

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

В А С Ы Л И В
Карл Николаевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА «ЯВНОПОЛЮСНЫЙ
СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР—ЦИКЛОКОНВЕРТЕР—
ЯВНОПОЛЮСНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»**

Специальности: 05.09.03 — электротехнические комплексы
и системы, включая их управление и регулирование,
05.09.01 — электрические машины

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



00816045 (O)

Работа выполнена во Львовском лесотехническом институте.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор ПЛАХТЫ-НА Е. Г.; кандидат технических наук, доцент ШАРАХИН В. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор РУДАКОВ В. В. (г. Ленинград); кандидат технических наук СИДЕЛЬНИКОВ А. В. (г. Ленинград).

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики (г. Москва).

Защита диссертации состоится « 17 » октября 1991 г. в ___ час. ___ мин. на заседании специализированного совета К 063.38.25 Ленинградского государственного технического университета по адресу: 195251, Ленинград, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке технического университета. Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим присылать по адресу: 195251, Ленинград, ул. Политехническая, 29, специализированный совет К 063.38.25.

Автореферат разослан « 12 » сентября 1991 г.

*Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук, доцент*

А. Н. КРИВЦОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение эффективности использования электротехнического оборудования, содержащего тиристорные электроприводы промышленных и транспортных установок, а также электроэнергетических систем, требует использования соответствующих способов и методик исследования. Существование этой проблемы обусловлено интенсивным внедрением в практику регулируемых электрических приводов, созданных на базе электрических машин переменного тока. Регулирование скорости в таких электроприводах производится изменением частоты напряжения с помощью коммутаторов: преобразователей частоты со звеном постоянного тока или непосредственных преобразователей частоты (НПЧ).

Одним из таких автономных электроприводов, используемых, в частности, в судостроении в качестве гребных электроустановок (ГЭУ) является электропривод, имеющий структуру: "явнополюсный синхронный генератор - циклоконвертер - явнополюсный синхронный двигатель" ("ЯСГ - НПЧ - ЯСД").

Электромагнитные и электромеханические процессы, протекающие в электроприводе "ЯСГ - НПЧ - ЯСД", отличаются сложностью в отношении их изучения и исследования. Это обусловлено такими факторами: неравномерностью воздушного зазора электрических машин, несинусоидальностью намагничивающих сил и нелинейностью электромагнитных связей контуров явнополюсных синхронных машин (ЯСМ), наличием коммутационных процессов НПЧ, взаимным влиянием структурных элементов электропривода, а также влиянием системы автоматического управления (САУ) на работу привода. Проектирование электроприводов подобного типа требует достаточно полного учета упомянутых факторов, достижению которого способствует использование в практике проектирования, наряду с натурным, математического моделирования. Возможность получения результатов расчетов процессов и характеристик, удовлетворяющих практическим требованиям, обеспечивается наличием математических моделей высокого уровня адекватности и соответствующего быстродействующего программного обеспечения, позволяющего выполнять исследования в системе "человек - ЭВМ", являющейся автоматизированной системой моделирования (АСМ).

Применение АСМ для исследования автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" расширяет возможности в отношении варьированности параметров электрических машин, системы управления НПЧ и САУ электропривода, что позволяет отказаться от макетирования, вслед-

ствие чего сократить материальные затраты на разработку. Для получения оптимального проекта необходимо иметь достаточно полную информацию о поведении электропривода в различных режимах работы - переходных и установившихся, включая аварийные.

Наличие средств, с помощью которых можно получить такую информацию, позволит качественно повысить эффективность проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ.

Из этого следует, что задача разработки автоматизированной системы моделирования как средства для исследования автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" в системе "человек - ЭВМ", представляющей собой совокупность математических моделей, машинно-ориентированных алгоритмов, программного обеспечения и инструкций по его эксплуатации, является актуальной.

На задачу выносятся. Общая методика исследования на ЭВМ процессов и характеристик автономного электропривода "явнополюсный синхронный генератор - циклоконвертер - явнополюсный синхронный двигатель" как совокупность математических моделей, алгоритмов и программ, позволяющих в автоматизированной системе "человек - ЭВМ" выполнять исследования статических и динамических режимов работы.

Математические модели в фазных и вращающихся координатах циклоконвертера и силового реактора, а также математические модели системы управления циклоконвертера и САУ электропривода.

Программная реализация математических моделей в фазных и вращающихся координатах структурных элементов электропривода (явнополюсной синхронной машины, циклоконвертера, силового реактора), системы управления циклоконвертера и САУ электропривода.

Программная реализация математической модели топологических связей силовых электрических цепей структурных элементов электромашино-вентильных систем (ЭМВС).

Результаты исследований процессов и характеристик автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД".

Научная новизна диссертационной работы состоит в:

создании методики, позволяющей выполнять исследования процессов и характеристик в нормальных и аварийных, установившихся и переходных режимах работы автономных электроприводов типа "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" с учетом взаимного влияния структурных элементов электропривода, нелинейностей электромагнитных связей электрических машин и коммутационных процессов циклоконвертера;

разработке математических моделей структурных элементов авто-

номного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД": циклоконвертера и силового реактора, математических моделей системы управления НПЧ - САУ электропривода, алгоритмов и программ, соответствующих упомянутым математическим моделям, а также программной реализации математических моделей ЯСМ в фазных и вращающихся координатах;

разработке математических моделей в фазных и вращающихся координатах автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" и соответствующих алгоритмов и программ

получении информации о поведении автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" в динамических, установившихся и аварийных режимах работы.

Практическая ценность.

Программный комплекс позволяет ставить эксперименты на ЭМБ для изучения процессов и характеристик при оптимизации параметров электропривода на стадии проектирования, не прибегая к построению физических моделей.

Разработаны машинно-ориентированные алгоритмы и программы, соответствующие математическим моделям структурных элементов автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД": явнopolушной синхронной машины, циклоконвертера, реактора.

Разработан пакет программ, позволяющий формировать топологическим способом цифровые модели ЭМБС из моделей их структурных элементов и пакет программ обшематематического назначения.

Эти программы вошли в АСМ ЭМБС и используются при постановке других задач.

Реализация и внедрение результатов работы.

Идеи и материалы, положенные в основу методики исследования процессов и характеристик автономного электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД", использованы при проектировании судовых электроэнергетических систем (ЭС) гребных электрических и ветроэнергетических установок (ВУ) для оценки качества регулирования, искажений форм напряжений, токов и электромагнитных моментов.

Переданы для использования:

- в НИИ ЛПЭО "Электросила" - математическое, программное и методическое обеспечения в фазных координатах и координатах d, q , 0 исследуемого электропривода;

- на предприятие п/я Р-6794 - программное обеспечение для исследования электромагнитных процессов ГЭУ по системе "явнopolушный синхронный генератор - циклоконвертер нулевого типа - явнopolушный

синхронный двигатель"; а также результаты расчетов электромагнитных процессов этой ГЭУ мощностью 19 мВт;

- в ВНИИЭлектромаш - автоматизированная система моделирования ЭМЭС, включающая разработанные в диссертации цифровую модель ЯСМ, цифровую модель циклоконвертера, пакет программ, обеспечивающий соединение на программном уровне цифровых моделей структурных элементов ЭМЭС, пакет программ общематематического назначения, а также пакет программ определения параметров циклоконвертера в координатах амплитуд гармонических составляющих;

- в СКБ Тираспольского электромашиностроительного завода - цифровая модель ЯСМ, цифровая модель циклоконвертера, вентильного двигателя переменного тока, пакет программ соединения цифровых моделей структурных элементов ЭМЭС, а также цифровая модель вентильного двигателя переменного тока в координатах d , q , 0 ;

- на предприятие п/я В-2156 - комплекс программ для исследования судовых электроустановок, содержащий программы соединения цифровых моделей структурных элементов ЭМЭС;

- во ВНИИЭлектроэнергетики - цифровая модель ЯСМ и ВЭУ;

- в Киевский и Львовский политехнические институты - АСМ ЭМЭС.

Документы о внедрении результатов работы представлены в диссертации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

2-й Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (Шадр, 1984 г.);

3-й Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (Черкассы, 1986 г.);

Всесоюзной научно-технической конференции "Вентильные электро-механические системы с постоянными магнитами" (Москва, 1989 г.);

Всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы электромеханики" (Москва, 1989 г.);

Всесоюзном научно-техническом совещании "Проблемы управления промышленными электромеханическими системами" (Ульяновск, 1989 г.);

Всесоюзном научном семинаре "Кибернетика электрических систем" по проблеме "Управление и автоматизация в электроэнергетических системах" (Миасс, 1990 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась в 1990 году на научных семинарах кафедры вычислительной техники и моделирования технологических процессов Львовского лесотехнического института и

кафедры систем автоматического управления Ленинградского государственного технического университета.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в: 4-х статьях, информационном листке, 5-и тезисах докладов всесоюзных научно-технических конференций и семинаров и 3-и отчетах по научно-исследовательским работам.

Объем и структура работы. Материалы диссертационной работы изложены на 459 страницах. Диссертация состоит из введения, пяти глав и шести приложений. Объем основного материала содержит 153 страницы машинописного текста, 111 рисунков и библиографический список, в котором имеется 141 литературный источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **введении** изложено обоснование актуальности решаемой проблемы, произведен обзор литературы по вопросам математического моделирования процессов, протекающих в автономных вентильных электроприводах (в частности ГЭУ), сформулирована задача и обоснование выбора метода ее решения.

На основе выполненного анализа литературных источников сделан вывод о целесообразности решения сформулированной в диссертации проблемы на основе теории математического моделирования электромашино-вентильных систем, разработанной доктором технических наук, профессором Е. Г. Плахтыной, поскольку эта теория базируется на систематизированном универсальном подходе при решении задач режимных расчетов большого многообразия ЭМВС. Универсальность достигается топологическим способом формирования математических и цифровых моделей. При этом обеспечивается высокий уровень адекватности, то есть, учитываются такие влияющие на протекание процессов факторы как нелинейности электромагнитных связей контуров электрических машин (ЭМ), коммутация вентилей преобразователей частоты, взаимное влияние структурных элементов ЭМВС. Решена также проблема, связанная с наличием разнотемповых процессов (быстрых и медленных), путем постановки задач в фазном базисе координат и вращающемся координатном базисе $d, q, 0$.

В процессе решения проблем режимных расчетов необходимо пройти путь по цепочке: "математическая модель - машинно-ориентированный алгоритм - программы - результаты расчетов". Эта задача решается поэтапно в соответствующих главах диссертации.

В **первой главе** изложены математические модели и машинно-ори-

ентрированные алгоритмы в фазных координатах (ФК) структурных элементов автономного электропривода ЯСГ-НПЧ-ЯСД, к которым относятся: явнополюсная синхронная машина, реактор, циклоконвертер, источник напряжения постоянного тока.

Математические модели разработаны исходя из представления структурных элементов электрическими многополюсниками, имеющими столько полюсов, сколько выводов на клеммы в натуральных моделях, что позволяет производить формирование модели электропривода топологическим способом.

Модель ЯСМ создана на основе магнитно-нелинейной теории. В основу ее разработки приняты исходные допущения, позволяющие учесть нелинейность электромагнитных связей электрических контуров, неравномерность воздушного зазора и несинусоидальность намагничивающих сил.

Эта модель состоит из уравнений электрического состояния, записанных для схемы электрической цепи, представленной многополюсником, уравнений магнитного состояния, записанных для схемы замещения магнитной цепи, и уравнения механического состояния, записанного для вращающихся механических частей.

Уравнения электрического состояния, преобразованные к виду уравнений внешних ветвей (к внешним ветвям относятся ветви обмоток статора и обмотки возбуждения, а к внутренним - контуры демпферной обмотки (д.о.)), имеют вид:

$$p\vec{i}_e + \check{r}\vec{\varphi}_e + \vec{c} = 0, \quad (1)$$

где \vec{i}_e - вектор токов внешних ветвей, $\vec{\varphi}_e$ - вектор внешних потенциалов (полюсов);

$$\check{r} = \begin{bmatrix} \check{L}^{-1} & -\check{L}^{-1} \\ -\check{L}^{-1} & \check{L}^{-1} \end{bmatrix}; \quad \vec{c} = \begin{bmatrix} \check{L}^{-1} \\ -\check{L}^{-1} \end{bmatrix} \times \vec{E} \quad (2)$$

- коэффициенты уравнений внешних ветвей, а входящие в (2) величины \check{L}, \vec{E} определяются по формулам:

$$\check{L} = \check{L}_{\Sigma, \Sigma} - \check{L}_{\Sigma, D} \check{L}_{D, D}^{-1} \check{L}_{D, \Sigma}; \quad (3)$$

$$\vec{E} = \rho_v \check{\Psi}_{\Sigma}^s \omega_R + \check{R}_{\Sigma} \vec{i}_{\Sigma} - \check{L}_{D, \Sigma} \check{L}_{D, D}^{-1} (\rho_v \omega_R \check{\Psi}_D + \check{R}_D \vec{i}_D).$$

В уравнениях (3) буквами \check{L}, \check{R} обозначены матрицы динамических

индуктивностей и активных сопротивлений; буквой $\vec{\psi}$ - вектор потокоцеплений; ρ_p , ω_R - количество пар полюсов и скорость вращения ЯСМ; $p = d/dt$ - оператор дифференцирования по времени t . Буквами Σ, D в индексах обозначено принадлежность к внешним и внутренним контурам, с соответственно. Буквой γ в верхнем индексе обозначено дифференцирование по углу поворота ротора γ .

Результатом решения уравнения (1) является вектор производной токов $\rho \vec{i}_p$, на основе которого вычисляются векторы производных токов внешних $\rho \vec{i}_\Sigma$ и внутренних $\rho \vec{i}_D$ контуров по формулам:

$$\begin{aligned} \rho \vec{i}_{\Sigma j} &= \rho \vec{i}_{e j} \quad (j = \overline{1, N_\Sigma}); \\ \rho \vec{i}_D &= -\vec{L}_{D,D}^{-1} (\vec{L}_{D,\Sigma} \rho \vec{i}_\Sigma + \rho_p \vec{\psi}_D \omega_R + \vec{R}_{D,D} \vec{i}_D), \end{aligned} \quad (4)$$

где N_Σ - количество внешних контуров ЯСМ.

На основе векторов $\rho \vec{i}_\Sigma$, $\rho \vec{i}_D$ по уравнениям магнитного состояния определяются производные магнитных потоков $\rho \Phi_a$, $\rho \Phi_m$ - ярма статора, полюса и вектор производных магнитной индукции вдоль що-го зазора $\rho \vec{B}_\eta$, а также производные угла поворота и скорости вращения ротора $\rho \gamma$, $\rho \omega_R$.

Исходными данными являются геометрические размеры и обмоточные данные ЯСМ, а также характеристики намагничивания сталей магнитопроводов машины.

Модель реактора разработана по тому же принципу, что и модель ЯСМ. Общий вид уравнений внешних ветвей реактора совпадает с (1), (2). При этом входящая в (2) буква \vec{L} обозначает матрицу динамических индуктивностей, а вектор \vec{E} равен произведению матрицы активных сопротивлений на вектор токов контуров реактора.

Модель циклоконвертера также разработана по принципу топологического описания объекта исследования. Она состоит из уравнений электрического состояния, описывающих процессы в силовой цепи и системы логических уравнений, моделирующих работу системы управления.

В соответствии с исходными допущениями вентили циклоконвертера моделируются ветвью, содержащей последовательно соединенные активное сопротивление и индуктивность, численное значение которых большое для запертого и малое для проводящего состояния, то есть, уравнения электрического состояния имеют постоянную структуру и переменные параметры. При этом записываются уравнения для каждой вентильной ветви, что обеспечивает учет коммутационных процессов.

Уравнения электрического состояния, представленные векторным уравнением внешних ветвей, имеют вид:

$$p\vec{i} + \check{\Gamma}\vec{\varphi} + \vec{c} = 0, \quad (5)$$

где \vec{i} - вектор токов внешних ветвей, $\vec{\varphi}$ - вектор потенциалов полюсов;

$$\check{\Gamma} = \begin{bmatrix} \check{a}_{11} & 0 & \check{a}_{13} \\ 0 & \check{a}_{22} & \check{a}_{23} \\ \check{a}_{31} & \check{a}_{32} & \check{a}_{33} \end{bmatrix}; \quad \vec{c} = \begin{bmatrix} \check{b}_1 \\ \check{b}_2 \\ \check{b}_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

- матрица обратных индуктивностей и вектор свободных членов.

Эти уравнения записаны по методу узловых потенциалов. Диагональные матрицы \check{a}_{11} , \check{a}_{22} , \check{a}_{33} и матрицы \check{a}_{13} , \check{a}_{23} , \check{a}_{31} , \check{a}_{32} определяются на основе обратных индуктивностей, а элементы вектора \vec{c} определяются произведением тока, активного сопротивления и обратной индуктивности.

Система уравнений электрического состояния кроме уравнений внешних ветвей включает также уравнения внутренних ветвей, с помощью которых определяются производные токов тиристорov, являющихся элементами вектора интегрирования.

Уравнения, моделирующие работу системы управления состоят из логических уравнений, на основе результатов решения которых вырабатываются сигналы на включение тиристорov, и уравнений, на основе результатов решения которых вырабатываются сигналы на запираение тиристорov. В последнем случае производится инвертирование общей системы уравнений для определения момента времени прохождения тока коммутируемого тиристора через ноль.

Предложенная обобщенная модель циклоконвертера универсальна в отношении схемного решения. Она применима как для мостовой схемы, так и для нулевой, включая случаи подсоединения катодных и анодных вентильных групп со стороны высокой частоты как от единой, так и от двух разных систем напряжения.

Во второй главе описаны две математические модели в фазных координатах автономного электропривода с нулевым и мостовым циклоконвертерами. При этом в первом случае в силовой схеме между ЯСМ и циклоконвертером включен шестифазный реактор. Для обеих схем электропривода математические модели формируются в соответствии с топологией схем.

Система уравнений электрического состояния записана и решается в базисе потенциалов независимых узлов. Эта система уравнений

для привода с нулевым циклоконвертером имеет вид

$$\vec{f}_c \cdot \vec{\varphi}_c + \vec{c}_c = 0, \quad (7)$$

где $\vec{\varphi}_c$ - вектор потенциалов независимых узлов,

$$\vec{f}_c = \sum \check{P}_{j\check{j}} \check{P}_{j\check{j}e}, \vec{c}_c = \sum \check{P}_{j\check{j}} \check{c}_j \quad (j\text{-ЯСГ, Р, НПЧ, ЯСД, ИГ, ИД}) \quad (8)$$

- матрица коэффициентов и вектор свободных членов.

Входящие в (8) величины имеют следующее содержание: \check{f}_j, \check{c}_j коэффициенты уравнений внешних ветвей структурных элементов (ЯСГ, реактора, НПЧ, ЯСД и источников напряжения постоянного тока в цепях возбуждения ЯСГ и ЯСД); \check{P}_j - топологическая матрица соединения структурных элементов; $\check{P}_{j\check{j}e}$ - матрица, транспонированная по отношению к \check{P}_j .

Матрицы соединения \check{P}_j описывают топологическую связь токов внешних ветвей структурных элементов. Размеры этих матриц по вертикали одинаковы и равны количеству независимых узлов схемы, а по горизонтали они равны количеству внешних ветвей соответствующего элемента. Численное значение элемента матрицы \check{P}_j , находящегося в l -той строке и k -том столбце, равно единице, если k -тая ветвь j -го структурного элемента имеет связь с l -тым независимым узлом, в противном случае оно равно нулю.

Система уравнений (7) решается относительно вектора $\vec{\varphi}_c$, а дальше выполняется обратный ход, в результате которого вычисляются векторы интегрирования структурных элементов с одновременным формированием вектора интегрирования всей системы. Новые значения интегральных переменных получают численным интегрированием одним из явных методов.

Разработана математическая модель программной реализации топологических связей. В этой модели матрицы соединения представлены в виде одномерных массивов, численные значения элементов которых равны порядковым номерам ненулевых элементов матриц при нумерации их по строкам. Это позволяет исключить операции умножения на нуль при вычислении произведений матриц (8) и рационально использовать оперативную память ЭВМ.

Модель электропривода с мостовым циклоконвертером формируется аналогично, а система управления здесь реализована по алгоритму, обеспечивающему получение на выходе НПЧ напряжения синусоидальной формы.

На основе математических моделей, описанных в 1-й и 2-й главах, разработан программный комплекс на алгоритмическом языке FORTRAN IV, включающий цифровые модели структурных элементов, са-

них приводов и программ общематематического и специального назначения.

В третьей главе описаны математические модели во вращающихся координатах $d, q, 0$ структурных элементов электропривода: ЯСМ, реактора и циклоконвертера. В отличие от математических моделей в фазных координатах здесь не выдержан топологический принцип формирования математических моделей.

Модель ЯСМ разработана на основе исходных допущений, принятых для модели в фазных координатах со следующими дополнениями: обмотка статора полагается симметричной, а намагничивающие силы в пространстве представляются только первой гармонической оставшейся.

Уравнения электрического состояния получены из исходных уравнений, записанных в фазных координатах. Переход к уравнениям во вращающихся координатах выполнен с помощью преобразований Парка-Горева. Следует отметить, что преобразованиям подвергаются только уравнения статора, а для уравнений магнитного и механического состояния различий нет.

Модель реактора представлена уравнениями электрического состояния, полученными из уравнений в фазных координатах. При этом шестифазный реактор представлен системой двух трехфазных, а уравнения для каждого из них записаны с помощью преобразований Парка-Горева. Важно отметить, что при условии симметричности нагрузки контуров и расположения этих контуров на одном сердечнике значение намагнивающей силы реактора равно нулю. В следствие этого в магнитной цепи реактора существует только поток рассеяния. Учитывая это, матрица электромагнитных параметров определяется только матрицей индуктивностей рассеяния.

Модель циклоконвертера представлена системой уравнений электрического состояния, имеющей вид:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{\text{КГ}} + \bar{i}_{\text{ЛГ}} - \bar{H}_{\text{ЛГ}} \bar{i}_{\text{Л}} &= 0; \\ \bar{H}_{\text{ГЛ}} \bar{\varphi}_{\text{КГ}} - \bar{y}_{\text{Г}} \bar{i}_{\text{КГ}} - \bar{H}_{\text{ДЛ}} \bar{\varphi}_{\text{Л}} - \bar{y}_{\text{Л}} \bar{i}_{\text{Л}} &= 0; \\ \bar{H}_{\text{ГЛ}} \bar{\varphi}_{\text{ЛГ}} + \bar{y}_{\text{Г}} \bar{i}_{\text{ЛГ}} + \bar{H}_{\text{ДЛ}} \bar{\varphi}_{\text{Л}} - \bar{y}_{\text{Л}} \bar{i}_{\text{Л}} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В (9) буквами $\bar{i}, \bar{\varphi}$ в основном тексте обозначены векторы токов и напряжений, буквами \bar{H}, \bar{y} - матрицы удельных проводимостей и активных сопротивлений ИПЧ. Буквами Г, Д в индексах обозначена при-

надлежность соответствующих величин к высокой и низкой частоте, а буквами К, А - к катодным и анодным вентиляльным группам со стороны высокой частоты. Буквы i, u в индексах обозначают принадлежность матриц удельных проводимостей к уравнениям токов и напряжений.

Первое уравнение в (9) является уравнением токов, а два последних - уравнениями напряжений. Уравнения токов описывают связь токов со стороны высокой и низкой частот, а уравнения напряжений описывают связь между потенциалами со стороны высокой и низкой частоты.

Предложенная математическая модель НПЧ разработана на основе моделей катодной и анодной вентиляльных групп во вращающихся координатах. Вентили здесь моделируются функцией состояния, равной единице для участка периода, соответствующего проводящему состоянию и нулю - для участка периода, соответствующего непроводящему состоянию.

Система (9) получена из уравнений вентиляльных групп на основе законов Кирхгофа и преобразования Парка-Гореза. Матрицы параметров определяются на основе функции управления, являющейся зависимостью, задаваемой в пределах 2π , а матрицы активных сопротивлений определяются на основе численного значения активного сопротивления тиристоров для проводящего состояния.

В четвертой главе приведена математическая модель автономного электропривода ЯСГ-НПЧ-ЯСД с циклоконвертером нулевого типа, функционирующего в замкнутой системе автоматического управления. Она ориентирована на исследование динамических режимов (пуска, изменения частоты вращения, изменения нагрузки).

Замкнутая система электропривода (без САУ) представлена векторным уравнением электрического состояния

$$\dot{X}_c \bar{Z}_c + \bar{F}_c = 0, \quad (10)$$

где \dot{X}_c - матрица коэффициентов, определяемая на основе матриц динамических индуктивностей ЯСГ и ЯСД, матриц параметров реактора и циклоконвертера; \bar{Z}_c - вектор неизвестных, элементами которого являются векторы производных токов ЯСГ, ЯСД, реактора, а также векторы потенциалов ЯСГ и векторы потенциалов на входе и выходе НПЧ; \bar{F}_c - вектор свободных членов, содержащий вынуждающие силы.

В САУ предусмотрено 6 контуров управления, содержащих пропорциональные и интегральные регуляторы. В этой САУ реализовано управление скорости ЯСД регулированием потока ЯСГ, потока ЯСД, ско-

рости вращения ЯСГ и напряжения на входе ЯСД путем изменения угла регулирования НПЧ. Предусмотрено стабилизацию магнитного потока ЯСД при управлении магнитным потоком ЯСГ и наоборот.

Реализованная САУ описывается векторным уравнением:

$$\vec{F}_c - \check{K}_n \rho \vec{y}_s - \check{K}_i \vec{y}_s - \vec{F}_0 = 0, \quad (11)$$

где \vec{F}_s , \vec{F}_0 - вектор регулируемых величин и вектор начальных значений этих величин: напряжения возбуждения ЯСГ и ЯСД, угол управления НПЧ, частота вращения ЯСГ; \check{K}_n , \check{K}_i - диагональные матрицы коэффициентов пропорциональных и интегральных звеньев регуляторов; \vec{y}_s , $\rho \vec{y}_s$ - вектор интегрируемых переменных и вектор интегрирования.

Алгоритм расчетов режимов состоит в совместном решении уравнений (10), (11) относительно векторов \vec{z}_c , $\rho \vec{y}_s$ и дальнейшим интегрированием методом Рунге-Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования.

На основе математических моделей, описанных в 3-й и 4-й главах, разработан комплекс программы во вращающихся координатах (КПВК). Кроме реализации математических моделей, он содержит программы специального и общематематического назначения.

В пятой главе изложены материалы по результатам исследования, полученным с помощью программного обеспечения на ЭВМ.

В первом параграфе этой главы выполнено обоснование и проверка уровня адекватности математических моделей на основе аналитического анализа исходных допущений, принятых в основу разработки моделей, и сравнения расчетных зависимостей с экспериментальными.

Во втором параграфе изложен порядок эксплуатации программного обеспечения на уровне организации проведения эксперимента на ЭВМ с учетом специфики физики процессов, протекающих в электроприводе. Полная и точная информация о программном обеспечении представлена в приложениях 2 и 3, где изложены сведения по эксплуатации программного обеспечения и программы в виде распечатки текстов исходных модулей.

Цифровые модели, являющиеся программной реализацией соответствующих математических моделей, также формируются по топологическому принципу. При этом в диссертации разработан пакет программ реализации топологических связей, являющийся ядром АСМ ЭМБС. Каждая цифровая модель структурных элементов состоит из подпрограмм: определения входной информации, определения коэффициентов уравне-

ний внешних ветвей и определения вектора интегрирования. Цифровые модели всей системы состоят из: главной программы, подпрограммы определения вектора интегрирования (всей системы), подпрограммы управления циклоконвертера и подпрограммы обработки и вывода результатов расчетов.

В третьем параграфе изложены результаты исследований электромагнитных процессов, где произведен анализ мгновенных значений функций состояния, а также представлены статические характеристики и произведен анализ системы по интегральным показателям электромагнитных величин. Представлены результаты расчетов аварийных режимов, вызванных пробоем и невключением вентиля.

В результате этой работы получена информация о влиянии на протекание процессов наличия демферных обмоток в ЯСГ и ЯСД, изменения угла регулирования и кратности высокой и низкой частот. Произведен гармонический анализ интегральных переменных с учетом упомянутых факторов. Сформулированы выводы по результатам исследования электромагнитных процессов.

1. Уменьшение кратности входной и выходной частот, то есть увеличение частоты вращения ЯСД при постоянной частоте ЯСГ приводит к интенсивному падению фазных токов в силовой цепи электропривода, быстрому увеличению фазных напряжений ЯСД и сравнительно с ним значительно меньшим возрастанием фазного напряжения ЯСГ.

2. С увеличением кратности частот происходит ухудшение качества токов и электромагнитных моментов и улучшение качества напряжений ЯСГ и ЯСД.

3. Среди высших гармонических составляющих напряжений и токов ЯСД наибольшие численные значения имеют гармоники с номерами 5, 7. Следовательно нежелательными гармониками токов и напряжений в цепях ЯСД являются высшие гармоники.

4. Номер основной гармоники (для генератора первая по частоте ЯСГ, а для двигателя первая по частоте ЯСД) напряжений и токов ЯСГ зависит от кратности входной и выходной частот НПЧ и равен численному значению этой кратности.

5. Среди неосновных гармоник напряжений ЯСГ максимальные численные значения имеют те гармонические составляющие напряжений, номера которых равны числам 5 и 7, умноженным на кратность частот, то есть нежелательными являются высшие по отношению к основной гармонике.

6. Номера неосновных гармонических составляющих токов ЯСГ,

выделяющихся большими численными значениями, не совпадают с номерами выделяющихся в этом же отношении гармонических составляющих напряжений ЯСГ. При кратности частот меньшей 4 максимальное численное значение имеет гармоника с номером, равным квадрату кратности частот, а при кратности большей или равной 5 максимальной среди неосновных гармоник является одна из субгармоник.

7. Максимальные среди высших гармонических составляющих электромагнитных моментов ЯСГ и ЯСД являются 6-я и 12-я гармоники по частоте ЯСД.

8. Наличие д. о. в ЯСГ и ЯСД приводит к увеличению численных значений токов, но при этом происходит ухудшение качества токов и электромагнитных моментов и улучшение напряжений ЯСГ и ЯСД.

9. Увеличение численного значения угла регулирования НПЧ влечет за собой спадание токов и ухудшение их качества, однако качество напряжений при этом существенно улучшается.

10. Аварийные режимы, связанные с пробоем вентилей являются более тяжелыми, чем при их невключении.

В четвертом параграфе изложены результаты исследований динамических режимов. Формулируем основные выводы по результатам исследования электромеханических процессов.

1. Получена информация о поведении электропривода при пусковых переходных процессах, то есть получены численные значения основных величин, позволяющих оценить энергетические соотношения.

2. Выполнен анализ влияния САУ на работу электропривода, а также анализ взаимного влияния его структурных элементов.

3. Получены количественные соотношения между параметрами системы управления (углом регулирования НПЧ) и токами контуров возбуждения электрических машин при постоянной и переменной частоте ЯСД.

4. Выполнен аналогичный анализ динамических режимов, регулирование скорости вращения ЯСД в сторону ее увеличения и уменьшения магнитным потоком ЯСГ, а также углом регулирования НПЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Актуальной задачей является создание математического аппарата и на его основе средства моделирования (в системе "человек - ЭВМ"), позволяющего исследовать на ЭВМ процессы и характеристики электропривода "ЯСГ - НПЧ - ЯСД" с учетом взаимного влияния струк-

турных элементов, нелинейностей электрических машин, коммутационных процессов преобразователя частоты и работы системы автоматического управления.

2. В процессе решения поставленной задачи получены следующие результаты:

а) общая методика исследования на ЭВМ процессов и характеристик автономного электропривода "явнополюсный синхронный генератор - циклоконвертер - явнополюсный синхронный двигатель", реализованная в виде автоматизированной системы моделирования, состоящей из математических моделей, алгоритмов, программ и методического обеспечения, представляющего собой описание функционирования программного обеспечения и инструкций по эксплуатации программ;

б) математические модели в фазных и вращающихся координатах автономного электропривода и его структурных элементов (циклоконвертера и силового реактора), системы управления циклоконвертера (в фазных) и системы автоматического управления (в вращающихся) координатах, а также алгоритмы расчетов процессов в фазных и вращающихся координатах;

в) программное обеспечение, являющееся реализацией соответствующих математических моделей и алгоритмов, а также пакет прикладных программ специального и общематематического назначения;

г) статические характеристики, информация о поведении электропривода в динамических режимах (пуск, изменение частоты вращения) при работе в разомкнутой и в замкнутой САУ, а также информации о протекании электромагнитных процессов электропривода в аварийных режимах, вызванных пробоем или невключением вентиля циклоконвертера.

2. Полученные результаты позволяют:

а) выполнить исследования автономного электропривода "явнополюсный синхронный генератор - циклоконвертер - явнополюсный синхронный двигатель" на ЭВМ в диалоговой системе "человек - ЭВМ";

б) при исследовании электропривода учитывать такие определяющие факторы, влияющие на протекание процессов, как взаимное влияние структурных элементов электропривода, нелинейностей электромагнитных связей контуров реактора и коммутации вентиля циклоконвертера;

в) выполнять расчеты процессов, протекающих в электроприводе, с учетом геометрии магнитопроводов и обмоточных данных электрических машин, что открывает возможность оптимизации их конструкций;

г) обеспечить использование цифровых моделей структурных элементов электропривода в готовом виде для моделирования других типов ЭМВС;

д) на основе результатов, полученных при расчете статических характеристик, выполнять анализ количественных соотношений электромагнитных величин в различных режимах работы электропривода (включая аварийные), а также выполнить гармонический анализ основных параметров; оценивать качество работы системы управления циклоконвертера

е) выполнять анализ поведения электропривода в динамических режимах, определять время переходных электромагнитных и электромеханических процессов (время пуска, изменения скорости вращения), оценить количественно влияние САУ на работу электропривода (определять численные значения перерегулирования, постоянных времени); выполнять синтез С.У путем подбора численных значений коэффициентов регуляторов, а также осуществлять выбор регуляторов.

3. Разработанная автоматизированная система моделирования автономного электропривода может являться подсистемой САПР. Она рчедрена и используется в ряде научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Плахтына Е. Г., Васылив К. Н. Математическая модель перспективного электропривода лущильного станка на базе вентильного двигателя переменного тока. - В кн.: Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность, 1985, вып. 16, с. 87-92.

2. Математическая модель вентильного двигателя переменного тока. /Е. Г. Плахтына, В. Н. Рябов, К. Н. Васылив, В. И. Иванов. - Техническая электродинамика, 1986, № 2, с. 77-82.

3. Математическая модель управляемого бесконтактного вентильного двигателя переменного тока. /И. Е. Овчинников, Е. Г. Плахтына, В. Н. Рябов, К. Н. Васылив, Ф. А. Исабаш. - Электротехника, 1986, №6, с. 33-37.

4. Плахтына Е. Г., Васылив К. Н. Автоматизированная система моделирования электромашино-вентильных систем. Информационный листок о научно-техническом достижении N 86-095. - Львов: ЦНТИ, 1986.

5. Васылив К. Н., Гаранджа С. А. Математическая модель автономного электропривода по схеме «синхронный генератор — циклоконвертер — синхронный двигатель» в координатах d, q, O . В сб. Материалы 12 конференции молодых ученых Института прикладных проблем механики и математики АН УССР, Львов 21—23 окт. 1987 (Ин-т прикл. пробл. мех. и мат. АН УССР. — Львов, 1988 — с. 22 т. 28 (Рукопись деп. в ВНИИТИ 8 августа 1988, № 6308-B88).

Тезисы докладов:

6. Васылив К. Н. Математическая модель вентильного двигателя с коммутатором циклоконвертерного типа. В кн.: Проблемы нелинейной электротехники. / Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. Часть 2. — Киев: Наукова думка, 1984, с. 207—208.

7. Васылив К. Н. Математическая и цифровая модели автономного регулируемого электропривода «явнополюсный синхронный генератор — электромагнитный реактор — циклоконвертер — явнополюсный синхронный двигатель». — В кн.: Проблемы нелинейной электротехники. / Тезисы докладов 3-й Всесоюзной научно-технической конференции. Часть 3. — Киев: Наукова думка, 1988, с. 93—96.

8. Васылив К. Н., Дячишин Б. В., Рудый Т. В. Автоматизированная система моделирования статических характеристик вентильных двигателей. — В кн.: Вентильные электромеханические системы с постоянными магнитами. / Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. — Москва, 1989, с. 47.

9. Васылив К. Н., Рудый Т. В., Гаранджа С. А. Математическая модель автономного электропривода «явнополюсный синхронный генератор — циклоконвертер мостового типа — явнополюсный синхронный двигатель». — В кн.: Современные проблемы электромеханики. / Тезисы докладов Всесоюзной конференции к 100 летию изобретения трехфазного асинхронного двигателя. Часть 1. — Москва: МЭИ, 1989, с. 203—204.

10. Васылив К. Н., Полюга Л. Н. Математическая и цифровая модели в координатах d, q, O автономной электромеханической системы «явнополюсный синхронный генератор — циклоконвертер — явнополюсный синхронный двигатель». — В кн.: Управление и автоматизация проектирования в электроэнергетических системах. / Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Кибернетика электроэнергетических систем». Челябинск: ЧПИ, 1990, с. 82—83.

АНБ им. В. Стефаники
АН УССР

Подписано к печ. 10.06.91. Формат 60×84/16. Печать офсет. Бумага офсет. Усл. п. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,17. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Бесплатно. Зак. 2614.

Областная книжная типография, 290000, Львов, ул. Стефаника, 11.

106819

Бесплатно.

AB 25.438
AB 25.438