

6
А-25
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ГОРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. А. ЖДАНОВА

Кафедра электрических машин и аппаратов

На правах рукописи

Аспирант В. Ф. СИДЯКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Руководитель —
кандидат технических наук
доцент А. С. РОЗЕНКРАНЦ.

Научный консультант —
доктор технических наук
профессор А. М. БАМДАС.

г. Горький — 1965 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

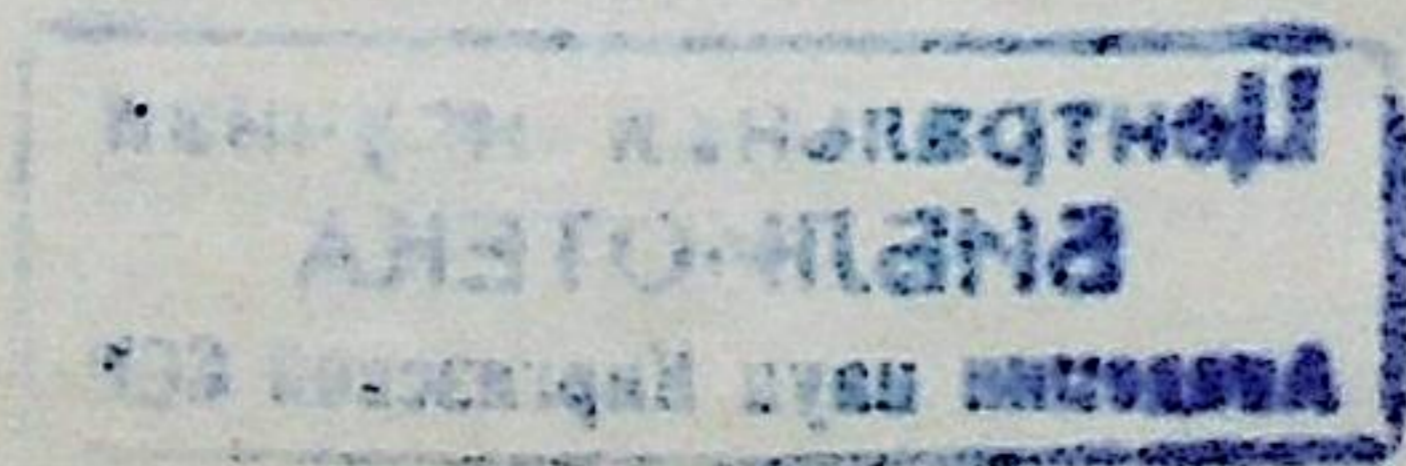
ГОРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. А. ЖДАНОВА

Кафедра электрических машин и аппаратов

Аспирант В. Ф. СИДЯКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



г. Горький — 1965 г.

Всевозможные типы статических ферромагнитных нелинейных аппаратов (магнитных усилителей, стабилизаторов напряжения, тока, пик-трансформаторов, трансформаторов с подмагничиваемыми шунтами, статических преобразователей частоты и т. д.) находят сейчас все более и более широкое применение.

Разработкой различных типов таких аппаратов занимается ряд крупных исследовательских центров страны, таких как исследовательская лаборатория электрических машин и аппаратов Горьковского политехнического института имени А. А. Жданова, институт электротехники АН Украинской ССР, институт энергетики АН Латвийской ССР и др.

Исследованию и разработке различных типов статических ферромагнитных аппаратов посвящены работы многих советских ученых: В. П. Вологодина, Н. Н. Рукавишникова, А. М. Бамдаса, С. П. Пивоварова, А. Г. Лурье, Г. К. Евдокимова, Г. Н. Пегрова, Л. Л. Рожанского, А. Д. Кратирова, А. Н. Милях, М. А. Розенבלата и многих других. Большое внимание статическим преобразователям уделяется в зарубежной литературе.

В силу нелинейности кривой намагничивания ферромагнитных материалов аналитический расчет таких аппаратов весьма сложен и не отличается, в большинстве случаев, высокой точностью. Это делает особенно важной проблему их моделирования.

Основы моделирования в электротехнике заложены В. А. Вениковым. Большие работы по физическому и математическому моделированию различных ферромагнитных аппаратов проделаны в Институте энергетики АН ЛатвССР (И. М. Кирко, Э. А. Якубайтис, В. П. Глухов, В. Я. Бояревич и др.). В зарубежной печати имеются работы по моделированию магнитных усилителей (Вудсон).

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа посвящена исследованию некоторых вопросов физического и математического моделирования ферромагнитных аппаратов, многие из которых обладают той особенностью, что конфигурация магнитопровода в них играет существенную роль. Такими аппаратами являются трансформаторы с шунтами, стабилизаторы, пик-трансформаторы и т. д. При этом в ряде конструкций таких аппаратов существенную роль играют воздушные зазоры. В 1953 году А. С. Розенкранцем предложен метод моделирования таких аппаратов путем замены сложного магнитопровода его схемой замещения — электрической цепью из дросселей.

Моделированию аппаратов со сложной конфигурацией магнитопровода и разработке универсального расчетного стола посвящена, в основном, реферируемая работа. Часто при исследовании ферромагнитных аппаратов требуется более подробное выяснение картины электромагнитных процессов в различных частях аппарата. Развитие методов, применяемых при физическом моделировании аппаратов со сложной конфигурацией магнитопровода, позволяет решить эту задачу.

В первой главе показано, что при изготовлении модели много меньшей по мощности природы при любом способе моделирования не представляется возможным использовать в модели тот же магнитный материал, что и в натуре, сохранить геометрическое подобие модели и природы и, следовательно, невозможность моделирования с учетом потоков рассеяния. В этом отношении предлагаемый способ физического моделирования не обладает какими-либо дополнительными недостатками. Обоснована необходимость применения аффинного подобия кривых намагничивания различных сталей. Показано, что для ряда ферромагнитных материалов при аффинном подобии кривых намагничивания с достаточной для инженерных целей точностью соблюдается подобие потерь на гистерезис, что дает возможность построения модели с учетом потерь в стали.

Моделирование аппаратов со сложной конфигурацией магнитопроводов на аналоговых математических машинах обладает рядом особенностей. Применение в этом случае за-

мены магнитопровода его схемой замещения облегчает составление электронных моделей.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ СЛОЖНОГО МАГНИТОПРОВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

Жесткая зависимость между током в дросселе и потерями МДС в сердечнике дросселя:

$$i = \frac{Hl}{w} \quad (1)$$

и между магнитным потоком (изменением магнитного потока) и напряжением на обмотке дросселя:

$$u = w \frac{d\Phi}{dt} = ws \frac{dB}{dt}, \quad (2)$$

дает возможность набирать схему из дросселей, электромагнитные процессы в сердечниках которых будут подобны процессам в отдельных участках сложной магнитной цепи.

Для контура магнитной цепи имеем:

$$\sum H_k l_k = \sum F_k \quad (3)$$

где H_k — напряженность магнитного поля на k -ом участке,

l_k — длина k -ого участка контура,

F_k — МДС на k -ом участке контура.

Обмотки соответствующих дросселей можно собрать так, что будет соблюдаться уравнение:

$$\sum i_k = \sum I_k \quad (4)$$

где i_k — ток обмотки k -го участка,

I_k — источник тока, соответствующий МДС k -ого участка.

Поскольку между i_k и $H_k l_k$ существует жесткая связь по уравнению (1), уравнение (4) будет соответствовать уравнению (3).

Для узла магнитной цепи имеем:

$$\sum \Phi_k = \sum S_k B_k = 0 \quad (5)$$

Соответствующие обмотки дросселей можно соединить в контур так, что будет выполняться уравнение:

$$\sum u_k = \sum w_k s_k \frac{dB_k}{dt} = 0 \quad (6)$$

В том случае, если отсутствуют постоянные потоки, уравнение (6) можно проинтегрировать, постоянные интегрирования будут равны нулю и получим:

$$\sum w_k s_k B_k = 0 \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) эквивалентны и уравнение контура электрической цепи (6) будет определять равенство (5) для узла магнитной цепи.

Конфигурация электрической цепи дуальна магнитной цепи.

Источники МДС, имеющиеся в натуре на магнитопроводе, могут вводиться в виде источников тока, как в уравнении (4), или размещением обмоток аппарата на дросселях, моделирующих соответствующие участки магнитопровода.

Строя схему замещения магнитопровода, можно учитывать и участки, где магнитным проводником является воздух (потоки рассеяния), т. е. определив каким-либо способом магнитную проводимость путей потоков рассеяния, можно построить модель с учетом потоков рассеяния.

Подобие процессов в стали дросселей электрической схемы замещения процессам в стали магнитопровода природы требует выполнения следующих условий:

$$\frac{m_{B1} m_{s1}}{m_t w_1^*} = \frac{m_{B2} m_{s2}}{m_t w_2^*} = \dots = K = \text{пост.} \quad (8)$$

$$\frac{m_{H1} m_{I1} w_1^*}{m_F} = \frac{m_{H2} m_{I2} w_2^*}{m_F} = \dots = 1 \quad (9)$$

Здесь $m_B = \frac{B}{B^*}$ — масштаб индукции,

$m_H = \frac{H}{H^*}$ — масштаб напряженности магнитного поля,

$m_t = \frac{t}{t^*}$ — масштаб времени,

$m_F = \frac{Hl}{i^*}$ — масштаб магнитного напряжения,

$m_s = \frac{s}{s^*}$ — масштаб сечения стали,

$m_l = \frac{l}{l^*}$ — масштаб длины стали,

w^* — число витков дросселей схемы замещения.

(Все величины со звездочкой относятся к модели).

Для соблюдения подобия процессов в стали нет необходимости соблюдать постоянство числа витков, масштабов длины и сечения стали на отдельных участках модели. Это дает возможность, изменяя m_s , m_l и w^* , составлять схему замещения из дросселей, которые имеют сердечники одинакового штампа, но отличаются объемом и числом витков.

Два последовательно соединенных дросселя с сердечниками одинакового штампа и с одинаковым числом витков (одинаковое число витков на единицу длины) эквивалентны одному дросселю с сердечником того же штампа, но с объемом стали, равным суммарному.

Вышеперечисленные условия дают возможность изготовить универсальный расчетный стол для моделирования нелинейных электромагнитных аппаратов самых различных типов.

ГЛАВА III

КОНСТРУКЦИЯ РАСЧЕТНОГО СТОЛА

В этой главе показано, как из нескольких дросселей можно набрать цепь, эквивалентную заданному дросселю, какое число дросселей и с каким объемом сердечников необходимо иметь в составе расчетного стола, чтобы можно было составлять модель, отдельные участки которой соответствовали бы натуре с точностью до 5%.

При конструировании нелинейных дросселей решались следующие задачи:

а) на каждом дросселе должно быть такое число обмоток с таким числом витков, чтобы из них можно было набрать любое число витков в самом широком диапазоне (от 1 до 2400);

б) каждая обмотка, имеющаяся на дросселе, должна обеспечивать напряженность магнитного поля порядка $200 \div 300$ а/см при пересчете на обычную трансформаторную сталь;

в) потоки рассеяния должны быть минимальными, так чтобы кривые намагничивания, снятые на разных обмотках, были бы практически одинаковыми;

г) потери в обмотках дросселя были бы много меньше потерь в стали, т. е. составляли бы не более $5 \div 10\%$;

д) во всех режимах (даже при насыщении стали) индуктивное падение напряжения на дросселе было бы много более активного;

е) размер дросселей и расчетного стола не должен быть очень большим.

Выполнение всех этих условий возможно лишь в случае применения в дросселях высокопроницаемого магнитного материала и использования при моделировании аффинного подобия кривых намагничивания.

Применение пермаллоя 79НМА, кривая намагничивания которого при масштабе индукции равном $2,6 \div 3,0$ и масштабе напряженности магнитного поля равном $26 \div 40$ (для различных сталей), достаточно полно совпадает с кривыми намагничивания электротехнических сталей, дало возможность выполнить все вышеперечисленные условия.

Линейные индуктивности выполнены в виде дросселей с воздушными зазорами.

Каждый дроссель имеет восемь обмоток с числом витков: 800, 800, 400, 200, 100, 50, 25, 12.

Необходимость в ряде случаев выделить в модели ток, соответствующий потерям МДС на отдельных участках, а также невозможность иногда из имеющихся на дросселе обмоток составить две-три обмотки с заданным числом витков приводит к необходимости иметь в комплекте стола трансформаторы с малыми потерями и по току и по напряжению.

Изготовление таких трансформаторов стало возможным благодаря применению специальной конструкции: для уменьшения потерь напряжения обмотки трансформатора расщеплены на несколько проводов, провода первичной и вторичной обмоток наматывались совместно в виде жгута, что резко снизило индуктивность рассеяния; для уменьшения тока намагничивания применен штампованный тороидальный сердечник с магнитной проницаемостью 50000.

В работе дана подробная методика расчета таких трансформаторов, показавшая, что потери зависят от принятой плотности тока и от мощности трансформатора и что минимум потерь наблюдается при оптимальной мощности и плот-

ности тока, т. е. для получения минимума потерь иногда экономичнее включать два трансформатора. Методика расчета подтверждена экспериментами. Изготовленные трансформаторы имеют на частоте 50 гц погрешности по току и по напряжению не более 1,5%. Повышение частоты дает возможность еще более снизить потери.

В составе стола использовались лабораторные магазины емкостей и активных сопротивлений.

В силу маломощности модели все измерения производятся электронными приборами.

ГЛАВА IV

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ

Метод составления схем замещения, разобранный в работе, сам по себе представляет интерес, т. к. позволяет формально составлять схемы замещения весьма сложных электромагнитных аппаратов и по схеме замещения анализировать работу и значение отдельных элементов аппарата. В качестве примера разобрано построение схемы замещения обычного трансформатора, с учетом потоков рассеяния; с помощью схем замещения показана аналогия между конструктивно различными схемами; показано, что в некоторых случаях с помощью предлагаемого метода моделирования можно учитывать геометрию сердечника (отношение диаметров тора) и, что самое главное, на предлагаемом расчетном столе можно набирать модели большинства известных электромагнитных аппаратов.

ГЛАВА V

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью выявления возможной точности моделирования его возможностей, для иллюстрации порядка составления модели было произведено моделирование двух феррорезонансных стабилизаторов напряжения и статического утроителя частоты.

Во-первых, был промоделирован серийно выпускаемый промышленностью стабилизатор СНЭ-0,5. Этот стабилизатор выбран по той причине, что он имеет магнитопровод «сложной

конфигурации» (с крестообразной внутренней частью и магнитным шунтом), существенную роль в котором выполняет воздушный зазор. Для определения магнитной проводимости воздушного зазора исследовалась его плоская модель, выполненная на электропроводной бумаге. (В работе не ставится специального вопроса определения магнитной проводимости путей потоков рассеяния и воздушных зазоров, но утверждается, что в случае необходимости модель может быть построена с учетом потоков рассеяния).

На эксперименте показано, что предлагаемым методом можно моделировать не только установившиеся, но и переходные режимы.

Анализ схемы замещения стабилизатора СНЭ-0,5 выявил ряд недостатков его конструкции, устранение которых позволило бы уменьшить расход активных материалов на единицу мощности.

Устранение этих недостатков привело к новой принципиальной схеме и новой конструкции стабилизатора. Для выявления оптимального варианта новой конструкции исследовалась его модель при различных значениях линейной индуктивности, моделирующей воздушный зазор, и различных величинах емкостей. С небольшими затратами труда было исследовано более 20 вариантов. По одному из вариантов был построен натурный образец. Совпадение характеристик натуре и модели вполне удовлетворительное. Изготовленный стабилизатор имеет вес активных материалов 60% от веса СНЭ-0,5, емкость конденсаторов 7 $\mu\text{кф}$ вместо 15 при одинаковой мощности и других показателях стабилизатора.

ГЛАВА VI.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ КОНДЕНСАТОРОВ

Аналогия между величинами, характеризующими магнитное состояние вещества B , H , $\frac{dB}{dt}$ и величинами, характеризующими состояние конденсатора q , u , $\frac{dq}{dt}$ когда:

$$B \equiv q \quad (10)$$

$$H \equiv u \quad (11)$$

$$e = s \frac{dB}{dt} \equiv i = \frac{dq}{dt} \quad (12)$$

позволяет моделировать электромагнитные аппараты путем замены магнитных элементов сегнетокерамическими конденсаторами. Составление такой модели позволяет провести аналогию между нелинейными ферромагнитными аппаратами и аппаратами, использующими нелинейные конденсаторы.

Этот способ моделирования обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, однако, развитию его препятствует несовершенство выпускаемых в настоящее время сегнетодиэлектриков.

Данная аналогия позволяет также моделировать электромагнитные поля в сплошной электропроводящей ферромагнитной среде, что иногда является необходимым при более глубоком изучении электромагнитных процессов в отдельных участках аппаратов.

В работе показано, что электропроводящая ферромагнитная среда должна моделироваться двумя сетками, одна из которых должна моделировать магнитную проводимость, другая — электрическую.

В случае моделирования магнитной среды электрической цепью, состоящей из дросселей (сетка должна быть дуальна кубической сетке), сетка электрических проводимостей будет обычной кубической сеткой, в контуры которой необходимо вводить ЭДС, индуктируемые на дросселях. Такая сетка практически не осуществима.

Если сетку, моделирующую магнитную проводимость, выполнить из конденсаторов, то сетка, моделирующая электрическую проводимость, будет дуальна обычной кубической сетке. Вместо ЭДС, вводимой в контуры, в этом случае в узлы дуальной сетки проводимостей должны вводиться токи конденсаторов, моделирующих магнитную проводимость среды. Подача токов в узлы практически легко осуществима. Это делается с помощью трансформаторов, включенных одной обмоткой в цепь соответствующих конденсаторов, другой — в узлы сетки электрической проводимости.

В работе показана аналогия между уравнениями, описывающими процессы в такой сеточной модели, и уравнениями Максвелла.

Составление таких моделей для решения объемных задач в общем случае требует большого числа трансформаторов с минимально возможными потерями и по току и по напряжению одновременно. Как показано в работе, изготовление таких трансформаторов возможно, но большое их число явно затруднит реализацию модели. Показано, что в ряде случаев решение частных задач либо совсем не требует трансформаторов, либо требует небольшого их числа.

Таким способом легко решается задача поверхностного эффекта в проводнике, когда ее можно считать плоской (два измерения), при этом, применяя нелинейные конденсаторы, можно решать задачу с учетом насыщения. Не требует большого числа трансформаторов и задача вытеснения магнитного поля из зоны, охваченной короткозамкнутым витком или обмоткой.

Все вышеизложенные методы моделирования требуют дуального преобразования цепей, а часто — дуального преобразования объемных цепей. В работе дана новая методика дуального преобразования объемных цепей.

Показано, что обычным способом дуально преобразованы могут быть не только плоские цепи, но и те, которые можно расположить на поверхности первого, второго и т. д. рода при условии, что в отверстия «ручек» проходит минимум две ветви.

Показано, что цепи, которые не могут иметь натуральную систему контуров, т. е. такую матрицу контуров, в каждом столбце которой только две занятые клетки, не могут быть обычным способом дуально преобразованы. В то же время такие цепи могут иметь матрицу контуров, в каждом столбце которой либо две, либо четыре заполненные клетки (но не три). Эти цепи могут быть дуально преобразованы только в случае трансформаторного включения отдельных ветвей. (Матрица узлов цепи с трансформаторами может быть такой, что в каждом столбце либо две, либо четыре занятые клетки).

Показано, что для того чтобы цепи были дуальны достаточно, чтобы одна из матриц контуров одной цепи была бы одинакова с матрицей узлов другой цепи или наоборот. Для этого подробно разработан вопрос построения матрицы контуров по матрице узлов и наоборот.

Разработанный способ дуального преобразования применим к сколь угодно сложным цепям и не требует предварительного плоского изображения цепи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЭА НА АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МАШИНАХ

При применении аналоговых электронных машин для моделирования ферромагнитных аппаратов возникают, в основном, две задачи: составление структурных схем моделей аппаратов и учет гистерезиса, вихревых токов и нелинейности кривой намагничивания.

Предложен упрощенный, но в большинстве случаев вполне приемлемый, искусственный метод учета гистерезиса и вихревых токов.

Наиболее точный учет гистерезиса и кривой намагничивания осуществляется при использовании в электронной модели образцов из реального ферромагнитного материала. В работе предложены новые схемы такого сочетания, осуществляющие, в отличие от известных, операции интегрирования, а не дифференцирования. (Как известно, операции дифференцирования крайне не желательны в электронных моделях). В одной из схем полностью исключаются погрешности от размагничивающего действия тока в измерительной обмотке. Схемы основаны на включении в обратную связь операционного усилителя реального трансформатора.

Аналогичное включение в электронную машину цепочечной схемы, моделирующей поверхностный эффект, дает возможность с высокой точностью учитывать и насыщение и поверхностный эффект.

Применение в образцах сплавов с высокой магнитной проницаемостью и использование аффинного подобия кривых намагничивания позволяет получать высокие насыщения без применения дополнительных устройств.

При составлении структурных схем электронных моделей применен метод направленных графов. Графы могут составляться либо отдельно для электрических и магнитных цепей с последующим их соединением, либо для схемы аппарата по изложенным ранее правилам составляется схема замещения и граф составляется для получившейся электрической цепи. Последний метод облегчает составление структурных схем электронных моделей, в которых в качестве нелинейных интегрирующих элементов используются усилители с реальным ферромагнитным материалом.

При исследовании НЭА часто возникает необходимость гармонического анализа получающихся несинусоидальных токов и напряжений. При моделировании на АЭМ имеется возможность анализа с помощью той же машины несинусоидальных напряжений. Предлагаемая в работе методика гармонического анализа заключается в моделировании на АЭМ электрических фильтров. Высокая добротность используемых в машинах элементов позволяет моделировать фильтры высокой добротности и производить высокую степень отделения гармоник. Исследования показали, что наиболее приемлемой для этих целей является схема простейшего фильтра, состоящего из активного сопротивления и последовательно подключенного с ним контура $L - C$, настроенного на частоту выделяемой гармоники. Математический анализ показал, что отделить $K+1$ -ю гармонику от K -ой так же легко, как 2-ю от 1-ой. При разложении прямоугольной периодической кривой на машине ИПТ-5 выделялись 1, 3, 5, 7, 9 и 11 гармоники.

Результаты выполненной работы:

1. Изготовлен расчетный стол, на котором можно реализовать схему замещения большинства типов известных ферромагнитных аппаратов. Показано, что данный метод моделирования позволяет создавать модели с учетом потоков рассеяния и потерь в стали.

2. Показано, что замена аппарата его схемой замещения не только позволяет составить его модель на расчетном столе, но в ряде случаев проанализировать конструкцию аппарата. Так, в результате анализа схемы замещения стабилизатора СНЭ-0,5 создан новый стабилизатор, вес которого на 40% ниже веса СНЭ-0,5 при одинаковых остальных параметрах.

3. Показано, что аналогия между кривыми намагничивания $B=f(H)$ и зависимостями $q=f(u)$ для конденсаторов с сегнетоэлектриками, во-первых, дает возможность из нелинейных конденсаторов набирать модели ферромагнитных аппаратов, во-вторых, по известным ферромагнитным аппаратам проектировать соответствующие на нелинейных емкостях и наоборот.

Развитие этих аналогий дает возможность построить точную модель для моделирования электромагнитных полей

в сплошной ферромагнитной электропроводящей среде, что позволяет подробно исследовать электромагнитные процессы в отдельных частях аппарата.

4. Подробно разработана теория дуального преобразования объемных цепей, которая необходима при составлении схем замещения ферромагнитных аппаратов.

5. Предложены интегрирующие схемы сочетания реального ферромагнитного образца с электронной моделью. Применение этих схем и использование методов составления схем замещения в сочетании с теорией графов дает возможность составлять электронные модели аппаратов со сложной конфигурацией магнитопроводов с учетом гистерезиса, кривой намагничивания и вихревых токов.

6. Предложена методика гармонического анализа на аналоговой электронной математической машине.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ:

1. Моделирование нелинейных ферромагнитных аппаратов, ИВУЗ, «Энергетика», № 3, 1965 г.

2. Моделирование феррорезонансного стабилизатора напряжения, ИВУЗ, «Электромеханика», № 2, 1965 г.

3. Универсальный расчетный стол для моделирования нелинейных ферромагнитных аппаратов, сборник «Электротехническая промышленность», вып. 254, 1965 г.

4. Измерительный трансформатор тока и напряжения, ИВУЗ, «Приборостроение», 1965 г., № 5.

5. Гармонический анализ на аналоговой математической машине, ИВУЗ, «Электромеханика», 1965 г., № 8.

6. О сеточном моделировании электромагнитных полей в сплошной ферромагнитной электропроводящей среде, Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по аналоговым средствам и методам решения краевых задач, Киев, июнь, 1965 г.

7. О дуальном преобразовании объемных цепей, ИВУЗ, «Энергетика», 1965 г., № (в печати).

Один из разделов работы был изложен на II Всесоюзной конференции по аналоговым средствам и методам решения краевых задач, Киев, июнь, 1965 г.

Текст диссертации на 218 стр. состоит из семи глав, заключения, приложения с данными эксперимента и списка литературы. Список литературы насчитывает 87 названий. В тексте имеется 106 рисунков.

308675

**Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР**

Зак. 2044. Объем 1 п. л. KE-01156. 26/VII-65 г. Тир. 370.

Типография СНХ, г. Иваново, ул. Ермака, 41.