

ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Фельдман Борис Маркович

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНДУКЦИОННЫЕ МГД - МАШИНЫ
ИНДУКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

05.09.01 - электрические машины

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ХАРЬКОВ - 1993 г.

40 29038

Диссертация представляет собой рукопись.

Работа выполнена в Государственном научно - исследовательском Энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского

Научный руководитель

- кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник Дворчик С. Е.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Янтовский Е. И.
- кандидат технических наук, доцент Темкина Л. М.

Ведущая организация -

- Научно-производственное объединение
"Харьковский электромеханический завод"

Защита состоится 27 01 1994 года

в 14 часов на заседании специализированного совета К 068.39.04
в Харьковском политехническом институте по адресу:
310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке
Харьковского политехнического института.

Автореферат разослан 20 12 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

Егоров В. А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка
00801428 (N)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Вопросы получения переменного тока, преобразования рода тока (постоянного в переменный и наоборот) занимают чрезвычайно важное место в электротехнике.

Особую важность приобретают эти вопросы в автономных энергоустановках, где активная энергия может черпаться из источника тепловой, механической и т.п. энергии, а реактивная энергия должна иметь возможность циркулировать внутри автономной системы, ибо возможность черпать реактивную энергию из сети в данном случае отсутствует.

Вопросы компенсации реактивной мощности существенны и в неавтономных энергоустановках.

Обычно указанные проблемы решаются с помощью L-C колебательного контура, обеспечивающего обмен реактивной энергией между магнитным и электрическим полем.

Перспективным направлением решения этих проблем является создание многофазных генераторов переменного тока, схемы которых включают в себя накопители реактивной энергии только одного вида - например, только индуктивности.

В работе предложен термин для обозначения таких генераторов - "монореактивные", изложен подход к синтезу таких схем, исследованы основные свойства. Показано, что монореактивными могут быть различные генераторы: электромашинные, плазменные, жидкометаллические, электронные, транзисторные, генераторы на эффекте Холла и другие. В зависимости от различных условий эти генераторы могут создавать колебания различных видов: строгогармонические, квазигармонические, релаксационные, в

том числе случайные сигналы.

Актуальность изучения и разработки монореактивных генераторов определяется возможностью использования их для разрешения, например, следующих проблем: создание эффективных автономных энергоустановок для непосредственного получения переменного электрического тока из тепловой энергии; создание компенсированных по $\cos\varphi$ энергоустановок, в том числе и жидкометаллических и плазменных МГД генераторов и насосов, имеющих высокие удельные показатели.

Диссертационные исследования выполнены в ЭНИН им. Г. М. Кржижановского, г. Москва, в соответствии с планом основных работ по двум договорам с НПО "ЭНЕРГИЯ": №26/83 и №18/86.

Цель работы состоит в следующем: изучить основные закономерности, присущие монореактивным магнитогидродинамическим генераторам на плазме и жидких металлах, генераторам на эффекте Холла; изучить электронные и транзисторные монореактивные генераторы, моделирующие многие эффекты в электромагнитных и МГД генераторах; определить принципы разработки монореактивных генераторов, имеющих заданные характеристики.

Основные методы и средства исследований. Использовались методы математического моделирования, известные методы анализа и синтеза электрических схем, известные и предложенные в работе методы экспериментального моделирования, экспериментальные образцы и макеты, измерительное оборудование, вычислительная техника.

Научная новизна.

1. Исследованы различные схемы многофазных монореактивных (ММ) генераторов, определены основные энергетические и фазовые соотношения.
2. Исследовано взаимодействие между элементами схем генераторов. Определены возможности применения усилителей и трансформаторов различных видов с учетом их характеристик.
3. Созданы и экспериментально исследованы модели генераторов: электронные, полупроводниковые, на многоэлектродном образце из антимонида индия. Впервые осуществлено самовозбуждение холловского двухфазного автогенератора при нормальных температурах, получен КПД преобразования 44,2%.

Практическая ценность состоит в том, что полученные данные позволяют разработать методику инженерного расчета любой конкретной схемы монореактивного генератора. Новизна разработок защищена авторскими свидетельствами.

Реализация и внедрение. Полученные результаты реализованы в разработках ряда образцов новой техники в НПО "ЭНЕРГИЯ", а также в схеме управления индукционным насосом в ЭНИИ.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6-ти печатных трудах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, 6-ти таблиц, изложенных на 192 страницах машинописного текста, 111 рисунков, списка использованных источников, включающего 78 наименований и 3-х приложений на 38 страницах; объем работы 230 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении показана актуальность диссертационной темы, представлен краткий обзор литературных источников, предложен термин "монореактивные" для определения генераторных схем, в состав которых входят накопители реактивной энергии только одного вида - емкости или индуктивности.

Первая глава "Общие положения" содержит обзор типов автоколебательных систем, используемых в автономной энергетике, а также анализ уравнений преобразования энергии в таких автоколебательных системах.

На основе уравнений Максвелла в форме

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \rho \cdot \vec{v} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t};$$

а также закона Ома в форме $\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \vec{E}_{cm}]$

получено

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right) dV = \int_V \frac{j^2}{\sigma} dV - \int_V \vec{E}_{cm} \cdot \vec{j} dV + \int_V \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{E} dV + \oint_S [\vec{E} \times \vec{H}] dS,$$

левая часть которого дает изменение энергии накопителей (конденсаторов, катушек индуктивности) в системе. Члены правой части этого уравнения представляют собой соответственно: джоулеву диссипацию энергии внутри объема, этот член всегда положителен; энергию электрического поля, связанного либо с электромагнитной индукцией $\vec{v} \times \vec{B}$, либо с эффектом Холла, либо с термоЭДС, градиентом заряженных частиц в батарее, аккумуляторе и т. п., этот член положителен или отрицателен; энергию, получаемую или отдаваемую движущимися зарядами, например, в ТЭП, ускорителях и т. п., этот член положителен или отрицателен; последний член представляет поток энергии вектора Пойнтинга.

Суммарная энергия как электрического, так и магнитного поля, а в общем случае и кинетическая энергия движущегося

среды, может быть преобразована только в действие некоторых активных сил или же в потери, связанные с джоулевой диссипацией. Анализ энергетических уравнений таких систем показывает, что если токи, напряженности поля выражаются через некие квадратичные функции, то существует принципиальная возможность компенсированного, т.е. без потребления реактивной мощности, преобразования суммарной магнитной, электрической и даже кинетической энергии. Такая возможность связана с отсутствием различных типов энергии в системе обмена энергией между накопителями: в монореактивной системе есть только один тип накопителей, в нашем случае - только индуктивности.

Основными элементами многофазных монореактивных автоколебательных систем являются накопители реактивной энергии и усилители, причем пригодными являются усилители любого типа с постоянными во времени параметрами - электронные, транзисторные, МГД-усилители на плазме, жидком металле, эффекте Холла, электрические машины и т.п., а непригодными - параметрические, например, магнитные усилители.

Для анализа систем с усилителями разных типов недостаточно знания автоколебательных систем и методов их описания, необходимо также описание той активной среды, которая работает в этих усилителях. Ее не всегда возможно описать в рамках теории сосредоточенных систем, поэтому существенное внимание уделено основным уравнениям механики сплошных сред.

Далее описаны основные режимы работы автоколебательных монореактивных систем. Указано, что монореактивные

автогенераторы обеспечивают не только преобразование постоянной энергии движения в переменный ток или постоянного тока в переменный, но также и "обратные" процессы: преобразование электрической энергии в механическую, создание двигателей различного рода, что может иметь место в электрических машинах, в жидкометаллических электромагнитных насосах, в ускорителях плазменного типа. Для этих применений возможно использование рабочих тел как со слабым, так и с сильным эффектом Холла.

В общем, кроме генераторных и насосных режимов, монореактивные автогенераторы могут быть использованы в режимах компенсации реактивной энергии.

Основания для такого использования состоят в следующем.

Известно, что при воздействии на колебательный контур частотой более низкой, чем его резонансная частота, ток в цепи носит индуктивный характер, а при воздействии частотой более высокой, чем резонансная, ток в цепи носит емкостный характер.

Поэтому, если соединить выход монореактивного автогенератора с электрической сетью переменного тока и установить частоту этого автогенератора неравной частоте сети, то ток на выходе автогенератора окажется сдвинутым по фазе относительно напряжения, т.е. автогенератор окажется для сети источником реактивной энергии.

Такой режим является одним из существенных для монореактивных автогенераторов, причем компенсаторы индуктивного типа предпочтительнее конденсаторных по весогабаритным показателям, т.к. удельный запас энергии в индуктивности на 2-3 порядка больше, чем в емкости.

Естественно, что монореактивный генератор не является

абсолютно лучшим во всех случаях: выбор решения связан, безусловно, с логикой конкретной машины.

Рассмотрены режимы независимого возбуждения, при которых магнитное поле задано извне.

Проделан подробный энергетический анализ кондукционных устройств, в том числе и неподвижных устройств, в которых преобразуется энергия постоянного тока в переменный, а не энергия движения в переменный ток.

В этом анализе из основных уравнения механики выводятся основные уравнения отдельных машин, и эти уравнения анализируются с учетом особенностей МГД-машин. Учтены концевые токи, часть которых замыкается вне активной зоны канала, что приводит к большой неоднородности токов в активной зоне канала, а также вихревые токи и их растекание. Еще учтено, что в МГД-машинах иногда используются электропроводные межэлектродные стенки между электродами. Эти стенки получаются вынужденно, т.к. в жидком металле трудно создать изолятор между двумя электродами и приходится делать тонкостенную оболочку, которая механически опирается на магнитную систему и является электропроводной.

Учтены все виды потерь, оговорены рамки допущений, при которых это выполнено, указана применимость этих допущений для различных случаев. Получены рекомендации для проектирования машин, которые могут существенно облегчить проектирование, несмотря на неучет в этих рекомендациях краевых условий. В дальнейшем решения соответствующих краевых задач, безусловно, смогут улучшить качество этих рекомендаций.

Отдельно рассмотрено протекание вихревых токов на плоском

проводнике. Указано, что если плоскость будет иметь электропроводные перемычки либо соединения с обмотками возбуждения или еще с чем-либо, то возникнут цепи вихревых токов, которые существенно понизят внутреннее сопротивление этого плоского канала для вихревых токов, увеличат вихревые токи и вихревые потери, вызовут перераспределение вихревых потерь. Сделан вывод, что важной задачей является разработка схем, в которых компенсируются вихревые токи во внешних цепях генератора. Такая задача решена в нашем изобретении, где показано, каким образом можно создавать системы с большим числом электродов и пониженными потерями от вихревых токов.

Необходимо отметить, что задачи о концевых потерях решены при некоторых ограничениях. Считается, что магнитное поле на концах спадает экспоненциально. Но теория построена так, что в нее можно встроить любую краевую задачу, которая получит точное решение для концевых и других токов, а затем это решение может быть встроено в систему полученных ранее решений.

Введены все необходимые энергетические соотношения. Выведены КПД, это сделано в функции целого ряда безразмерных комплексов и параметров, которые можно определить. Упомянутые комплексы и параметры позволяют определить, будет проектируемая машина хорошей или плохой. Для такой оценки достаточно вычислить безразмерный критерий. Например, если он равен порядку одной сотой, то машина хороша, если же его порядок - одна десятая или больше, то машина не эффективна.

Аналогичные энергетические соотношения выведены и для МГД-генераторов на плазме и жидких металлах, для преобразователей с сильно выраженным эффектом Холла, причем

этим последним может быть плазменный ускоритель и МГД-генератор.

Понимая под коэффициентом полезного действия η отношение полезной мощности к полной гидравлической, записано:

$$\eta = \frac{\frac{k - R_M}{[1 + k(1 + a)]^2} - b}{\frac{1 + ka}{1 + k(1 + a)} + d}$$

Здесь $R_M = \frac{r_1 + r'_2 + r'_3}{R_1} -$ параметр, характеризующий потери в меди генератора, $k = R_3 \frac{\sigma \Delta l}{h}$, $a = \frac{2\sigma \Delta l}{\sigma \Delta l} + \frac{C h}{\pi l}$ - параметр, характеризующий потери в электропроводных стенках и вследствие концевго эффекта.

$b = \frac{1}{12} \left(\frac{\omega h^2}{V} \right) + F_{CT}$ - параметр, характеризующий вихревые потери и потери в стали,

$d = \frac{\lambda}{2 \frac{M}{Re}} + \frac{h^2}{1 + 2n}$ - параметр, характеризующий потери трения и потери, связанные со степенным профилем скорости.

Вторая глава "Синтез, анализ и схмотехника автогенераторов" в основном посвящена построению многофазных автоколебательных систем и решению схмотехнических задач для достижения возможно более высоких технических характеристик генераторов.

При этом для многоэлектродных систем, например, МГД или преобразователей Холла, вводится понятие элементарного генератора (канала), и результаты, полученные для него, затем обобщаются на многоэлектродные системы.

В этом случае задача сводится к синтезу колебательных систем, описываемых системами уравнений вида:

$$L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}}{dt} + R_{i_{\alpha}} + \frac{1}{C_{\alpha}} \int i_{\alpha} dt + M_{\alpha_1} \frac{di_1}{dt} + M_{\alpha_n} \frac{di_n}{dt} = \epsilon_{\alpha} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\alpha} = r_{\alpha} \langle i_1, \dots, i_n, \frac{di_1}{dt}, \dots, \frac{di_n}{dt}, y_1, \dots, y_n \rangle \quad (2)$$

$$y_{\alpha} = F_{\alpha} \langle i_k, \frac{di_k}{dt}, y_k \rangle; \text{ здесь } \alpha = \langle 1, 2, \dots, n \rangle; \text{ в } M_{\alpha_n} \quad \alpha \neq n.$$

Задача синтеза автоколебательных систем с заданной формой колебания в общем случае сложна. Синтез же колебательных систем с формой колебания, близкой к гармонической (в том числе и многосвязных) может быть осуществлен достаточно простыми средствами.

Основные концепции колебательного контура сформулированы на примере двухфазной системы, при последующем рассмотрении систем более высокого порядка указаны их особенности.

Метод синтеза, предложенный в работе, основан на том, что производится построение системы определителей, в которой по характеру заполнения определителей методом Крылова - Боголюбова выясняется, с одной стороны, возможны ли колебания, если да, то на каких частотах и при каких критических скоростях, а с другой стороны, как необходимо изменить параметры и переменить связи, чтобы обеспечить требуемый режим. Этот метод синтеза по существу достаточно прост, оперирует с линейными уравнениями и линейными определителями, но при этом используются некие эквивалентно линеаризованные параметры, которые в последующем можно записать в уравнения установления колебаний и анализировать переходные процессы с учетом нелинейности системы.

Эквивалентная линеаризация в уравнениях первого

приближения может быть выполнена на любом этапе, как до написания уравнений для определенных нелинейных элементов, так и для записанных нелинейных членов в уравнениях. Это позволяет при синтезе схем оперировать с квазилинейными элементами, не только решать основные вопросы схемотехники, но и сделать очередной шаг: сформулировать уравнения первого приближения установления колебаний, в которых уже присутствуют эквивалентно линеаризованные параметры в виде функции амплитуды тока, что позволяет определить критические параметры систем и исследовать вопросы устойчивости колебаний. Для электротехнических систем эквивалентно линеаризованные параметры следует вычислять, исходя из принципа гармонического баланса, так:

$$R = \frac{1}{\pi I} \int_0^{2\pi} U_R(I \cos \psi) \cos \psi \, d\psi$$

$$L = \frac{1}{\pi \omega I} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{d}{dt} [\psi C a \cos \psi] \right\} \sin \psi \, d\psi$$

$$C = \frac{\pi I}{\omega} \left[\int_0^{2\pi} U_C \left(\frac{I}{\omega} \sin \psi \right) \sin \psi \, d\psi \right]^{-1}$$

где $\psi = \omega t + \varphi$

В работе сделано существенное продвижение и в переходе от элементарных каналов к системе в целом.

Для анализа системы на основе элементарного канала формально необходимо построить определитель, порядок которого соответствует количеству элементарных каналов. Такой определитель сложен и громоздок. Но в работе показано, как можно получить результирующие параметры системы из параметров элементарных каналов, не строя определителей

высоких порядков. Система уравнений на основе элементарного канала сводится к определителю, порядок которого равен числу фаз системы.

Например, двухфазный МГД генератор индуктивного возбуждения на основе определителя второго порядка:

$$\begin{cases} \left[\frac{LV}{\omega l} - R - j\omega(L + L_1) \right] I_1 - \frac{L_1 V}{\omega l} I_2 = 0 \\ \frac{L_1 V}{\omega l} I_1 + \left[\frac{LV}{\omega l} - R - j\omega(L + L_1) \right] I_2 = 0 \end{cases}$$

$$A_{12} = \frac{L_1 V}{\omega l}, \quad A_{21} = -A_{12}, \quad A_{11} = A_{22} = \left[\frac{LV}{\omega l} - R - j\omega(L + L_1) \right]$$

То есть, в работе показана возможность перехода от рассмотрения системы с распределенными параметрами к рассмотрению системы с сосредоточенными параметрами.

Ограничения такой возможности состоят в том, что не производится учет истинного растекания токов, которое, строго говоря, различно в разных элементарных каналах. Иными словами, ряд вторичных эффектов может оказаться довлеющим, тогда гипотеза об элементарном канале окажется неработающей.

Особо рассмотрено использование трансформаторов в схемах МГД-генераторов, т.к. МГДГ, особенно на жидких металлах, работают при низких напряжениях и значительных токах. То же относится и к плазменным МГДГ. Рассмотрен синтез схем с использованием различных каналов и обмоток возбуждения. Предложен ряд новых решений, в том числе и такие, в которых трансформаторная система и система возбуждения объединены в одно целое.

На рис.1 приведена схема двухфазного генератора с секционированными электродами, где все катушки создают общий магнитный поток. На рис.2 показана схема двухфазного генератора с общим магнитопроводом возбуждения и

трансформатора на рис. 3 - генератор с ЭДС движения и трансформаторным колебательным контуром, на рис. 4 - трехфазный двухобмоточный генератор, на рис. 5 - трехфазный трехобмоточный генератор индуктивного возбуждения.

Получены новые аналитические решения, подтверждающие возможность нормального автоколебательного режима в таких объединенных магнитных системах. Сформулированы соответствующие предложения для проектирования.

Рассмотрено сходство и отличие генераторов, у которых основой является, в одном случае, ЭДС движения, а в другом случае - трансформаторный колебательный контур. Для таких одно-, двух- и трехфазных схем получены решения. Тем самым существенно расширена схематехника МГДГ, т.к. возможность создания возбуждения в канале при помощи одной обмотки и возможность организации трансформаторной связи при помощи других, рядом расположенных обмоток, позволяют создать большое разнообразие схем под конкретные технические требования.

Итак, необходимо подчеркнуть, что показана возможность создания колебательных систем, у которых используется ЭДС движения и сам колебательный контур построен на трансформаторах. Для разработки машин с различными энергетическими параметрами, машин различных типов такая дополнительная возможность является существенной.

Необходимо также заметить, что в работе введена терминология для обратных связей. Так, связь выхода усилителя с его собственным входом названа "своей", а связь выхода одного усилителя со входом другого названа "чужой".

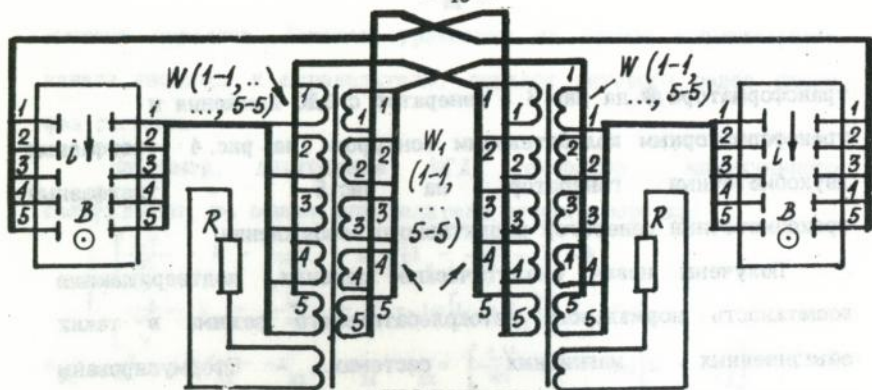


Рис. 1.

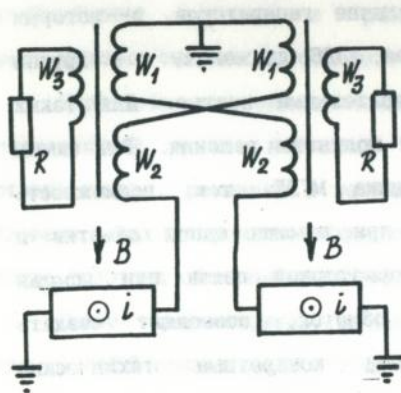


Рис. 2.

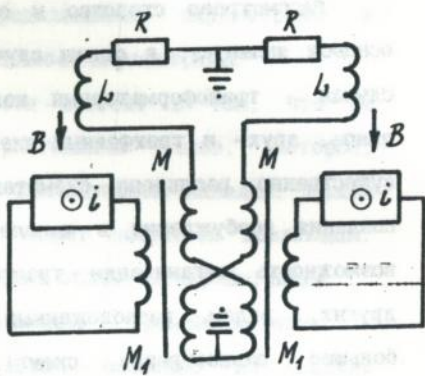


Рис. 3.

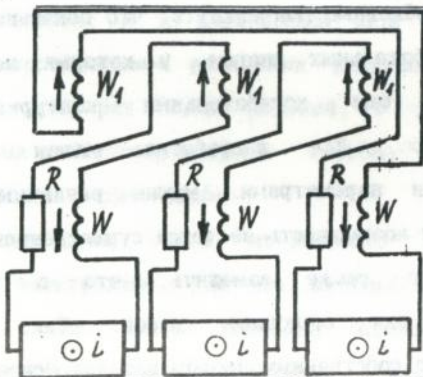


Рис. 4.

В связи с указанным можно говорить, что в двухфазном генераторе каждая фаза содержит одну свою и одну чужую связи, а в трехфазном генераторе в каждой фазе есть одна своя и одна или две чужие.

Для уточнения объема выполненной работы необходимо указать, что рассмотрены обе разновидности трехфазных генераторов.

Третья глава "Анализ уравнений установления колебаний" содержит разделы о линейном приближении, нелинейном анализе, о генераторах с сильно выраженным эффектом Холла, о влиянии вторичных эффектов на автоколебательные соотношения, о пространственных эффектах в МГД машинах переменного тока.

Нелинейный анализ и анализ стационарного состояния устойчивости выполнен для нескольких простых примеров. Здесь показано применение метода эквивалентной линеаризации для конкретных видов нелинейности. Анализ выполнен в рамках первого приближения теории колебаний, а эти рамки, как известно, справедливы тогда, когда процесс достаточно близок к гармоническому.

Решение эквивалентнолинеаризованных систем ищем не в виде $I_i = I e^{j\omega t}$, а в виде: $I_i = I e^{(\delta + j\omega)t}$. В этом случае подстановка в уравнения (1), (2) позволяет составить решающий определитель и, разделив действительные и мнимые части его, получить затухание δ и составить уравнения вида:

$$\frac{dI}{dt} = \delta I; \quad \omega = \omega_0 + \frac{d\phi}{dt} = f(L, C, R)$$

Аналогичный нелинейный анализ выполнен для генераторов с сильно выраженным эффектом Холла, выведены все необходимые уравнения, которые позволяют правильно рассчитать двух- и

трехфазные генераторы.

Чтобы получить некие общие закономерности, проведен анализ в уравнениях первого приближения теории колебаний разных типов генераторов; чтобы установить разницу между монореактивными генераторами и генераторами с емкостной компенсацией энергии, выведено соотношение между активной и реактивной мощностью.

Для оценки эффективности генераторов индуктивного возбуждения и оценки получаемых при возбуждении частот автоколебаний применены безразмерные величины - параметр квазистационарности Π_k и магнитные числа Рейнольдса для скорости течения - R_m и для скорости дрейфа - R'_m :

$$\Pi_k = \frac{\omega l}{v} = \frac{2\pi \cdot t_{\pi}}{T}; \quad R_m = \mu_0 \cdot \sigma \cdot v \cdot l; \quad R'_m = \frac{R_m}{k+1}; \quad k = \frac{R_3}{R_1}$$

где ω - частота колебаний, l - активная длина генератора, v - скорость течения, t_{π} - время пролета частицы в канале, T - период колебаний, μ_0 и σ - магнитная проницаемость и проводимость жидкости (по умолчанию принято, что жидкость немагнитна и ее проницаемость μ_0 та же, что и у вакуума), R_3 - полное виссисое в цепь активное сопротивление, R_1 - внутреннее сопротивление канала.

Π_k соизмеряет время пролета частицы в канале с периодом колебаний, R_m и R'_m соизмеряют величину магнитного поля, индуцированного при движении жидкости, с величиной внешнего, наложенного, поля.

Для идеальной машины $t_{\varphi} = \frac{\Pi_k}{R'_m}$, поэтому при $\Pi_k = 1$

$$\cos \varphi = \frac{R'_m}{\sqrt{1 + (R'_m)^2}}, \quad \text{что совпадает с аналогичным.}$$

известным из литературы.

Оказалось, что существует ограничение для генераторов индуктивного возбуждения: по порядку величины активная и реактивная энергии в них должны быть сравнимы. Если реактивная энергия во много раз будет превышать активную, то автоколебания не смогут существовать. Например, для двухфазного генератора при реактивной энергии вдвое меньшей, чем активная, частота колебаний оказывается максимальной, а если реактивная больше, то колебания срываются. Для трехфазного генератора в одном случае появляется коэффициент 3, а в другом случае $1/3$, т.е. по порядку величины это соотношение везде таково, но точные значения у разных типов генераторов различны.

Изучены точные гармонические решения для разных типов генераторов, показаны условия существования этих генераторов. Главный вывод здесь математический, он состоит в следующем.

Если нелинейности системы возможно представить в виде квадратичных функций их параметров, то система, состоящая из таких нелинейностей и отвечающая по своему устройству циклическим структурам, представляет собой замкнутую автоколебательную систему, в которой возможно существование чисто гармонических колебаний. С точки зрения энергетики это означает, что такая автоколебательная система непрерывно и постоянно потребляет энергию от источника, а не периодически и порционно, т.е. весь перелив реактивной энергии осуществляется внутри системы. Традиционные колебательные системы, одно- и двухфазные, потребляют энергию источника

порционно, периодически возвращая часть энергии обратно, что приводит к увеличению потерь в источнике.

Такое свойство монореактивных генераторов является особо существенным для работы с источником, энергия которого ограничена.

Существенно, что это свойство монореактивных генераторов возникает только при полной симметрии режима между фазами.

Рассмотрены влияния вторичных эффектов на автоколебательные соотношения: какие эффекты, как влияют, насколько они существенны.

Рассмотрена реакция вихревых токов в канале, реакция концевых токов, концевые потери, шунтирование электропроводных стенок.

Изложено решение задачи о пространственном эффекте в МГД-машине. Учтена несимметрия, связанная с расположением центральной фазы посередине, а двух крайних - по краям канала. Уравнения автоколебательной системы численно решены совместно с краевой задачей и получены следующие результаты: если рабочее тело - калия при $t=550^{\circ}\text{C}$, его скорость $v = 50$ м/с, ширина канала $h = 0,0162$ м, зазор по жидкому металлу $\Delta = 0,006$ м, индукция в канале $B = 0,65\text{Тл}$, то полезная мощность 24,6 кВт, частота самовозбуждения 53 Гц, КПД = 43 %.

Четвертая глава называется "Результаты экспериментальных исследований, практические применения монореактивных машин".

В начале приведен обзор известных экспериментальных данных, в котором названы источники информации и обсуждены

полученные результаты, в основном касающиеся МГД и электромашин. Работы по этой тематике выполнены, в частности, и в лаборатории МГД ЭНИН в течение 1964-1989 г. г.

Рассмотрена возможность моделирования МГД-генераторов электронными генераторами и твердотельными генераторами Холла. Необходимость моделирования общеизвестна: создание и испытание реальной электрической машины по каждой схеме - сложная работа, которая может оказаться экономически невыгодной; но, если подтвердить экспериментально правильность энергетического анализа, например, для однофазного генератора с независимым возбуждением, то вполне возможно произвести схемотехническую разработку многофазной монореактивной автоколебательной системы на электронной или, например, на транзисторной модели.

В соответствии с этим подходом сформулированы критерии моделирования и приведены результаты выполненных испытаний двух- и трехфазных генераторов по различным схемам - зависимости частоты, амплитуды, вида колебаний, при сильных нелинейностях и т. п.

Кроме того, оказалось, что эти модели не только новы, но интересны сами по себе: они оказались перспективными для самостоятельных применений в качестве изделий электронной техники, но эта тематика находится за пределами излагаемой работы. Тем не менее, одна из систем, которая благодаря автору нашла в МГД-технике некоторое применение, изложена как пример реализации монореактивных автоколебательных систем.

Аналогичное моделирование систем с использованием сильно выраженного эффекта Холла на электронных моделях невозможно ибо эффект Холла вносит в эти модели другую физическую основу, другую форму в уравнения этих систем. Возникает ряд квадратичных эффектов, связанных собственно с параметром Холла и вхождением его нелинейным образом в закон Ома, что невозможно смоделировать доступными электронными устройствами.

Поэтому, первой задачей "по Холлу" было проведение анализа энергетических и, возможно, автоколебательных соотношений для системы, построенной на элементах с сильно выраженным эффектом Холла.

Получено, что электрический КПД преобразователя:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\left(1 - \frac{v}{v^*}\right) \left(\alpha + \beta \frac{v}{v^*}\right) \beta^2}{\left(1 + \alpha + \beta \frac{v}{v^*}\right) \left(\alpha + \beta \frac{v}{v^*} + 1\right)}$$

где v и v^* - скорости движения среды и нейтральных частиц соответственно, α - коэффициент нагрузки, β - безразмерный параметр Холла.

При $v = 0$:
$$\eta_{\text{э}} = \frac{\alpha \beta^2}{(1 + \alpha)(1 + \alpha + \beta^2)}$$

и
$$\eta_{\text{эопт}} = \frac{\sqrt{1 + \beta^2} - 1}{\sqrt{1 + \beta^2} + 1} \quad \text{при} \quad \alpha_{\text{опт}} = \sqrt{1 + \beta^2}$$

Поскольку на плазме создавать эти генераторы трудно и дорого, был изготовлен генератор на антимониде индия, как известно, позволяющем получать весьма большие значения параметра Холла, которые при комнатной температуре могут достигать десятков, а при низких - могут достигать и сотен. Из теории следовало, что КПД очень сильно зависит от параметра Холла. Если он больше единицы, то КПД уже

достаточно высок, а при величине порядка 100 он может достигать, по расчетам, 99%.

Соответствующие экспериментальные исследования были проведены, получены результаты, из которых следовало, что при относительно низких параметрах Холла был получен КПД=45%, в опровержение литературным источникам, где утверждалось, что при подобных условиях невозможно получить КПД выше 17%. Но в упомянутых источниках не учитывалась возможность секционирования электродов и разделения нагрузок генератора, а именно это позволило получить более высокий КПД.

Следующим этапом была разработка и изготовление автоколебательной системы, в которой, в действительности, возникал автоколебательный режим (рис.6). Но следует указать, что этот режим возник на короткое время, что связано с быстрым нагревом образцов антимонид индия, для которых не было предусмотрено принудительное охлаждение.

Выполнено исследование большого числа практических схем автогенераторов: на основе электронных ламп, транзисторов различных типов, а также операционных усилителей.

Каждая из названных типов усилителей характеризуется своим видом нелинейности, возможностями изменения амплитудных характеристик и характеристик обратной связи. Поэтому монореактивные генераторы на их основе имеют различные особенности. Эти исследования подтвердили теорию, но в ряде случаев процессы оказались гораздо более разнообразными, чем это представлялось до начала экспериментов: теория не учитывала ряд вторичных эффектов.

Например, паразитные емкости, в обмотках трансформаторов образуют некие резонансные цепи в автогенераторах, из-за чего возникает явление ударного возбуждения и, возникает очень сложного вида модуляция колебаний (рис. 7).

Ряд схем монореактивных автогенераторов внедрен, в том числе в качестве устройств для управления тиристорным преобразователем (рис. 8). Есть акты внедрения.

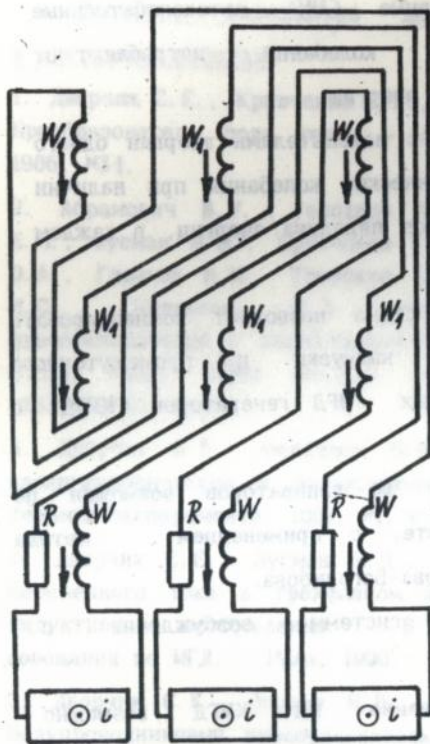


Рис. 5.

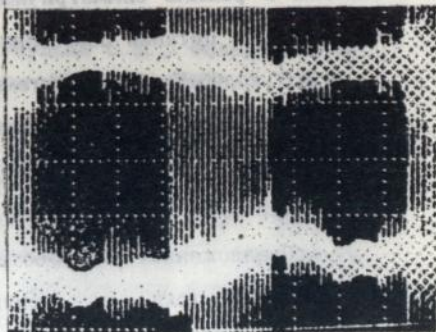


Рис. 6.

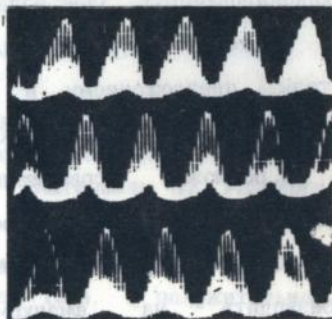
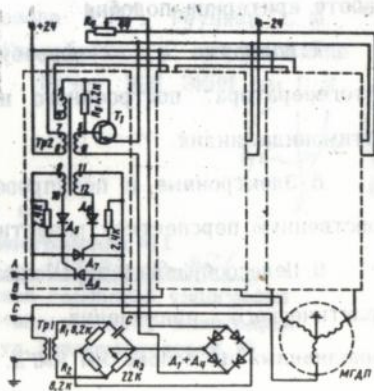


Рис. 7.

Схема управления питанием трехфазного жидкометаллического насоса. T_1 — КТ805АМ; $A_1 + A_2$ — КД204А, D_1, D_2 — Т150; $Tr1$ — трансформатор любого типа 220/5В, $Tr2$ — ТА-36-220-400; МГДП — трехфазный жидкометаллический насос АМН-5

Рис. 8.



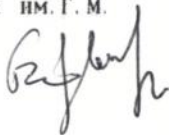
КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Многофазные монореактивные (ММ) автоколебательные системы в режиме симметричных колебания потребляют от источника питания постоянную энергию.
2. В колебательной системе с накопителями энергии одного вида могут существовать гармонические колебания при наличии не менее двух отдельных контуров перелива энергии, в каждом из которых есть свой усилитель.
3. Предложенная в работе схема позволяет компенсировать вихревые токи в цепях нагрузки и промежуточного трансформатора для кондукционных МГД генераторов (КМГД) с секционированными электродами.
4. Схемотехнический анализ ММ генераторов возможен по методу, предложенному в работе, с применением метода эквивалентной линеаризации Крылова-Боголюбова.
5. Возможно совмещение системы возбуждения с промежуточным трансформатором.
6. Разработку и исследование ММ КМГД возможно производить на физикоматематических электронных и полупроводниковых моделях с применением предложенных в работе критериев подобия.
7. Возможно самовозбуждение ММ холловского автогенератора, построенного на многоэлектродных образцах из антимонида индия.
8. Электронные и полупроводниковые модели ММ КМГД имеют собственную перспективу развития.
9. Целесообразна дальнейшая работа по доведению до практического применения компенсированных МГД устройств, выполненных на основе ММ КМГД.

Основное содержание диссертации опубликовано

в следующих работах:

1. Дворчик С.Е., Кривченко Е.Г., Реуцкий С.Ю., Фельдман Б.М. Преобразователь рода тока. - А.с. №1257805 СССР. - Б.И., 1986, №34.
2. Абрамович В.У., Голодняк В.А., Дворчик С.Е., Заремба Е.Л., Зусман М.В., Кривченко Е.Г., Реуцкий С.Ю., Кучеренко О.А., Глазков Н.И., Троицкий С.Р., Фельдман Б.М., Дворчик И.С., Колевзон В.Л. Исследование и разработка преобразователей и коммутационной силовоточной аппаратуры. - Отчет №130, ЭНИН им.Г.М. Кржижановского, гос.регистр. №1830068546, 1985.
3. Дворчик С.Е., Фельдман Б.М. Многосвязный автогенератор квазигармонических и релаксационных колебаний. - Приборы и техника эксперимента, 1991, №1, с.139-141.
4. Дворчик С.Е., Зусман М.В., Фельдман Б.М. генерирование переменного тока в трехфазном жидкометаллическом генераторе индуктивного возбуждения. - В сб.: Материалы 12 Рижского совещания по МГД. - Рига, 1990.
5. Дворчик С.Е., Зусман М.В., Свижер А.Я., Фельдман Б.М. Полупроводниковый преобразователь рода тока. - положительное решение по заявке №4737399/07/117540/ от 13.09.89
6. Гехт Г.М., Голодняк В.А., Дворчик С.Е., Заремба Е.Л., Зусман М.В., Кривченко Е.Г., Морозова В.И., Реуцкий С.Ю., Троицкий С.Р., Фельдман Б.М. Разработка и исследование преобразователя на эффекте Холла. - Отчет №20 ЭНИН им.Г.М. Кржижановского. 1988.



Подписано к печати 20.11.93

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская №1

Печать офсетная, Объем 1 п.л., Тир. 100 Зак. Р-871

Отпечатано на ротационной в Харьковской городской типографии
№16 Областного управления по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли, Харьков-3, ул. Университетская, 16

450546

AB 29038

AB 29.038