

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи  
УДК 621.3.01

КИТАЕВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ  
ПОДХОДЫ АНАЛИЗА РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
УСТРОЙСТВ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

Специальность: 05.09.01 – электрические машины  
05.09.05 – теоретическая электротехника

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

Киев – 1997

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751824 (R)

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи  
УДК 621.3.01

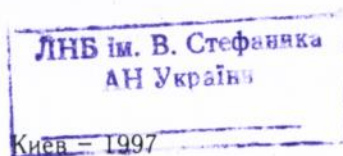
КИТАЕВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ  
ПОДХОДЫ АНАЛИЗА РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
УСТРОЙСТВ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

Специальность: 05.09.01 – электрические машины  
05.09.05 – теоретическая электротехника

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук



021.301+  
621.301+  
621.314

AB 37.036

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Херсонском индустриальном институте  
Министерства образования Украины

Официальные оппоненты:

Заслуженный работник народного образования Украины  
доктор техн. наук, профессор Захаров Михаил Константинович;

Заслуженный работник народного образования Украины  
доктор техн. наук, профессор Повстень Виктор Александрович;  
доктор техн. наук, с.н.с. Лесник Владимир Якимович

Ведущая организация - Киевский институт военно-воздушных  
сил Министерства обороны Украины

Защита состоится "15" апреля 1997 года в 14 часов  
на заседании специализированного ученого совета Д.01.98.04  
при Институте электродинамики НАН Украины (252680, Киев-57,  
проспект Победы, 56, тел.446-91-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
электродинамики НАН Украины.

Автореферат разослан "12" февраля 1997 г.

Ученый секретарь специализированного  
ученого совета

д.т.н., профессор

Титко А.И.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень исследованности тематики диссертации.

Дифференциальный принцип, принятый в общем электромашиностроении, определил формирование специалистов отдельно по трансформаторам и по конкретным типам электрических машин. Благодаря узкой направленности, такие специалисты обеспечили глубокий анализ проблем локального характера и в этом смысле оправдали свое назначение. При создании сложных электромеханических систем и комплексов получил развитие другой, а именно, интегральный принцип, отдающий предпочтение специалистам универсального профиля, которые воспринимают совокупность электротехнических устройств (катушки индуктивности (КИ), дроссели (ДР), трансформаторы (ТР) и электрические машины (ЭМ)) как единое и взаимосвязанное семейство. Определено это сложностью расчленения технических проблем комплекса на составные задачи, взаимовстроенностью элементов и необходимостью использования панорамного взгляда на их взаимодействие.

Интегральный принцип оказался полезен не только на этапе разработки и проектирования, но и при решении производственно-технологических проблем. Например, требования по взаимозаменяемости изделий, стабильности и идентичности их выходных характеристик были выполнены организацией контроля исходных магнитных материалов, составных элементов конструкции ТР и ЭМ, рассматриваемых как КИ или ДР.

Специфику работы указанных специалистов дополняет и то обстоятельство, что они обязаны встроить свои разработки в комплекс (систему) при обеспечении таких показателей как точность, готовность, ресурс, надежность, оптимальность номинального режима и т.д. И тогда неизбежна дальнейшая их интеграция, но уже со специалистами другого профиля. Общение с ними на языке классических форм анализа, принятых, например, в теории ЭМ неприемлемо, как использование области односторонней компетенции.

Для успешной работы в оговоренных условиях нужны:

- четкая и стройная картина физических явлений, определяющая механизм и принцип действия электротехнических устройств, увязанная с положениями теории и подтверждаемая на практике;
- анализ поведения этих устройств на основе подходов и методов, принятых при исследовании блоков систем автоматики, электроники и вычислительной техники.

Что касается первого условия, то оно усилиями поколений изве-

стных авторов в значительной мере обеспечено. Однако до сих пор такие вопросы как поведение ДР, амплитудно-фазовые характеристики и энергетические показатели работы ТР и самовозбуждающихся ЭМ остаются предметом острых дискуссий. В отношении второй задачи решения также известны. Они основываются на использовании метода эквивалентного генератора и теории полюсников. Известны и явления, в соответствии с которыми ТР и ЭМ называются типичными двух- и четырехполюсниками. Однако в основном они носят декларативный характер.

Диссертационная работа подготовлена в связи с решением задач, определенных правительственными темами "Темп-С", "Ресурс", "Воздух", "Малахит", "Точка" и др. по созданию новой ракетно-космической техники, а также в соответствии с планами научно-исследовательских работ Херсонского индустриального института, которые выполнялись на основании программы ГКНТ № 0.37.02 и научно-технической программы "Ресурсосбережение", принятой Постановлением № 12 Госкомитета Украины по вопросам науки и техники от 4.05.92, а также в рамках хозяйственных работ: № 4/75, № ГР 77058047; № 26/80, № ГР 80064948; № 6/90, № ГР 0189062744 и др.

Цель работы и основные задачи исследований. Цель настоящей работы – описание явлений и процессов, механизма действия и работы КИ, ДР, ТР и ЭМ на основе данных эксперимента и практики построения электромеханических систем, а также анализ поведения ТР и ЭМ при использовании положений теории полюсников.

Для достижения этой цели следует решить следующие задачи:

- дать описание картины амплитудно-фазовых соотношений между токами, э.д.с. и напряжениями в КИ, ДР и ТР;
- разработать новый взгляд на поведение ДР с учетом модуляции индуктивности, вызванной перемагничиванием сердечника с заходом в область парапроцесса, что определяет наличие в цепи чередующихся переходных процессов, зависящих от амплитуды приложенного напряжения, параметров обмотки и внутреннего сопротивления источника;
- раскрыть физическую природу феррорезонансных явлений, имеющих место в цепях с дросселями и линейными конденсаторами на основе действия указанной выше модуляции индуктивности дросселя;
- развить положения теории двух- и четырехполюсников в части разработки более удобных схем замещения, векторных и круговых диаграмм, а также анализа их входных и выходных характеристик с

расчетом на решение тех вопросов, которые являются предметом исследования ТР и ЭМ;

- показать, что сближение теории полюсников с теорией ТР и ЭМ не рвет ее традиционные связи с другими разделами теоретической электротехники, например, с теорией фильтров типа К, а, наоборот, способствует их упрочнению;

- дать приложение теории двух- и четырехполюсников к анализу поведения ТР и ЭМ с целью унификации исследования характеристик этих устройств;

- разработать новую концепцию на механизм работы самовозбуждающихся машин постоянного и переменного токов в соответствии с принципом действия известных автоколебательных устройств, основанного на выполнении критериев баланса амплитуд и фаз;

- показать, что использование разработанных подходов способствует успеху при решении задач по оптимизации режимов работы ТР и ЭМ с учетом требований, предъявляемых к системе и заложенных в нее возможностей.

Объект и методы исследований. Объектами исследований служили ДР, ТР и ЭМ систем инерциальной навигации и общепромышленного назначения, а также устройства аппаратурной реализации способов устойчивого запуска и форсированного торможения электрических двигателей.

При выполнении диссертационной работы использовались классическая теория электротехники, электрических машин и электропривода, методы анализа энергетических процессов устройств преобразовательной техники, методы моделирования электромеханических систем с использованием ЭВМ, экспериментальное исследование на лабораторных стендах, макетах, промышленных установках и комплексах. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов основана на корректности исходных предпосылок и допущений. Она подтверждена также получением повторяющихся данных по независимым методикам исследования, систематической проверкой теоретических выводов на действующем оборудовании как в лабораторных так и в промышленных условиях, применением математических методов анализа данных эксперимента.

Научная новизна. Альтернативность всегда связана с отходом от традиционных подходов и предложением иных, более эффективных или объективных. Отсюда новизну данной работы представляют:

- новый взгляд на механизм поведения ДР, подключенного непосредственно к зажимам источника синусоидального напряжения или находящегося в составе цепи с линейным конденсатором. В соответствии с ним утверждается, что модуляция индуктивности ДР, вызванная перемагничиванием сердечника с заходом в область парапроцесса определяет возникновение таких явлений как переходной процесс, динамическая настройка контура в резонанс и т.д. Отсюда устанавливается несинусоидальность не только тока в обмотке, но и магнитного потока в сердечнике, а также физическая природа различных эффектов;

- новая концепция на процесс самовозбуждения машин постоянного и переменного токов, согласно которой их работу определяют условия выполнения баланса фаз и амплитуд. Физическая природа начального толчка при этом может быть любая (внешняя наводка, внутренняя флуктуация и т.д.). Тем самым показано, что по своему принципу действия указанные ЭМ стоят в одном ряду с другими самовозбуждающимися устройствами и системами, относящимися к семейству автоколебательных;

- развитие положений теории двух- и четырехполюсников в части разработки новых средств анализа их поведения с подробным исследованием характеристик входа и выхода;

- анализ поведения ТР и всех типов ЭМ в рамках их принадлежности к двух- и четырехполюсникам, что унифицирует и упрощает весь процесс исследования на основе однотипных схем замещения, простых, компактных и удобных для расчета и программирования соотношений.

Конкретный личный вклад диссертанта в разработку научных результатов, которые выносятся на защиту:

- организация и проведение комплекса исследований по изучению амплитудно-фазовых соотношений между токами. э.д.с. и напряжениями ТР;

- разработка нового взгляда на поведение ДР при непосредственном подключении его к источнику питания и в составе цепи с конденсаторами;

- изложение новой концепции на самовозбуждение машин постоянного и переменного тока;

- предложения по развитию теории полюсников в направлении сближения ее с теорией ТР и ЭМ;

- результаты приложения теории полюсников к исследованию ТР и ЭМ.

Обоснование теоретической и практической ценности исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в единении теоретической электротехники и теории электрических машин через разделы: "Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи с источником синусоидального напряжения" и "Теория двух- и четырехполюсников". Тем самым обеспечен принцип преемственности наук, создана логически стройная, увязанная с экспериментом и практикой система взглядов и теоретических положений на механизм работы и принцип действия ДР, ТР и ЭМ. При этом сами стыковочные разделы получили более качественное звучание за счет устранения имевших место некорректностей и предложения новых методов и средств анализа.

Практическая ценность определена тем, что полученные результаты поднимают уровень понимания принципа действия и механизма работы ДР, ТР и ЭМ, позволяют более осознанно и грамотно подойти к вопросам их проектирования, разработки, исследования и эксплуатации. Более того они дают возможность специалисту оперативно и качественно выполнить аналитическое исследование поведения объекта на основании известных входных данных, приведенных, например, в каталоге. Кроме того приведенный в работе материал существенно упрощает решение таких прикладных вопросов как организация частотного запуска двигателей, реализация их форсированного торможения и т.п., поскольку они сводятся к уровню обычных инженерных задач.

Результаты работы открывают и тому же возможность создания языка общения между специалистами разного профиля, ведущих разработку заданной системы (комплекса). Они же могут быть использованы при построении учебного процесса по изучению электротехнических дисциплин студентами электротехнических и неэлектротехнических специальностей, поскольку позволяют изложить лекционный материал в компактной, простой, логичной и научно строгой форме.

Практическая реализация результатов работы. Результаты работы использованы:

- предприятиях ракетно-космического комплекса при создании элементной базы (т.е. КИ, ТР и ЭМ) построения систем инерциальной навигации, организации всех форм производственно-технического контроля и конструкторско-технологических испытаний указанных изделий, реализации частотного запуска и форсированного торможения курсовых гироскопов;

- электромашиностроительных заводах Херсона и Новой Каховки

путем создания РТМ и методик расчета характеристик ЭМ различного типа по заданным исходным данным, а также для оценки качества статоров, изготавливаемых на производстве;

- Николаевском трансформаторном заводе при исследовании влияния технологических факторов на магнитные характеристики сердечников и при внедрении производственной установки для отбраковки последних;

- Тернопольском ХБК при создании частотно-регулируемого электропривода наматывающего устройства шлифовальной машины;

- кафедре электротехники Херсонского индустриального института при организации учебного процесса изучения электротехнических дисциплин.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на II-й Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, Рига, 1964; 6-й межведомственной конференции МОМ, Свердловск, 1967; совещании ВПК, Москва, 1969; на Всесоюзном совещании при Московском доме научно-технической пропаганды в 1970 г.; на У-й Всесоюзной конференции по диффузионной сварке, Москва, 1970 г.; на IV -й Всесоюзной конференции по вариаторам и системам гибкой связи, Одесса, 1972 г.; на II-й Всеукраинской конференции по электротехнике, Одесса, 1977 г.; на IV-й Всесоюзной конференции по электроприводам с улучшенными характеристиками, Иваново, 1983 г.; на IX-м Пленуме по электротехнике Госкомобра СССР совместно с заведующими кафедр электротехники, Киев, 1991 г.; на многих ежегодных отчетных научно-технических конференциях вузов Москвы, Челябинска, Одессы, Севастополя, Херсона и др.

Публикации. Результаты работы отражены в 50 публикациях, включающих два учебных пособия, 37 статей и II авторских свидетельств. В общей сложности соискатель имеет 75 научных работ и 15 авторских свидетельств.

Структура диссертации и ее объем. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературных источников и приложения. Содержит 248 стр. машинописного текста, 76 рисунков, 14 таблиц, 300 пронумерованных формул. Общий объем диссертации составляет 297 стр. Список литературы включает 158 работ отечественных и зарубежных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, приведены характеристики научной новизны, практической значимости и реализации результатов работы.

В первой главе рассматривается поведение пассивных двухполюсников на примере линейной и нелинейной КИ, причем упор сделан на амплитудно-фазовые соотношения и на форму кривых тока  $i$ , магнитного потока  $\Phi$ , э.д.с.  $E$  и напряжение сети  $u$ . Постановка задачи продиктована повышенным вниманием к фазировке сигналов, поступающих с различных датчиков индуктивного и трансформаторного типов для формирования положительных и отрицательных обратных связей; объективным отношением к методике магнитных измерений, проводимых с целью контроля магнитных свойств материалов и сердечников ДР, ТР и ЭМ перед их сборкой; а также стремлением раскрыть подлинный механизм работы ДР как при его автономном включении в сеть (в том числе и при ограниченной мощности источника, что характерно для измерительных установок и бортовых систем) так и в составе цепи с линейными и нелинейными конденсаторами.

Первая часть задачи была решена экспериментальным исследованием специальных ТР разделительного типа с сердечниками из ферромагнитных материалов и без них. Первичная и вторичная обмотки этих ТР были выполнены одновременно при использовании двойного провода, что исключало погрешности в маркировке зажимов и направлении намотки. Поскольку в таком устройстве э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции равны, то измерением последней можно судить о поведении первой. Для измерения использовались осциллографические методы, а также различные электроизмерительные схемы. Итог исследований (применительно к режиму х.х.): ТР не инвертирует выходной сигнал по отношению к входному, если измерение их ведется с одноименных зажимов идентично намотанных первичной и вторичной обмоток. Отсюда следует, что э.д.с. взаимной индукции и самоиндукции сохраняют фазу приложенного напряжения сети  $u$ , и потому запись основного уравнения баланса напряжений для идеальной КИ и реального ДР примет соответственно вид:  $u = e$  и  $U = IZ + E$ , где  $Z$  - полное комплексное сопротивление обмотки. Иллюстрирующие их векторные диаграммы приведены на рис. 1б, в. В режиме работы ТР под нагрузкой установлено, что токи первичной обмотки и нагрузки не имеют противофазы, если их условно положительное направление выбрано от

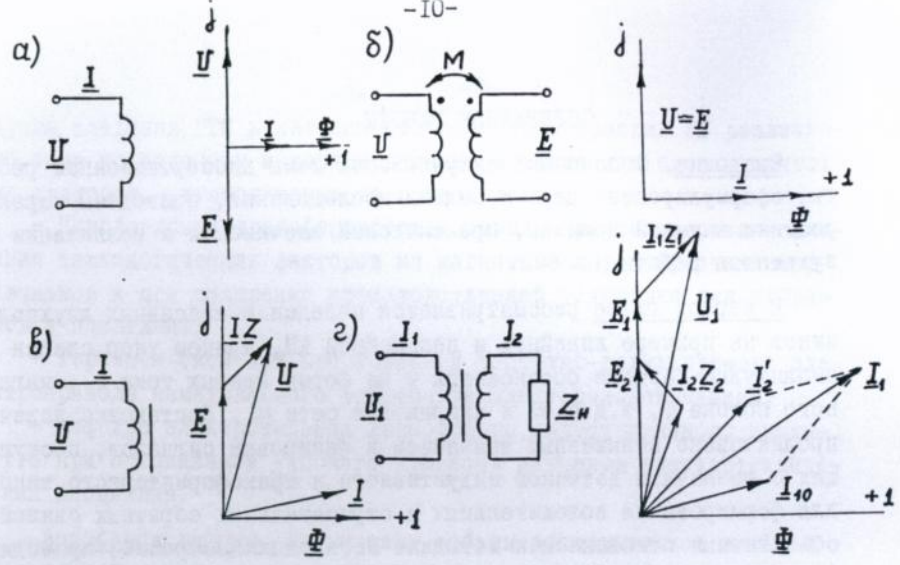


Рис. I Иллюстрации к решению вопроса о фазовом сдвиге э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции

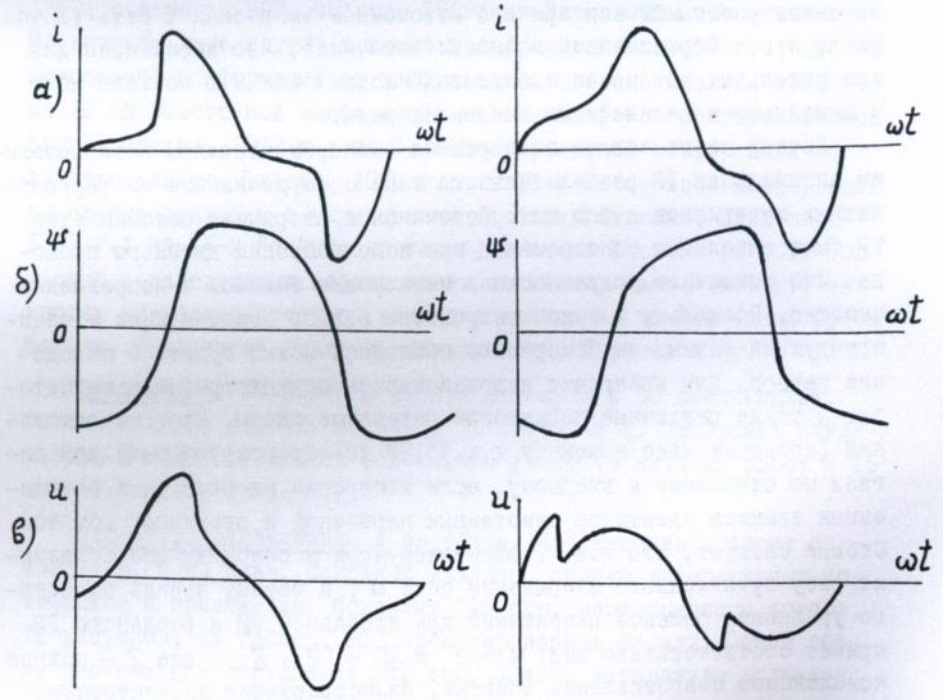


Рис. 2 Наиболее типичные осциллограммы  $i$ ,  $\psi$ ,  $u = f(\omega t)$  дросселя, введенного в состояние глубокого насыщения

одноименных зажимов обмоток. Следовательно, векторная диаграмма ТР должна иметь вид, приведенный на рис.1г .

Вторая часть задачи, т.е. вопрос о поведении ДР и о форме  $\Phi$ ,  $i$ ,  $u$  был решен также экспериментальным путем при проведении исследований по методике магнитных испытаний. Последние же, как известно, различают при синусоидальной магнитной индукции и при синусоидальной магнитной напряженности. Результаты исследований, приведенных в диссертации, показали, что:

- если сердечник ДР пребывает в зоне максимальных проницаемостей, то магнитный поток в сердечнике, действительно, близок к синусоидальному и не зависит от варьирования обмоточными данными в достаточно широких пределах;

- при перемагничивании сердечника ДР с заходом в область парапроцесса возникает модуляция индуктивности, причём изменение индуктивности от максимального значения до минимального происходит в режиме близком к ключевому и качество работы ключа тем выше, чем острее колено кривой намагничивания;

- ключевой режим работы вызывает в цепи наличие чередующихся переходных процессов, под влиянием которых формируются зависимости тока и магнитного потока явно несинусоидального вида (рис.2а,б). На характер протекания переходных процессов влияют: напряжение сети питания, параметры обмотки, дополнительно включенных элементов и внутреннего сопротивления источника. При соизмеримости первых и последних наблюдается искажение формы напряжения на зажимах ДР, даже при его прямом включении на зажимы источника (рис.2в ).

Таким образом, организация магнитных измерений при синусоидальной магнитной индукции (равно как и при синусоидальной напряженности) для образцов, пребывающих в состоянии глубокого насыщения, - это технически неразрешимая задача. Тем более, что с целью удобства проведения испытаний между источником и установкой ставится регулятор напряжения (потенциометр, ЛАТР и т.д.), внутреннее сопротивление которого соизмеримо с параметрами образца. Отсюда возможность отбраковки сердечников только на основании использования дифференциальных методов, т.е. с привлечением контрольных пакетов.

Установление картины процессов в работающем ДР позволило подобрать и соответствующий математический аппарат для их описания. Он основывается на использовании метода кусочно-линейной аппроксимации и интеграла Дюамеля. В результате получены расчетные формулы для тока:

$$i(\omega t) = \frac{u(\omega t_1)}{R + R_g} (1 - e^{-at}) + \frac{-I_2 - U_m}{R + R_g} \left\{ \sin \omega(t - t_1) + \frac{1}{\omega^2 + a^2} \times \right. \\ \left. \times \left[ e^{-a(t-t_1)} (a \cos \omega t_1 - e^{-2at} (a \cos \omega t + \omega \sin \omega t)) \right] \right\}, \quad (I)$$

где  $\omega t_1$  - момент полупериода, при котором сердечник ДР входит в состояние насыщения;  $a$  - коэффициент, равный отношению  $(R_g + R) / (L_g + L)$  ( $R, L$  - параметры обмотки ДР,  $R_g, L_g$  - источника); магнитного потока и напряжения на зажимах ДР.

В составе комплекса ДР может оказаться в любой комбинации включения с используемыми здесь конденсаторами. Тогда в цепи возможны триггерные эффекты, объяснение которым впервые дал П.Л.Калантаров на основе построения результирующих в.а.х.  $N$ - и  $S$ -образного вида. Однако оно лишено физичности.

Предложено другое объяснение, которое построено на использовании условий и следствий резонансного режима. Последний же, как известно, достигается проведением операции настройки. Механизм настройки в нашем случае усматривается в модуляции индуктивности, и потому на протяжении каждого полупериода цепь может пребывать в дорезонансном, резонансном и послерезонансном состоянии. Поскольку настройка в резонанс здесь носит острый динамический характер, то возникающие импульсы тока имеют вид пикообразных функций. Подобную картину кривых тока можно наблюдать при подключении линейного конденсатора к источнику напряжения прямоугольной или трапецевидной формы. Под воздействием импульсов тока конденсатор заряжается до напряжения, определяемого суммой напряжения ДР и источника, и сохраняет его неизменным на протяжении почти всего полупериода (рис.36). Затем происходит смена полярности источника, изменение направления тока, рост напряжения на зажимах ДР, последующая настройка в резонанс, формирование импульса тока противоположной полярности и т.д. Таким образом, в основе работы рассматриваемой цепи лежит обычный перезаряд конденсатора, и по форме возникающих импульсов тока она может быть отнесена к вибраторам, по форме напряжения на конденсаторе - к мультивибраторам, а по форме на зажимах ДР (рис.32) - к ГЛИН.

В цепи с параллельным соединением тех же элементов наблюдается другой эффект, а именно: формирование третьей гармоники в кривой общего тока. Приведенные на рис.4 осциллограммы наглядно иллюстрируют этот процесс.

Изложенные подходы могут быть использованы для объяснения яв-

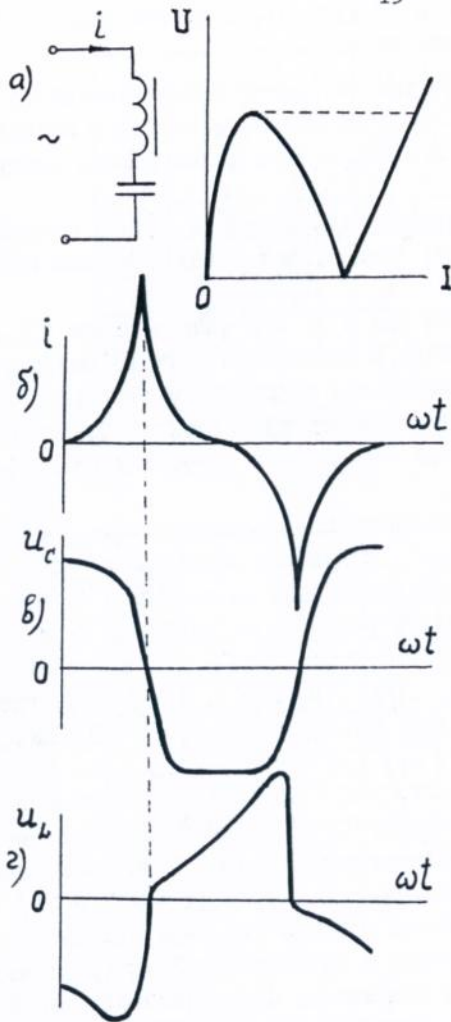


Рис.3 Последовательное соедине-  
ние дросселя и конденсатора

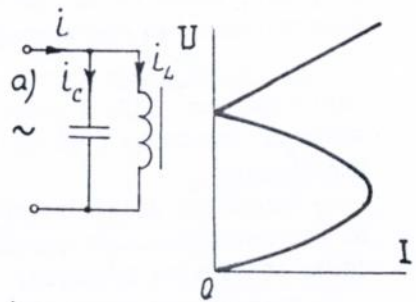
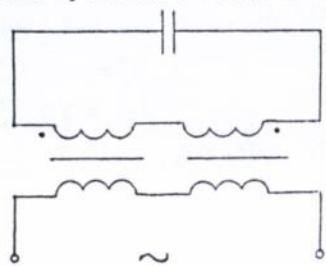


Рис.4 Параллельное соедине-  
ние дросселя и конденсатора

Рис.5 Принципиальная схема па-  
раметрического трансформатора



лений в более сложных феррорезонансных цепях. К таким относится, например, схема параметрического ТР (рис.5). В работе выполнено исследование его стабилизирующих свойств.

Во второй главе дается развитие положений теории активного двухполюсника (АДК) и пассивного четырехполюсника (ЧП) в направлении их сближения с теорией ТР и ЭМ. С этой целью решены следующие задачи:

- выполнено исследование характеристик входа и выхода на основе использования схем замещения, описывающих поведение этих цепей более объективно и просто;

- установлены критерии работы АДК и ЧП при максимальном к.п.д.

Показано также, что стремление к преимственности не разрывает традиционных связей теории полюсников, например, с теорией фильтров, а, наоборот, способствует изложению последней на основе положений символического метода без обращения к гиперболическим функциям.

При решении сформулированных задач использованы схемы замещения, приведенные на рис.6а,б, в, г. К токовым характеристикам схемы рис.6а отнесены зависимости напряжений на нагрузке  $U_2$  и входном сопротивлении  $U_{вх}$ , активной мощности на нагрузке  $P_2$  и генератора  $P_T$ , а также к.п.д.  $\zeta$  в функции тока  $I$  или в относительной форме соответственно:  $\gamma_2$ ,  $\gamma_{вх}$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_T$ ,  $\zeta = f(\beta)$ , где  $\gamma_2 = U_2 / U_{20}$ ,  $\gamma_{вх} = U_{вх} / U_{20}$ ,  $\rho_2 = U_2 I \cos \varphi_n / U_{20} I_{кз}$ ,  $\rho_T = U_{20} I \cos \psi_2 / U_{20} I_{кз}$ ,  $\zeta = \rho_2 / \rho_T$ ,  $\beta = I / I_{кз}$ ,  $I_{кз}$  - ток режима к.з.,  $U_{20}$  - напряжение генератора в режиме х.х.,  $\varphi_n$  - аргумент нагрузочного сопротивления,  $\psi_2$  - угол сдвига между  $U_{20}$  и  $I$ . Аналитические выражения этих зависимостей при условии равенства  $\varphi_n$  и  $\psi_2$  имеют элементарно простой вид:  $\gamma_2 = 1 - \beta$ ,  $\gamma_{вх} = \beta$ ,  $\rho_2 = (1 - \beta) \beta$ ,  $\zeta = 1 - \beta$ . Их графическое изображение дано на рис.7а и отличается от известного наличием двух участков в зависимости  $\zeta = f(\beta)$ : вертикально возрастающего и линейно падающего. Справедливость такой формы доказана путем обращения к схеме рис.6б, в которой сопротивление  $Z_0$  может меняться по модулю от любого конкретного значения до бесконечности. Исследование аналитического выражения к.п.д. с учетом активных потерь в  $Z_0$  на экстремум по переменной  $\beta$  дает величину  $\beta_{к}$ , при которой  $\zeta$  примет значение  $\zeta_{мак}$ :

$$\beta_{к} = -\alpha + \sqrt{\alpha(1+\alpha)}, \quad (2)$$

$$\zeta_{мак} = (\sqrt{1+\alpha} - \sqrt{\alpha})^2, \quad (3)$$

где  $\alpha = Z_{вх} / Z_0$ .

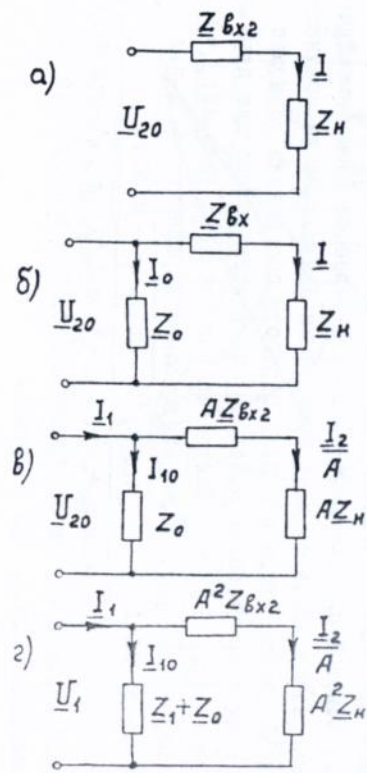


Рис. 6 Схемы замещения АДК и ЧП

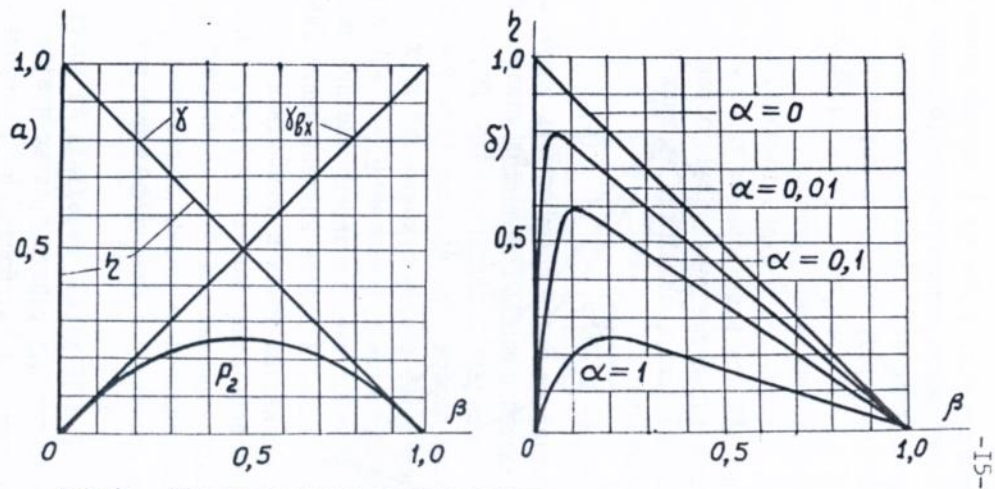


Рис. 7 Характеристики двухполюсника

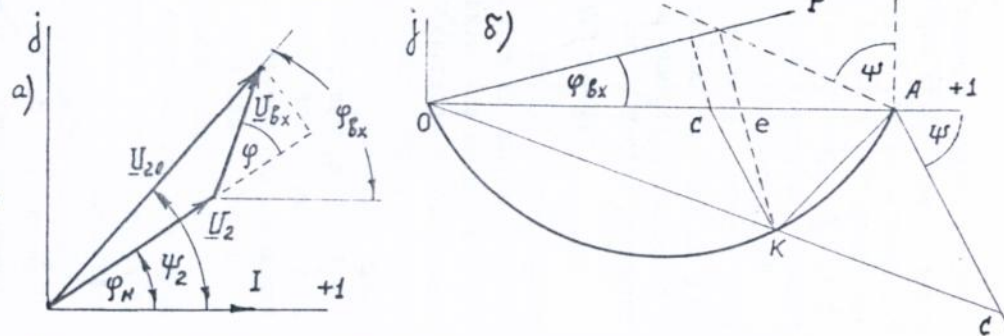


Рис. 8 Векторная и универсальная круговая диаграммы АДК

Отсюда следуют выводы: в режиме х.х. ( $\beta = 0$ )  $\zeta$  всегда равен нулю; по мере роста модуля поперечного сопротивления (снижение  $\alpha$ )  $\zeta_{\max}$  увеличивается, а соответствующее ему значение  $\beta_k$  уменьшается, что определяет усиление крутизны переднего фронта характеристики  $\zeta = f(\beta)$  (рис.7б), и она в предельном случае ( $\alpha = 0$ ), действительно приобретает вертикально возрастающий участок.

На основе разработанного подхода исследованы токовые, нагрузочные и рабочие характеристики АДК при варьировании углом  $\varphi = \varphi_{\beta x} - \varphi_H$  от 0 до  $180^\circ$ . Их аналитические выражения установлены обращением к векторной диаграмме рис.8а. Например, семейство внешних характеристик, найденное по соотношению:

$$\zeta_2 = -\beta \cos \varphi + \sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi}, \quad (4)$$

изображено на рис.9а и представляет собой совокупность выпуклых кривых, расположенных над базовой прямой, отвечающей условию  $\varphi = 0$ . Все эти кривые симметричны относительно перпендикуляра ДС, восстановленного из середины базовой прямой. При максимальном  $\varphi = 180^\circ$  внешняя характеристика претерпевает разрыв и имеет вид двух параллельных граничных прямых, подчиняющихся уравнениям:  $\zeta_2 = I + \beta$  и  $\zeta_2 = I - \beta$ . Характерно, что при  $\varphi > 90^\circ$  внешние характеристики имеют экстремумы по току и по напряжению. В работе найдены аналитические выражения для расчета их координатных точек и абсолютных значений.

По той же методике исследована зависимость  $P_2 = f(\beta)$  (рис.9б).

Чтобы процесс анализа характеристик приобрел наглядность, рекомендовано использование универсальной круговой диаграммы (рис.8б). От известных она отличается простотой и минимумом геометрических построений.

Логично полагать, что теория ЧП должна строиться на положениях теории АДК. Используя этот довод, в работе простым и эффективным приемом дан вывод основных уравнений ЧП. Последние, как известно, служат основой для составления Т- и П-образной схем замещения. Их использование, однако, дает громоздкие аналитические соотношения для показателей входа и к.п.д. В работе обоснована возможность замены этих схем на более простые, содержащие только две параллельные ветви (рис.6 в, з). Каждая из них отвечает условию:  $I_1 = I_{10} + I/A$ . Используя схему рис.6 з, аналитическое выражение для к.п.д. можно записать в виде:

$$\zeta = \frac{\beta \cos \varphi_H (\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi} - \beta \cos \varphi)}{\alpha \cos \varphi_{10} + \beta^2 \cos \varphi_{\beta x} + \beta \cos \varphi_H (\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi} - \beta \cos \varphi)}, \quad (5)$$

Исследование (5) на экстремум приводит к выводу, что ЧП имеет максимальный к.п.д. при нагрузке:

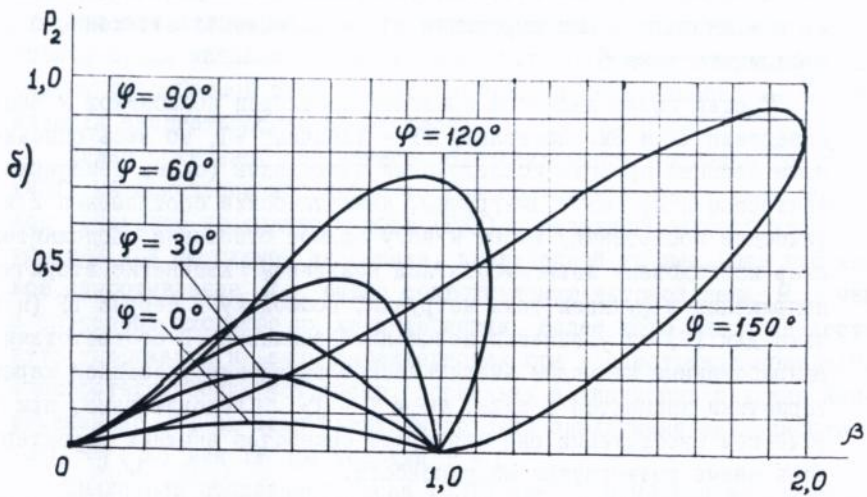
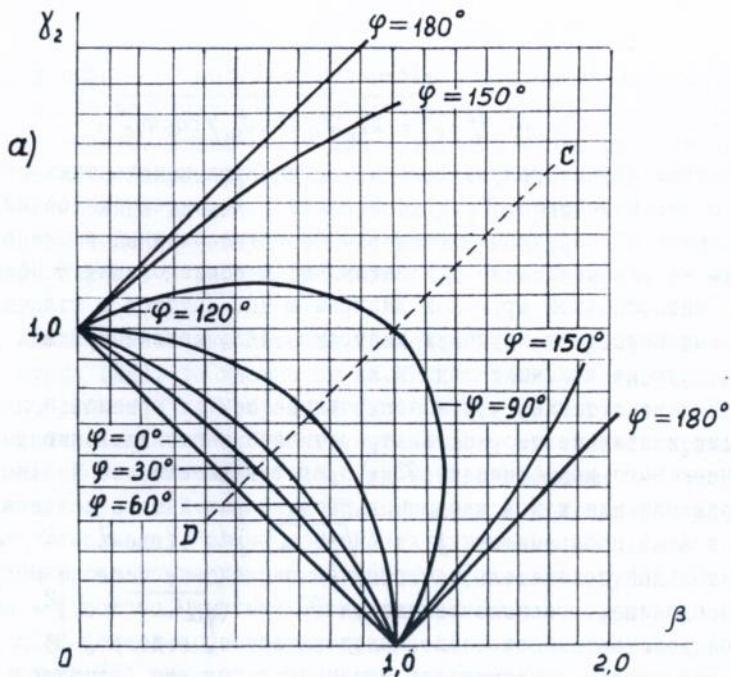


Рис. 9 Зависимости  $\chi_2, P_2 = f(\beta)$

$$\mathcal{Z}_{\text{НОПТ}} = \sqrt{\mathcal{Z}_{\text{BX}}^2 + \mathcal{Z}_{\text{BX}} \mathcal{Z}_{\text{I0}} \cos \varphi_{\text{BX}} / \cos \varphi_{\text{I0}}}, \quad (6)$$

В частном случае равенства всех аргументов комплексных сопротивлений схемы замещения  $\mathcal{Z}_{\text{НОПТ}}$  совпадает с характеристическим сопротивлением ЧП, обеспечивающим второй согласованный режим работы. Опять же рекомендовано для наглядности исследования использование универсальной круговой диаграммы ЧП, которая в отличие от известных повторяет круговую диаграмму АДК, измененную в  $A$  раз и смещенную на величину тока  $x.x$ .

Показано также, что использование тех же приемов и подходов сводит изложение теории фильтров типа К к исследованию поведения комплексного коэффициента  $\mathcal{K}$ , представляющего собой отношение напряжений или токов входа и выхода. В результате установлено, что в зоне прозрачности  $\mathcal{K} = (\sqrt{1 - d^2 + jd})^2$  (где  $d = \omega / \omega_0$  - относительный показатель частоты) - комплексное число с модулем равным единице, а в зоне затухания  $\mathcal{K} = -(\sqrt{d^2 - 1} + d)^2$  - отрицательное действительное число. Следовательно, годограф  $\mathcal{K}$  содержит два участка: полуокружность единичного радиуса (зона прозрачности) и луч, лежащий на оси действительных отрицательных чисел, начиная со значения  $-1$  (зона затухания). Существенно проще находятся при этом и аналогические выражения для коэффициента затухания  $\alpha$  и коэффициента фазы  $\beta$ .

Третья глава является приложением теории полюсников к анализу поведения ТР и ЭМ. Поскольку ТР - типичный ЧП, то весь описанный выше арсенал средств исследования полюсников (схемы замещения, векторные и круговые диаграммы, аналитические соотношения и графические построения) имеют к нему прямое отношение. Дополнительно лишь исследована зависимость под названием "Изменение вторичного напряжения в функции тока нагрузки", поскольку в теории ТР (и только для ТР) ей уделяется повышенное внимание. В соответствии с разработанным подходом аналитическое выражение указанной характеристики запишется в виде:  $\Delta U_2 = I - \chi_2$ . Следовательно, при графическом изображении она повторяет семейство внешних характеристик, лишь иначе развернутых на плоскости.

Рекомендованные для анализа поведения ТР аналитические соотношения не только конкурентноспособны с классическими, но и позволяют уточнить некоторые известные положения. Например, в теории ТР утверждается, что при максимальном к.п.д. потери в обмотках равны потерям в сердечнике. Точный же расчет показал, что при  $\frac{1}{2}$  макс отношение указанных потерь равно модулю коэффициента  $A$  ЧП. Поско-

льку у любого ТР модуль  $A$  больше 1, а у микротрансформаторов он составляет величину в несколько единиц, то оговоренное равенство невозможно. Новые соотношения выгодны и при решении практических задач, например, при построении характеристик ТР по известным каталожным данным, что освобождает разработчика от необходимости проведения лабораторно-стендовых испытаний в каждом конкретном случае. В работе дан подробный алгоритм решения такой задачи.

Если в качестве объекта исследования выступает асинхронный двигатель (АД), то внешне он на ЧП не похож. Однако при его анализе обращаются к Т-образной схеме замещения, где эквивалентом переменной механической нагрузки на валу выступает переменный резистор, величина сопротивления которого зависит от скольжения  $S$ . В таком случае АД типичный ЧП. Применяя к нему разработанные приемы исследования, можно переписать известные для АД расчетные соотношения на языке теории полюсников (см. таблицу I). Их достоинства - простота, компактность, научная строгость и точность.

Разработана круговая диаграмма АД, основанная на круговой диаграмме ЧП, она содержит линию переменного сопротивления, согласованную со шкалой скольжения, и другую атрибутику, характерную для круговых диаграмм АД.

Решение задачи по расчету характеристик АД затруднено отсутствием среди каталожных данных тока х.х. Однако эта проблема устранена разработкой специального алгоритма, основанного на использовании энергетических показателей.

Далее показано, что анализ поведения машин постоянного тока (МПТ) на основании положений теории полюсников также дает эффект. Так генератор постоянного тока (ГПТ) с независимым возбуждением - обычный АДК со схемой замещения, приведенной на рис. 10а, где входное сопротивление  $R_{вх}$  равно сопротивлению якорной цепи  $R_{я}$ , чем и объяснено сходство их характеристик. Более того здесь же достигнута унификация перечня характеристик при рассмотрении конкретных электротехнических устройств, поскольку зависимость падения напряжения на  $R_{я}$  от тока нагрузки по сути аналогична зависимости  $\Delta U_2 = f(\beta)$  для ТР при условии  $\varphi = 0$ .

Двигатель постоянного тока (ДПТ) сведен к ЧП тем же приемом, что и АД, т.е. на основании схемы замещения. Такая схема составлена после записи уравнения баланса напряжений:  $U = E_{я} + I_{я} R_{я}$  в виде:  $I_{я} = U / (R_{я} / s)$ , где под  $s$  понимается дробь  $(n_0 - n) / n_0$  ( $n_0$  - частота вращения ротора ДПТ при идеальном х.х.), кото-

Критическое скольжение		$S_K = R_2' / Z_{Bx2}$	
Ток в цепи ротора		$\beta = s / \sqrt{s^2 + S_K^2 + 2 s S_K \cos \varphi_{Bx2}}$	
Угол сдвига между $U_{20}$ и $I_2$		$\psi_2 = \arccos \cos \beta \left( \frac{S_K}{s} + \cos \varphi_{Bx2} \right)$	
Момент	$M = \beta^2 S_K / s$	Максимальный момент	$M_{\max} = K/2 (1 + \cos \varphi_{Bx2})$
Частота вращения	$\nu_2 = 1 - s$	Мощность на валу	$P_2 = M \nu_2$
Ток, потребляемый от сети		$\beta_1 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 2 \alpha \beta \cos(\varphi_{10} - \psi_2 - 2 \varphi_a)}$	
Потребляемая мощность	$P_1 = \alpha \cos \varphi_{10} + \beta \cos \psi_2$	Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1 = P_1 / \beta_1$
К.п.д.	$\eta = \frac{S_K s (1 - s)}{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}$		
Скольжение при максимальном к.п.д.		$s_{\eta} = -N + \sqrt{N^2 + N}$	
$K_1 = \alpha \cos \varphi_{10} + \cos \varphi_{Bx2}$ , $K_2 = (1 + 2 \alpha \cos \varphi_{Bx2} \cos \varphi_{10}) S_K$ , $K_3 = \alpha S_K^2 \cos \varphi_{10}$ , $N = K_3 / (K_1 + K_2)$ , $K = m_1 U_1^2 / \omega_1 Z_{Bx2}$			

Ток в цепи якоря	$\beta = s$	Мощность на валу	$P_2 = s(1 - s)$
Ток, потребляемый от сети	$\beta_1 = \alpha + s$	Мощность, потребляемая от сети	$P_1 = \alpha + s$
Момент	$M = S = \beta$	К.п.д.	$\eta = \frac{s(1 - s)}{\alpha + s}$
Частота вращения	$\nu = 1 - s$		

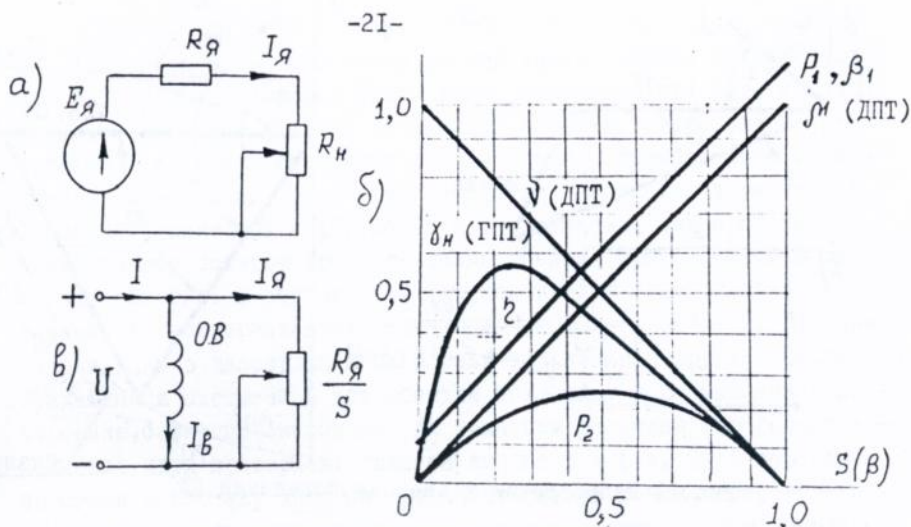


Рис.10 Иллюстрации к анализу поведения МПТ

рая по форме записи и поведению аналогична показателю скольжения  $S$  АД. В таком случае ДПТ соответствует схема замещения, приведенная на рис.10б. Она использована для вывода аналитических соотношений для  $I_{Я}$ ,  $M$ ,  $\mu$ ,  $P_2$ ,  $P_1$ ,  $I$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1 = f(S)$  или соответственно в показательной форме  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\psi$ ,  $P_2$ ,  $P_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1 = f(S)$  (см. таблицу 2). Равенство  $S$ ,  $\beta$  и  $\mu$  ведет к идентичности по форме и положению самых различных характеристик ДПТ, например, скоростной  $\psi = I - \beta$  и механической  $\psi = I - \mu$ . Рабочие характеристики здесь можно получить перестроением зависимостей рис.10б или на основе использования базовых аналитических соотношений:

$$\psi = 0,5 - \sqrt{0,25 - P_2}, \quad (7) \quad \mu = 0,5 + \sqrt{0,25 - P_2}, \quad (8)$$

Расчет и построение характеристик ДПТ (и ГПТ в том числе) на основании известных каталожных данных проблем не представляет. Полный алгоритм решения такой задачи приведен в работе.

Приложение теории полюсников к анализу поведения синхронных машин также имеет эффект и в первую очередь существенно снижает их уровень обособленности от машин других типов. Так синхронный генератор (СГ) с ротором неявнополюсной конструкции – типичный двухполюсник с источником синусоидального напряжения  $E_0$  и входным сопротивлением  $Z_{вх} = Z_1 + Z_{pa}$  (где  $Z_1$ ,  $Z_{pa}$  – полные комплексные сопротивления соответственно обмотки якоря и реакции якоря). Поэтому рассмотренные выше характеристики АДК и ТР имеют к нему прямое отношение.

СГ с ротором явнополюсной конструкции – тоже двухполюсник, но



Четвертая глава посвящена исследованию явления самовозбуждения ЭМ. С ним приходится иметь дело, например, при решении задачи по обеспечению времени готовности системы, когда для ее приведения в исходное состояние используется конденсаторное торможение приводных АД, т.е. осуществляется их перевод в режим АСГ. Самовозбуждение МПТ и АСГ объясняют одинаково, как процесс усиления потока остаточного магнетизма токами, протекающими в статорной обмотке. В отношении МПТ такой взгляд давно назывался ошибочным, но альтернативный подход ему не был разработан. Решение задачи дано в диссертации на основе обращения к другим самовозбуждающимся системам и устройствам известным в промышленной электронике, авиации, механике. Их механизм действия определяет выполнение двух критериев: баланса амплитуд и фаз. Суть первого: вносимая в систему энергия превышает потери в ней, второго – поступление энергии идет в такт с расходом. Первопричина начального импульса здесь не оговаривается. Например, в схеме самонасыщающегося каскада (рис.12а) ее роль могут выполнить блуждающие токи, шумы и т.п. Важно лишь, чтобы этот сигнал был усилен и возвратился по каналу обратной связи на вход при повышенном значении по сравнению с первоначальным и с сохранением полярности (фазы). Аналогичное объяснение дано и процессу самовозбуждения ГПТ. Действительно, его структурно-функциональная схема (рис.12б) совпадает с таковой для самонасыщающегося каскада. Баланс амплитуд выполняется за счет усилительных свойств якоря (звена преобразования) по отношению к узлу возбуждения УВ (рис.12в). Баланс фаз обеспечивается за счет соблюдения полярности включения обмоток якоря и возбуждения. Канал обратной связи построен на использовании гальванического соединения тех же обмоток. Идентичность механизма действия подсказывает следующий логический вывод: в ГПТ не должна оговариваться физическая причина начала самовозбуждения. Ее роль могут выполнить те же блуждающиеся токи от микрогальванических и термо-э.д.с., которые всегда есть в составе цепи. Положительное воздействие остаточной намагниченности статора при этом не отрицается, но и возводить ее в роль единственного и решающего фактора нет оснований. Приведенное в работе математическое описание процесса самовозбуждения в ГПТ основывается на использовании подходов ТАР и сводится к нахождению условий, при которых решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение устройства, имеет положительные корни.

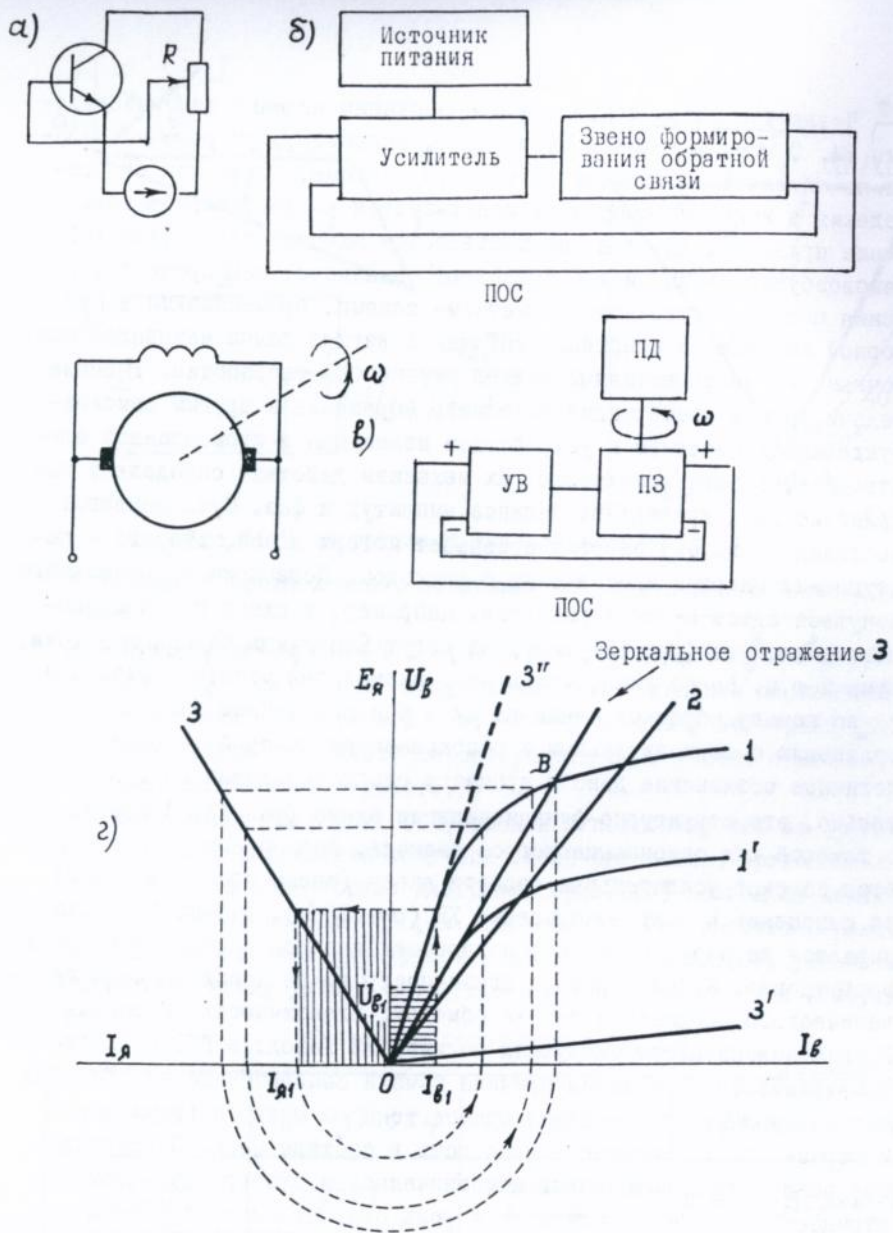


Рис. 12 Иллюстрации, поясняющие механизм самовозбуждения ГПТ

Аналогичный подход разработан и для описания работы АСГ. Ему предшествовали широкие экспериментальные исследования. Дело в том, что мнения специалистов по вопросу самовозбуждения АСГ разделились и возникло несколько точек зрения: классическая (самовозбуждение связывают с усилением остаточной намагниченности ротора), параметрическая (считают, что в машине имеет место динамическая явнопольность и потому возникает типичный параметрический резонанс) и энергетическая (полагают, что существо самовозбуждения определяют энергетические процессы). Для исследования была создана электромашинная установка с роторами следующих модификаций: стальной шихтованный (без к.з. обмотки), стальной массивный, с обмоткой типа "белчья клетка", полый немагнитный (из меди, латуни, алюминия) и гистерезисный. Испытания показали, что при шихтованном роторе машина не самовозбуждается при любой степени его намагниченности. При массивном и короткозамкнутом роторе самовозбуждение имеет место независимо от степени их намагниченности. Но наиболее эффективный результат был получен с полым немагнитным ротором, который показал, что при полном отсутствии остаточной намагниченности машина легко и надежно самовозбуждается. Тем самым классическая точка зрения не получила подтверждения.

Для машины с к.з. ротором удалось снять полную зону самовозбуждения (рис.13) в диапазоне скоростей от 0 до  $60 \cdot 10^3$  об/мин и при изменении емкости конденсаторной батареи от нижней до верхней критической. Исследование ее показало, что здесь нет жесткой кратности между частотой возбуждаемых колебаний и частотой вращения ротора и, следовательно, нет условий, определяющих возникновение параметрического резонанса. Это ответ на параметрическую точку зрения.

Энергетический подход верен по своей физической сущности, но его сторонники сводят дело к выполнению баланса амплитуд. Отсюда явная недосказанность условий возникновения процесса, невозможность построения механизма самовозбуждения и т.д.

В соответствии с новой разработанной концепцией АСГ поставлен в ряд с другими самовозбуждающимися устройствами и системами известными под названием автоколебательных (электронный автогенератор, флаттер, шимми, часы и т.д.). В основе их принципа действия лежит выполнение тех же условий баланса амплитуд и фаз. Первопричина начального толчка - флуктуации в колебательном контуре, случайные внешние наводки и т.д. С физической точки зрения процесс развития колебаний идет в той же последовательности, что и нарас-

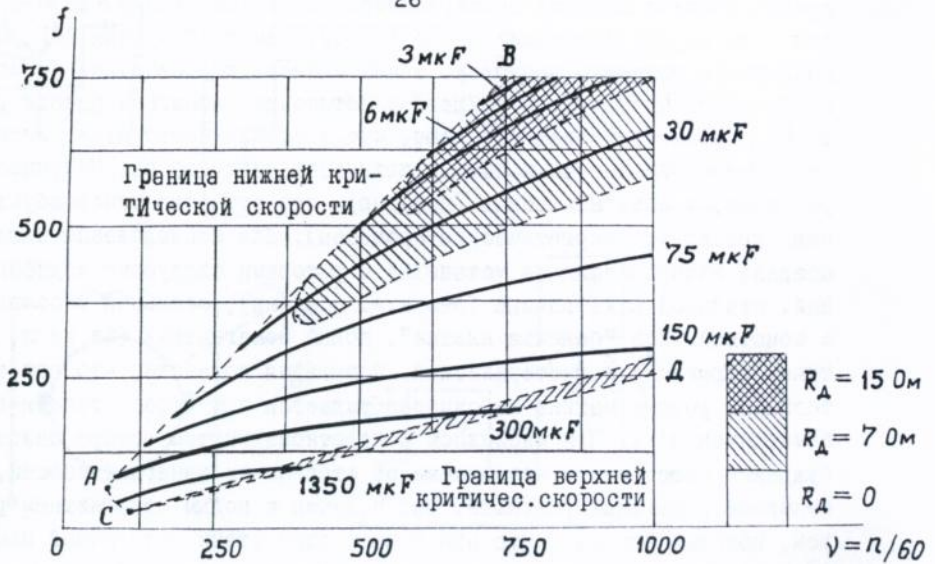


Рис. 13 Зона самовозбуждения асинхронной машины

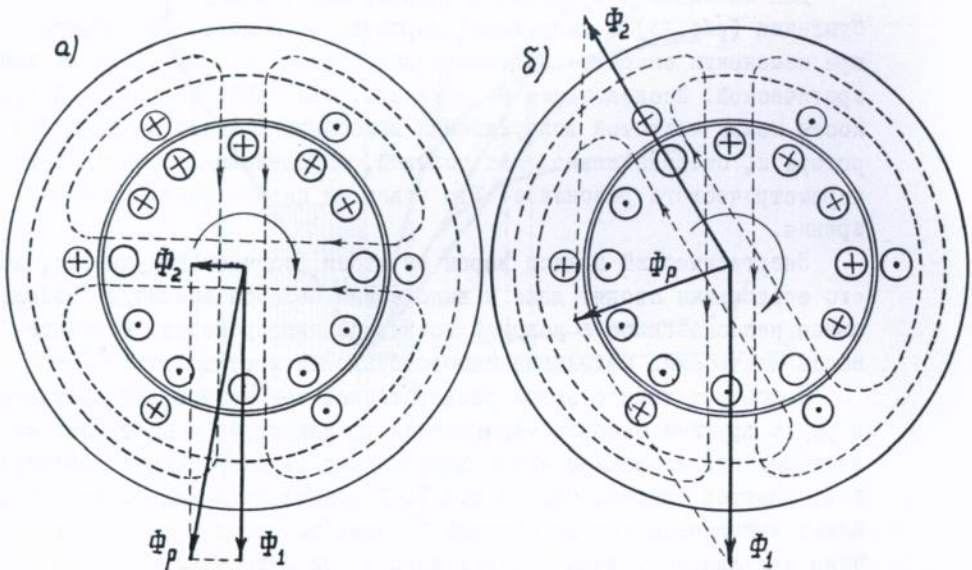


Рис. 14 Пространственно-временная диаграмма токов и магнитных потоков в зоне малых и больших скольжений - а), б).

тание напряжений в самовозбуждающихся устройствах постоянного тока. Отсюда естественно воспринимается идентичность узлов структурно-функциональной схемы ГПТ и АСГ (рис.15). Однако работа звена положительной обратной связи в последней реализуется более визуализировано и поясняется картинками токов и магнитных потоков (рис.сунук I4). Причем при обеспечении баланса фазы ключевую роль играет конденсатор, как устройство способное сдвинуть фазу тока на  $90^\circ$  по отношению к наводимой в обмотке статора э.д.с. Выполнение баланса амплитуд в этой системе легко достигается увеличением оборотов ротора за счет приводного двигателя. Но в отличие от ГПТ частоту вращения АСГ нельзя повышать беспредельно. Из-за фазовых сдвигов магнитных полей существует ее граничное значение (верхняя критическая скорость), при котором колебания сорвутся. Следовательно, при  $C = \text{const}$  самовозбуждение АСГ возможно в строго фиксированной области частот вращения ротора. Отсюда и устанавливается его зона самовозбуждения (рис.13), где линии АВ и СД характеризуют связь частоты возбуждаемых колебаний с частотой вращения ротора соответственно на нижней и верхней критических скоростях. Введение в цепь статора дополнительных сопротивлений существенно сужает границы зоны самовозбуждения, что находится в соответствии с условиями энергетического баланса. Косой штриховкой на рис.13 показана область частотно-скоростного гистерезиса. Для определения частот возбуждаемых колебаний на верхней и нижней критических скоростях предложено построение годографа входного сопротивления по соотношению:

$$Z_{вх} = j d \rho \left\{ k - \frac{\rho (1 - k d^2) + j d \rho_1}{\rho [1 - (1+k) d^2] + j d R_1} \right\}, \quad (II)$$

где  $k = L_1 / L_0 = L'_2 / L_0$  (при условии равенства  $L_1$  и  $L'_2$ ).

Он представляет собой петлю, которая пересекает ось действительных чисел в двух граничных резонансных точках (рис.16). Затем из условий энергетического баланса находятся  $f$ ,  $n$ ,  $S$ :

на нижней критической скорости:

$$f_{нк} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C} - \left(\frac{R_0}{L_0}\right)^2}, \quad n_{нк} = \frac{60 f_{нк}}{p} (1 - S_{нк}), \quad |S_{нк}| = \frac{R_0 R'_2 C}{L_0}$$

на верхней критической скорости:

$$f_{вк} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L'_2) C}}, \quad n_{вк} = \frac{60 f_{вк}}{p} (1 - S_{вк}), \quad |S_{вк}| = \frac{R'_2}{R_1}$$

Установлено, что самовозбуждаться может и гистерезисная машина. Но если в АСГ автоколебания нарастают мягко, то последняя тре-

бует для входа в режим мощный внешний импульс (жесткое самовозбуждение), который может быть сформирован за счет предварительного подзаряда конденсаторной батареи. Другой характерной особенностью гистерезисного генератора является высокая степень стабильности частоты возбуждаемых колебаний в достаточно широком диапазоне изменения частоты вращения приводного двигателя. Объясняется это тем, что в асинхронном режиме работы эквивалентная индуктивность гистерезисной машины мало меняется.

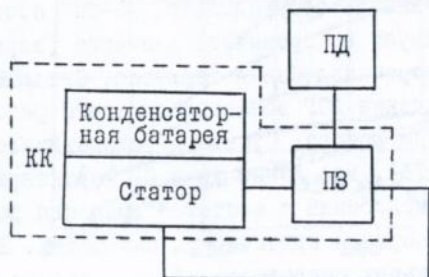


Рис.15 Структурно-функциональная схема АСГ

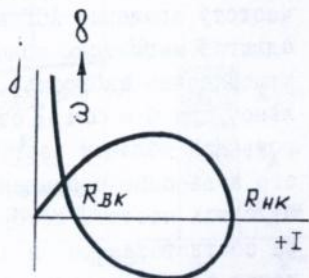


Рис.16 Годограф  $Z_{VX}$

В пятой главе даны конкретные технические решения, которые были найдены при использовании предложенных подходов. Первое из них посвящено разработке вопросов частотно-регулируемого электропривода наматывающих устройств (НУ). Среди них: выбор приводных двигателей, расчет для них законов изменения частоты и напряжения, поступающих с тиристорных преобразователей частоты и т.д. Исходными данными здесь служат нагрузочные диаграммы НУ:  $\omega_{ну} = f(t)$  и  $M_{ну} = f(t)$ . Отсюда для основного приводного АД находят-ся:  $\omega_{ад} = \omega_{ну} \cdot i_{ред}$ , (12),  $M_{ад} = M_{ну} K_{п} K_{\theta} / i_{ред}$  (13), но при условии, что известны: коэффициент передачи  $K_{п}$ , коэффициент  $K_{\theta}$ , учитывающий ухудшение условий охлаждения АД на пониженной частоте вращения ротора, и передаточное число редуктора  $i_{ред}$ . Рекомендации по выбору  $K_{п}$  даются в справочных пособиях. Судить же о величине  $K_{\theta}$  можно по кривым рис.17а, которые получены в результате обобщения экспериментальных данных для АД серии АО2 мощностью от 2,2 до 10 кВт и говорят о том, что снижение частоты вращения ротора требует соответственно и ограничений и по величине максимального момента. Поскольку  $i_{ред}$  однозначно не может быть названо, задача становится многовариантной. Ряд вариантов отбрасывается с учетом ограничений по верхней частоте вращения ротора АД

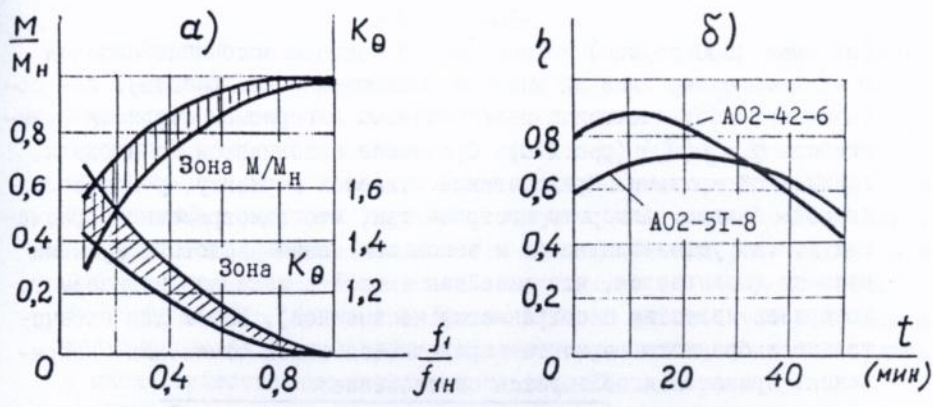


Рис. I7 Зависимости  $M/M_H$ ,  $K_\theta = \varphi(f_i/f_{1H}) - а$ ;  $\zeta = f(t) - б$ .

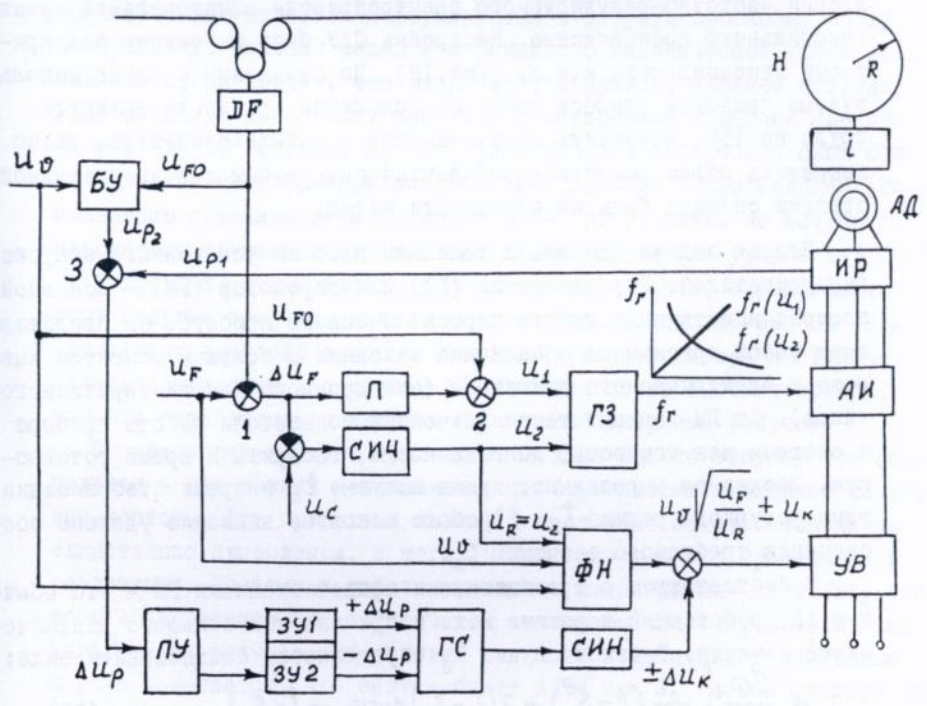


Рис. I8 Функциональная схема САУ электроприводом НУ

(не выше 3000 об/мин) и минимальной частоте источника питания 5 Гц (поскольку ниже АД впадает в шаговый режим работы). Для остальных в соответствии с разработанным алгоритмом строится зависимость  $h_2 = f(t)$  (рис.17б). Сравнение выполняется по площади, занимаемой кривыми. Предпочтение отдается варианту, у которого площадь больше. Алгоритм построен так, что одновременно с расчетом к.п.д. устанавливается и закон изменения частоты в функции времени (полагается, что линейная скорость движения навиваемого материала известна и сохраняется неизменной). Затем для окончательно выбранного варианта определяется закон изменения напряжения. При этом используется соотношение:

$$U_1 = \sqrt{M_{ад} \left[ \frac{a\beta\omega_1}{m_1} \left( \frac{S_k}{S_h} + \frac{S_h}{S_k} + 2 \cos \varphi_{\beta x} \right) \right]}, \quad (14)$$

Разработанные положения были использованы при создании и внедрении частотно-регулируемого электропривода шлихтовальной машины текстильного производства. Настройка САУ была выполнена под критерий максимального к.п.д. (рис.18). По сравнению с ранее используемым приводом удалось добиться повышения производительности труда на 15%, исключить напряженность в работе оператора, резко сократить объем ремонтно-профилактических работ и в значительной степени снизить брак по обрывности нитей.

Вторая задача связана с решением проблем ускоренного запуска гидродвигателей. Гидродвигатель (ГД) или гидромотор (ГМ) – основной элемент конструкции любого гироскопического прибора. Он представляет собой органичное сочленение меховика с большим моментом инерции и электрического двигателя (асинхронного или гистерезисного типов). От ГМ зависят такие важнейшие показатели работы прибора и системы как точность, долговечность, габариты и время готовности. Последнее определяют: время запуска  $t_3$  и время стабилизации температурного режима  $t_{\theta}$ . В работе основное внимание уделено обеспечению требуемого значения  $t_3$ .

В соответствии с традиционными представлениями ГМ – это обычный АД, работающий в режиме х.х. и при наличии большого динамического момента. В таком случае  $t_3$  определяется соотношением вида:

$$t_3 = \frac{T\omega_H}{K} \left[ \frac{1}{S_k} (1 - S_H^2) + 2(1 - S_H) \cos \varphi_{\beta x} - l_n S_H \right], \quad (15)$$

Однокое сопоставление расчетных и экспериментальных данных по времени запуска реальных ГМ говорит о их большом расхождении (в несколько раз). Аналогичная картина была установлена и в отношении

потребляемой за запуск энергии. Установлены причины этих явлений.

Во-первых, оказалось, что даже в гироскопах вакуумного исполнения при откачке рабочей камеры до давления  $10^{-5}$  мм.рт.ст. пренебрегать значением аэродинамических потерь нельзя. Дело в том, что органические материалы, входящие в состав конструкции ГМ (смазка, текстолит), в условиях глубокого вакуума разлагаются с выделением газообразных фракций (явление "гажения"). Отсюда рост давления в рабочей камере до  $1-2$  мм.рт.ст. и повышение потребляемой мощности номинального режима в 2-3 раза. Если же учесть, что в процессе запуска неизбежно дальнейшее повышение давления, то можно судить о сколь существенных нагрузках на валу ГМ идет речь.

Во-вторых, после разработки и создания специальной прецизионной аппаратуры по измерению момента трения в шарикоподшипниковом узле удалось раскрыть достаточно сложную картину его поведения. Оказалось, что в процессе разгона ротора смазка меняет свои физико-химические свойства и формируется в упругую прослойку между поверхностью качения колец и шариками. С механической точки зрения она столь прочна, что разрывает, например, заранее созданную электрическую цепь между наружным и внутренним кольцами уже при  $n = (3-5) \cdot 10^3$  об/мин. Процесс формирования смазочного слоя сопровождается пикообразным возрастанием момента сопротивления (по сравнению с номинальным примерно в 5-7 раз), затем по истечению некоторого времени наступает его стабилизация (на уровне 3-5 Гсм).

В третьих, установлено, что основным фактором, определяющим рост энергии запуска, является компактность конструкции ГМ. Так чрезмерная близость лобовых частей к крышкам прибора и ступице маховика приводит к созданию в последних столь высоких потерь, что они становятся соизмеримы с основной энергией запуска.

С учетом результатов исследования дана оценка запуску при номинальном и повышенном напряжении, при ступенчатом и плавном изменении частоты. При предельно малом  $t_3$  частотный запуск становится единственно приемлемым, и тогда встают вопросы его практической реализации. Поэтому в работе приведены рекомендации по выбору частоты и напряжения при ступенчатом частотном запуске, а также дан алгоритм их расчета при условии плавного изменения. В последнем случае полагается, что запуск будет идти при  $S_K$ , а ток статора установлен на уровне допустимого через токоподводы. Все расчетные соотношения при этом получены путем приложения теории АДК и ЧП к АД. Аналогичным образом могут быть рассмотрены и иные варианты.

Третий пример иллюстрирует решение задачи по обеспечению форсированного торможения ГМ. Оно выполняется в случае, когда нужно за предельно короткое время провести операцию арретирования гироскопических приборов. Предъявляемые здесь требования обычно столь высоки, что все известные способы торможения ГМ, как асинхронной машины, оказываются неприемлемыми. Решение проблемы было найдено на основе реализации конденсаторно-динамического способа торможения с фиксацией напряжения самовозбуждения на уровне опорного (авт. свид. 33657). Благодаря последнему, удалось избежать опасности сторания токоподводов. Принципиальная схема блока на ступени конденсаторного торможения приведена на рис.19 и содержит три функциональных узла: конденсаторную батарею С1-С3, ограничитель напряжения, представляющий собой трехфазный выпрямитель на диодах Д1-Д6 и источник опорного напряжения в виде аккумуляторной батареи  $U_{оп}$ , а также элементы автоматического управления ходом операции. При срыве самовозбуждения, что происходит при угловой скорости вращения 0,3-0,4 от номинальной, в работу включается автоматически ступень динамического торможения, обеспечивающая полную остановку ротора. После этого источник питания может быть отключен, например, посредством реле времени.

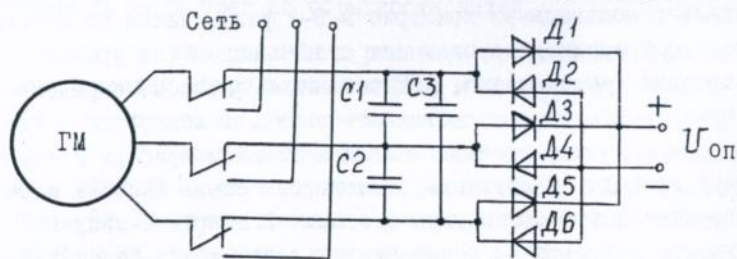


Рис.19 Электрическая схема блока торможения

Разработан инженерный подход, который позволяет осуществить выбор параметров приведенной схемы с достаточной на практике точностью. Приведена методика расчета частотно-скоростной характеристики, зависимостей тока, напряжения, мощности, момента и времени торможения. Подход основан на результатах статистической обработки показателей рабочего режима различных ГМ и их связи с габаритно-весовыми характеристиками. С целью получения компактных расчетных соотношений использованы положения теории полюсников и запись в относительных значениях.

## Основные результаты и выводы.

1. Экспериментальным путем доказано отсутствие противофазы между напряжением и э.д.с. при подключении КИ, ДР, ТР к источнику переменного синусоидального напряжения, нет также противофазы между током первичной обмотки и током активной нагрузки вторичной обмотки, если они протекают в направлении одноименных зажимов.

2. Установлено, что ДР, подключенный к сети синусоидального напряжения и введенный в состояние глубокого насыщения сердечника представляет собой ведомый сетью вибратор разнополярных импульсов тока, возникающих в результате ключевого режима работы устройства под действием модуляции индуктивности. Коммутационные явления определяют существование чередующихся переходных процессов, которые формируют зависимости  $\Phi, i = f(\omega t)$  явно несинусоидальной формы. В зоне парапроцесса работу цепи определяют параметры обмотки и внутреннего сопротивления источника. При их соизмеримости, что на практике чаще всего имеет место, возникает эффект искажения формы напряжения на зажимах ДР, даже при его непосредственном включении к источнику.

3. Дано объяснение физической природы триггерного эффекта, наблюдаемого в цепях, содержащих нелинейные КИ и линейные С, на основе условий и следствий резонансного режима. В качестве механизма настройки здесь выступает модуляция индуктивности ДР, и потому резонанс носит острый динамический характер. Отсюда пикообразность возникающих импульсов тока и прямоугольность формы напряжения на зажимах конденсатора.

4. Разработаны и развиты положения теории активного двухполюсника и пассивного четырехполюсника, что позволило предложить для анализа их поведения более удобные схемы замещения, векторные и круговые диаграммы. Выполненное полномасштабное исследование характеристик полюсников, в частности, показало, что:

- к.п.д. АДК в режиме х.х. равен нулю (а не единице, как это до сих пор трактовалось), но при отсутствии поперечного сопротивления в схеме замещения он скачком возрастает до своего максимального значения при любой бесконечно малой нагрузке;

- работа ЧП с максимальным к.п.д. будет иметь место при его нагрузке на оптимальное сопротивление, которое в частном случае равенства аргументов всех сопротивлений схемы замещения совпадает

со значением характеристического сопротивления.

5. Показано, что сближение теории полюсников с теорией ТР и ЭМ одновременно способствует упрощению изложения, например, таких разделов теоретической электротехники как теория фильтров типа К.

6. Дано приложение теории полюсников к анализу поведения ТР и ЭМ, что упрощает и унифицирует процесс исследования, ведет к идентичности схем замещения, компактными и удобными расчетными соотношениями, устраняет некорректность ряда известных положений, способствует установлению новых критериев, а также создает основу для взаимопонимания между специалистами разного профиля, работающими над созданием системы (комплекса).

7. Разработаны алгоритмы для расчета и построения характеристик ТР и ЭМ на основе известных данных каталога.

8. Раскрыт механизм, определяющий процесс нарастания э.д.с., тока и напряжений при самовозбуждении ЭМ. Показано, что в основе этого явления лежит выполнение условий баланса амплитуд и фаз, а не процесс усиления потока остаточного магнетизма машины, токами, протекающими в статорной обмотке (классическая точка зрения) и не динамическая явнополюсность ротора (параметрическая точка зрения). Тем самым ЭМ поставлены в один ряд с другими известными самовозбуждающимися системами и устройствами.

Исследованием полной зоны самовозбуждения АСГ подтверждена справедливость энергетической точки зрения.

Доказана экспериментальным путем способность к самовозбуждению гистерезисной машины, которая в отличие от АСГ возбуждается жестко.

9. Разработана методика выбора приводных двигателей и других узлов частотно-регулируемого электропривода наматывающих устройств. Составлен расчетный алгоритм определения законов изменения частоты и напряжения при управлении работой привода. Результаты работы внедрены в промышленность применительно к шлихтовальным машинам текстильного производства.

10. Установлены факторы, влияющие на процесс запуска ГД. С учетом их воздействия оценены запуски при номинальном и повышенном напряжении, при ступенчатом и плавном изменении частоты.

11. Дано решение проблемы форсированного торможения асинхронных ГМ на основе предложенной схемы конденсаторно-динамического торможения с фиксацией напряжения самовозбуждения на уровне опорного.

Разработана инженерная методика расчета параметров и показателей работы этой схемы.

Список публикаций по теме диссертации

1. Китаев А.В. Теоретические основы электротехники (учебное пособие). -Киев: НКМ ВО, 1990, с.130.
2. Китаев А.В. Электротехника и основы электроники (учебное пособие). -Киев: ІСДО ВІпол, 1993, с.304.
3. Китаев А.В., Трушляков И.И. Установка для контроля характеристик магнитопроводов //Электромаш. и эл/обор. -Киев: Техні-ка, 1981, № 33, с.86-94.
4. Китаев А.В. Об изложении материала по теме "Магнитные цепи с переменными магнитодвижущими силами" //Электротехника (методические статьи) -М.:Высшая школа, 1983, № 9, с.48-53.
5. Китаев А.В. О физической сути явлений, наблюдаемых в цепях, содержащих нелинейные катушки индуктивности //Электромеханика, 1992, № 2, с.3-9.
6. Карпенко В.С., Китаев А.В. Исследование стабилизирующих свойств параметрического трансформатора //Электромаш. и эл/обор. -Киев: Техніка, 1979, № 28, с.35-42.
7. Китаев А.В. Исследование возможности использования стали ОВКП для изготовления сердечников статоров генераторов Г-502 //Автотракторное электрооборудование. -М.:НИИАВТОПРОМ, 1982, № 2, с.6-12.
8. Китаев А.В. Вывод основных уравнений и исследование работы пассивного четырехполюсника на основе метода эквивалентного генератора //Электротехника (методические статьи). -М.: Высшая школа, 1992, № 16, с.47-53.
9. Китаев А.В. Схемы замещения трансформатора на основе теории активного двухполюсника и пассивного четырехполюсника //Энергетика, 1992, № 9-10, с.41-46.
10. Китаев А.В. Построение характеристик трансформатора по каталожным данным //Энергетика, 1993, № 11-12, с.37-42.
11. Китаев А.В. Построение характеристик асинхронного двигателя по каталожным данным //Электромеханика, 1988, № 2, с.34-38.
12. Китаев А.В. Алгоритмы построения характеристик электрических двигателей на основе каталожных данных //Энергетика, 1993, № 3-4, с.45-51.
13. Китаев А.В. Метод эквивалентного генератора в приложении к исследованию и построению характеристик асинхронного двигателя

//Электротехника (методические статьи). -М.: Высшая школа, 1992, № 16, с.62-68.

14. Китаев А.В., Веселовский В.М. Алгоритмы расчета характеристик трансформатора на основе положений теории двух и четырех-полюсников //Электромеханика, 1995, № 3, с.88-96.

15. Китаев А.В., Шакарян Ю.Г. О самовозбуждении машин постоянного тока //Электричество, 1981, № II, с.48-51.

16. Китаев А.В., Шакарян Ю.Г. Об особенностях изложения темы "Самовозбуждение машин постоянного тока" //Электротехника (методические статьи), -М.: Высшая школа, 1983, № 9, с.37-43.

17. Китаев А.В., Милькис Е.В. Самовозбуждение электрических машин //Энергетика, 1994, № 9-10, с.47-55.

18. Китаев А.В., Шумихин Б.Г. Новый способ торможения асинхронных гидродвигателей //Межвед. сбор. научных работ предприятия В-2929, Свердловск, 1967, № 6, с.42-48.

19. Китаев А.В., Орлов И.Н. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины //Электричество, 1978, № 4, с.47-52.

20. Китаев А.В., Орлов И.Н. Форсированное торможение асинхронных гидродвигателей //Сбор. докладов по итогам НИР за 1968-1969 г. -М.: МЭИ, 1969, с.100-105.

21. Нетушил А.В., Бояр-Созонович С.П., Китаев А.В. Самовозбуждение асинхронного генератора //Электромеханика, 1981, № 6, с.612-617.

22. Китаев А.В., Бояр-Созонович С.П. Анализ амплитудно-фазовых соотношений в самовозбуждающихся электрических системах посредством векторных диаграмм //Спец. эл/обор. электрогидравлических установок. -Киев: Наукова думка, 1988, с.106-113.

23. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Частотно-регулируемый электропривод шлихтовальной машины //Текстильная промышленность, 1978, № 5, с.64-67.

24. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Выбор частоты и напряжения при частотном управлении асинхронных двигателей, работающих на намагнивающее устройство //Технология текстильной промышленности, 1973, № 3, с.117-121.

25. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Условия работы асинхронного двигателя с максимальным к.п.д. в составе намагнивающего устройства //Технология текстильной промышленности, 1973, № 6, с.119-123.

26. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Синтез частотно-регулируемого электропривода намагнивающих устройств по критерию максимального к.п.д. //Межвуз. сбор. научных работ Ивановского энергетическо-

го института, 1986, с.156-162.

27. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Выбор редуктора и асинхронного двигателя для частотно-регулируемого электропривода наматывающего устройства //Электромаш. и эл/обор. Киев: Техніка, 1979, № 28, с.86-94.

28. Китаев А.В., Якимчук Г.С. Частотно-регулируемый электропривод наматывающих устройств //Электромеханика, 1986, № 2, с.82-88.

29. Агафонов В.В., Горшков В.А., Китаев А.В., Леонович В.Ф. Исследование момента трения быстровращающихся радиально-упорных шарикоподшипников //ПТО, 1972, № 6, с.32-35.

30. Китаев А.В., Орлов И.Н. Расчет характеристик асинхронного гиродвигателя при конденсаторно-динамическом торможении //Электротехника, 1973, № 6, с.29-32.

31. Китаев А.В., Вирковский А.Я. Приложение теории переходных процессов к анализу цепей несинусоидального тока //Электромеханика, 1990, № 6, с.17-21.

32. Китаев А.В., Шумихин Б.Г. Перевозбуждение гистерезисного двигателя постановкой его ротора в положение противовключения //ПТО, 1968, № 1, с.17-21.

33. Китаев А.В., Горшков В.А., Казakov Н.Ф. Применение диффузионной сварки в вакууме при изготовлении роторов электрических машин //Сбор. трудов У-й Всесоюзной конференции по диффузионной сварке, 1970, с.248-255.

34. А.С. СССР № 372638 М.Кл.Н 02р 9/42 Электромашинная установка /Китаев А.В., Башлыков В.А. Заявл.04.1.70; опубл. 01.03.73 //Бюл.№ 13, 1973.

35. А.С. СССР № 37581 /Китаев А.В., Шумихин Б.Г. - заявл. 4.01.70; зарег.14.12.72.

36. А.С. СССР № 43439 /Китаев А.В., Горшков В.А. и др. -заявл. 17.12.66; опубл. 9.09.68.

37. А.С. СССР № 48787 /Китаев А.В., Костенок Б.Ф., Сигалов Э.А. -заявл. 28.10.68, зарег. 20.10.69.

38. А.С. СССР № 50139 /Китаев А.В., Горшков В.А. и др.-заявл. 11.06.68; зарег. 19.02.70.

39. А.С. СССР № 63695 /Китаев А.В., Башлыков В.А., Сигалов Э.А. -заявл. 22.02.71; опубл.4.06.72.

40. А.С. СССР № 64968 /Китаев А.В., Шумихин Б.Г. и др.-заявл. 26.10.67; опубл. 14.08.72.

41. А.С. СССР № 33657 /Китаев А.В., Шумихин Б.Г. и др.-заявл. 20.12.64; зарег. 11.05.66.

42. А.С. СССР № 242275 МПК НО1 . Способ размагничивания ротора асинхронного двигателя /Китаев А.В. - заявл.17.07.67; опубл. 25.04.69 //Бюл. № 15, 1969.

43. А.С. СССР № 342071 М. Кл. С01 I/00. Устройство для исследования вибрации /Китаев А.В., Башлыков В.А., Сигалов Э.А. - заявл. 12.08.70; опубл. 14.06.72 //Бюл. № 19, 1972.

44. А.С. СССР № 65827 /Китаев А.В., Горшков В.А. и др.-заявл. 26.02.70; зарег. 11.11.72.

45. Китаев А.В. Об изложении вопросов, связанных с резонансом в курсах физики, теоретической механики и электротехники. Депонировано ВИНТИ, 1979, с.15.

46. Китаев А.В. Исследование двухполюсника. Депонировано УкрНИИНТИ, № 1847, 19.08.85, с.10.

47. Китаев А.В. Исследование четырехполюсника. Депонировано УкрНИИНТИ, № 2201, 10.10.85, с.10.

48. Китаев А.В. Круговые диаграммы электрических цепей и устройств. Депонировано ИнформЭлектро, 1985, с.12.

49. Китаев А.В. Об основных уравнениях и схемах замещения трансформатора. Депонировано ИнформЭлектро, 1985, с.15.

50. Китаев А.В. Использование метода эквивалентного генератора и теории четырехполюсника для анализа поведения трансформаторов и электрических машин. Депонировано ИнформЭлектро, 1986, с.37.

#### Личный вклад автора

В работах, опубликованных в соавторстве лично соискателю принадлежит: в 3, 7, 14 - 33 постановка научных задач, выбор путей их решения, экспериментальное исследование и теоретическое описание, в 6, 35 - 43 результаты делятся между авторами в равной мере.

#### A N N O T A T I O N

Kitajev A.V. "Alternative principles for analysing of electrical devices of electrical engineering systems" - The Dissertation in form of a manuscript for a scientific degree of a Doctor of engineering on speciality 05.09.01 - Electric machines & 05.09.05 - Theoretical electrical engineering. Kherson Industrial Institute, Kherson, 1995.

50 scientific works and also 11 author's certificates, which includes results of theoretical and experimental researches of pole-devices, induction coils, choking coils, transformers and electrical machines are defended.

The proposed new methods is ascertained to have revealed machinery of functioning these devices and they also have unified an investigation of their's characteristics.

Indicated elaborations are adopted in space-rocket industry and educational process for study of electrical-technical subjects.

#### A Н О Т А Ц І Я

Кітаєв О.В. "Альтернативні підходи аналізу роботи електротехнічних пристроїв для електромеханічних систем". Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - "Електричні машини" та 05.09.05 "Теоретична електротехніка". Херсонський індустріальний інститут, Херсон, 1995.

Захищається 50 наукових праць, з котрих 11 є авторські свідоцтва, які містять результати теоретичних та експериментальних досліджень полюсників, катушок індуктивності, дроселів, трансформаторів та електричних машин.

Встановлено, що запропоновані нові підходи розкривають механізми роботи перелічених пристроїв і уніфікують дослідження їх характеристик.

Здійснено впровадження запропонованих розробок на підприємствах ракетно-космічного комплексу та промисловості, а також - в учбовий процес викладання дисциплін електро-технічного циклу.

Ключові слова: катушка індуктивності, дросель, трансформатор, електрична машина, полюсник.

Соискатель



Подписано к печати 10 января 1997 г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. 2,0. Тираж 100. Заказ 325

As 800

424074

AB 37.036