прикладных программ "Компьютерная модель асинхронного вентиляного каскада, версия 12" (ППП AsMot12). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950451 от 13 декабря 1995 г.
5. Имитационные исследования управляемых электромагнитно-вентильных систем. (Отчет по НИР). Инв. № 01.9.50 00 5053, ЧГТУ, Галишников Ю.П., Вилячкин Л.В., Шуленов А. Ю., 1996 г. — 36с.
6. Вилячкин Л.В., Галишников Ю.П. Компьютерная модель асинхронного вентиляного каскада // Электротехника. — 1997. — №9. — С.40—45.

Издательство Челябинского  
государственного технического университета

---

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 14.11.97. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1. Уч.-изд. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ 311/509.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76