

6
А-63

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Т.Ш. ГУСЕЙНОВ

На правах рукописи

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ
ЛЕНТОЧНЫХ МИКРОФОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛОГОВЫХ
И ЭЛЕКТРОННО ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

(05 240 - Электрические аппараты)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971г.

Электроакустика является одной из тех областей техники, в которой постоянные магниты получили широкое применение. После создания сплавов с высокой магнитной энергией $(15-25) \cdot 10^3$ Дж/м³ магнитные системы электроакустических аппаратов (динамических громкоговорителей и микрофонов) выпускаются главным образом с постоянными магнитами. К преимуществам систем с постоянными магнитами можно отнести: отсутствие обмотки возбуждения и источника ее питания, высокую надежность, благоприятный тепловой режим, уменьшение веса и цены системы.

При расчете систем с постоянными магнитами основное затруднение состоит в определении потоков рассеяния, которое производится либо путем вычисления соответствующих проводимостей, либо по полуэмпирическим коэффициентам рассеяния. Существующие формулы проводимостей в большинстве случаев основаны на упрощении картины магнитного поля и характеризуются порой низкой точностью. Коэффициенты рассеяния, рекомендуемые для практического применения различными авторами, изменяются в весьма широких пределах. Аналитические методы расчета потокораспределения в системах с постоянными магнитами, как правило, годятся для систем определенной конфигурации и конкретных магнитотвердых материалов.

Магнитная система ленточных микрофонов, имеющая сложную конфигурацию, является трехмерной и поэтому расчет ее потоков рассеяния затруднен.

В представленной работе рассматривается задача расчета и оптимального проектирования магнитных систем ленточных микрофонов с применением электрического моделирования и

электронно-цифровых вычислительных машин. Предлагаемая методика электрического моделирования, алгоритм и программа расчета на ЭЦВМ, а также методика оптимизации могут быть использованы при расчете других магнитных систем.

В первой главе дается критический обзор существующих аналитических методов расчета систем с постоянными магнитами. В ней подробно рассматриваются два классических метода расчета, которые нашли широкое применение в инженерной практике.

Первый из них, известный под названием метода Пику, заключается в том, что магнит с распределенными по всей длине потоками рассеяния заменяется однороднополяризованным эквивалентным магнитом, имеющим одинаковый с первым потоком в нейтральной зоне (потоки рассеяния условно перенесены на полюсные наконечники системы). Этот метод имеет следующие недостатки:

1. Магнитная система характеризуется одной рабочей точкой на кривой размагничивания $B(H)$, хотя в действительности из-за потоков рассеяния рабочие точки могут занимать довольно широкую зону.

2. Метод дает возможность определить значение индукции в нейтральной зоне и рабочем зазоре магнитной системы; индукция в различных сечениях магнита и закон распределения потенциалов по его длине остаются неизвестными.

3. Точность метода зависит от многих факторов: правильной оценки конфигурации трубок потоков рассеяния, погрешностей приближенных формул геометрической проводимости трубок, правильности вычисления коэффициентов приведения проводимос-

тей к полной разности потенциалов.

Второй метод расчета - метод Эвершеда позволяет находить распределение индукции по длине магнита, т.е. его рабочую зону на кривой размагничивания. Точность этого метода зависит от точности существующих аналитических формул частичных проводимостей магнитной системы и от дискретности разбиения ее на элементарные участки.

В главе приведены основные электроакустические параметры и эквивалентные схемы ленточных микрофонов; подробно описывается аналитический расчет магнитной системы вышеуказанными методами.

Для определения точных значений частичных проводимостей ленточного микрофона предлагается использовать электрическое моделирование, которое основано на аналогии уравнений для статического магнитного поля и электрического поля стационарных токов, которые, как известно, описываются уравнением Лапласа.

При выполнении критериев подобия распределение потенциалов на границах внешней области и системы, а также картина поля совпадают в оригинале и модели. Таким образом, задача расчета магнитного поля в двухсвязном пространстве с нелинейной средой во внутренней области сводится к исследованию поля в односвязной линейной электропроводной области, на границе которой задаются соответствующие граничные условия. Вся трудоемкость заключается в нахождении и задании граничных условий для внешней области, которые определяются состоянием магнитной среды внутренней области, т.е. постоянного магнита.

Построение модели в этом случае производится следующим образом: магнит разбивается на участки, аналогично тому, как это делается в методе Эвершеда. При этом делают упрощающие допущения об однородности поля внутри каждого участка. На расчете поле электронинтегратора задаются внешние контуры магнита, разделенные на выбранное число участков. Потенциал внешней поверхности каждого участка принимается постоянным и задается от внешнего регулируемого источника напряжения.

Во второй главе изложены методика электрического моделирования магнитной системы ленточного микрофона в электролитической ванне, способы расчета косвенных результатов измерения на модели и сравнения их с данными измерения на реальной магнитной системе. В подготовительную работу для электрического моделирования входит выбор электролита, источника питания, материала и размеров модели.

Окружающая среда реальной магнитной системы, состоящая из воздуха с магнитной проницаемостью μ на модели была заменена электролитом из водопроводной питьевой воды с удельной электрической проводимостью γ .

Модель была изготовлена из оргстекла. В качестве электродов модели были использованы палладированные медные пластины или электропроводящие покрытия из смеси лака цапон с серебряным порошком.

Размеры модели определялись исходя из размеров электролитической ванны с таким расчетом, чтобы влияние стенок на картину поля модели было бы незначительным. При моделировании была использована объемная ванна с размерами $910 \times 710 \times 700$ мм.

Питание модели производилось от звукового генератора с усилителем мощности 50 вт через понижающие трансформаторы с разделенными вторичными обмотками.

С целью уменьшения поляризации электролита, частота питающего модель напряжения была повышена до 125 гц, т.е. находилась в оптимальном диапазоне 100-500 гц. Регулировка напряжения производилась потенциометрами с дискретностью $3 \cdot 10^{-2}$. Внутренняя область системы разбивалась на элементарные объемы, границы которых совпадают с направлениями магнитной анизотропии (рис. 1а). Степень дискретизации внутренней области зависит от топографии магнитного поля в ней. Чем больше коэффициент рассеяния, тем реже изменяется магнитное состояние областей вдоль оси системы и тем мельче должен быть шаг разбиения. Как показывает предварительный расчет моделируемой магнитной системы, потоки рассеяния с боковых поверхностей отдельных участков не превышают 6% от рабочего потока, если магнит разбит на 7-8 участков. Каждый участок магнита был замещен одним активным нелинейным элементом. Поперечные сопротивления $Z_{n1}, Z_{n2}, \dots, Z_{nn}$ характеризуют свойства материала, подвергающейся первоначальному намагничиванию от собственного поля магнита.

Полюсные наконечники и фланец разбиваются на участки, число которых определяется интенсивностью изменения индукции в них из-за потоков рассеяния.

Результаты предварительного анализа показывают, что в системах ленточного микрофона поперечные сопротивления магнитов малы в сравнении с сопротивлениями рассеяния между соответствующими участками магнитов (т.е. $Z_{n1} \ll Z_{is}$),

а материалы полюсных наконечников находятся далеко от насыщения. Поэтому при моделировании мы пренебрегли поперечными сопротивлениями магнитов и сопротивлениями полюсных наконечников и фланца (рис. 1б). Поверхности полюсных наконечников и фланца модели системы принимались эквипотенциальными и были покрыты электропроводящим слоем. С целью определения частных проводимостей рабочего зазора и полюсных наконечников, поверхности последних были разделены на три изолированные зоны. В электрической модели постоянный магнит должен замещаться нелинейными активными двухполюсниками, характеристики которых подобны кривым размагничивания соответствующих участков магнита. Однако, создание активных двухполюсников переменного тока с нелинейными характеристиками по действующим значениям, что необходимо по условиям измерений на электролитической ванне, представляется весьма сложной задачей. Значительно более рациональным оказался путь итерационного решения с помощью регулируемых источников э.д.с., аналогичный известному численному методу простых итераций. При нулевом приближении устанавливается линейное распределение потенциалов на поверхности модели магнита. Затем поочередно регулируются напряжения на электродах модели так, чтобы рабочая точка каждого участка лежала на своей вольтамперной характеристике $I(U)$. После нескольких (четырёх-пяти) циклов последовательных приближений рабочие точки всех участков с достаточной точностью размещаются на вольтамперных характеристиках и процесс моделирования заканчивается. Контроль положения рабочих точек осуществляется по их координатам U_i и I_i , которые измерялись на одноомных измерительных сопротивлениях с помощью лампового милливольтметра ВЗ-2А.

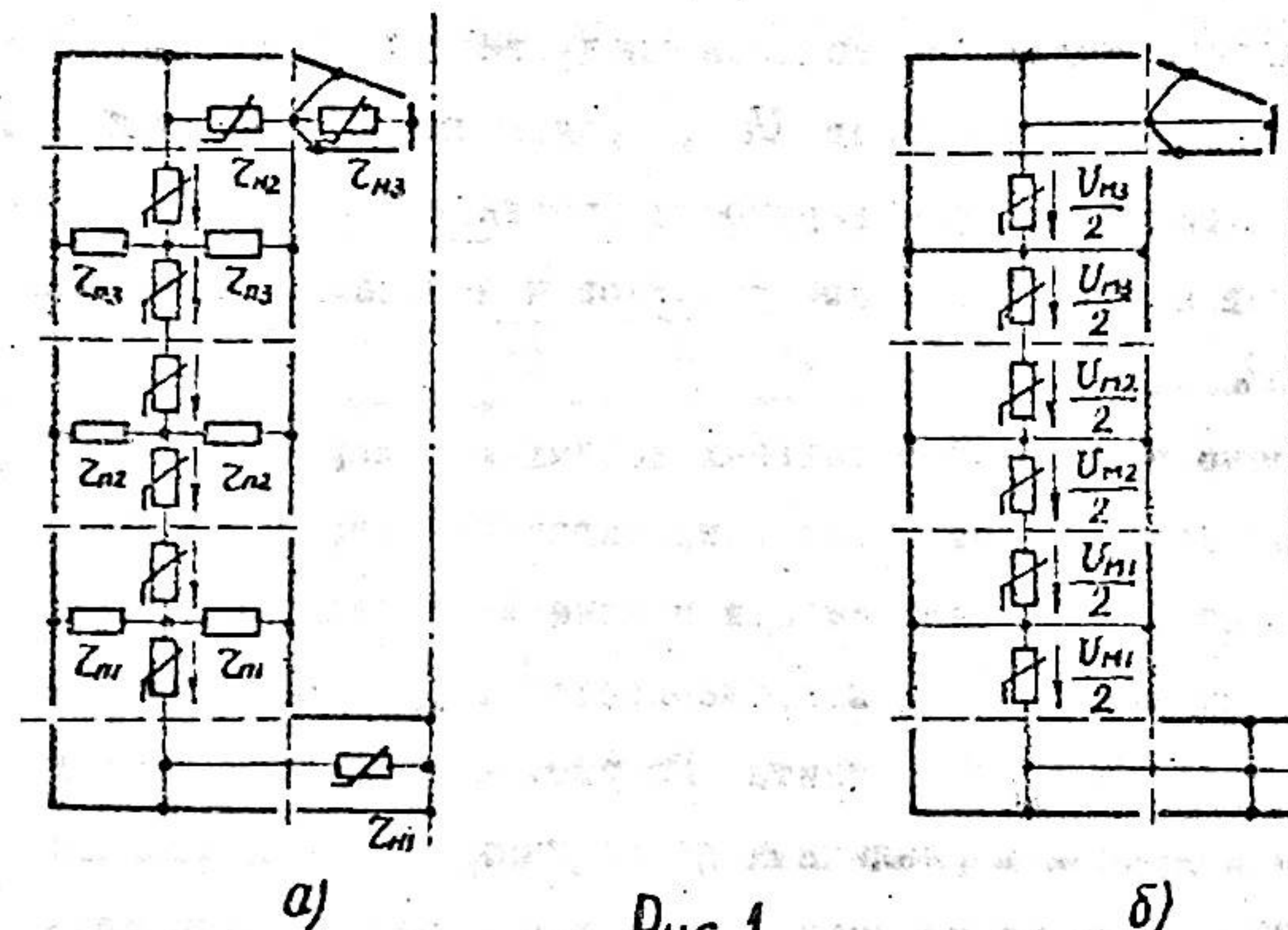


Рис. 1

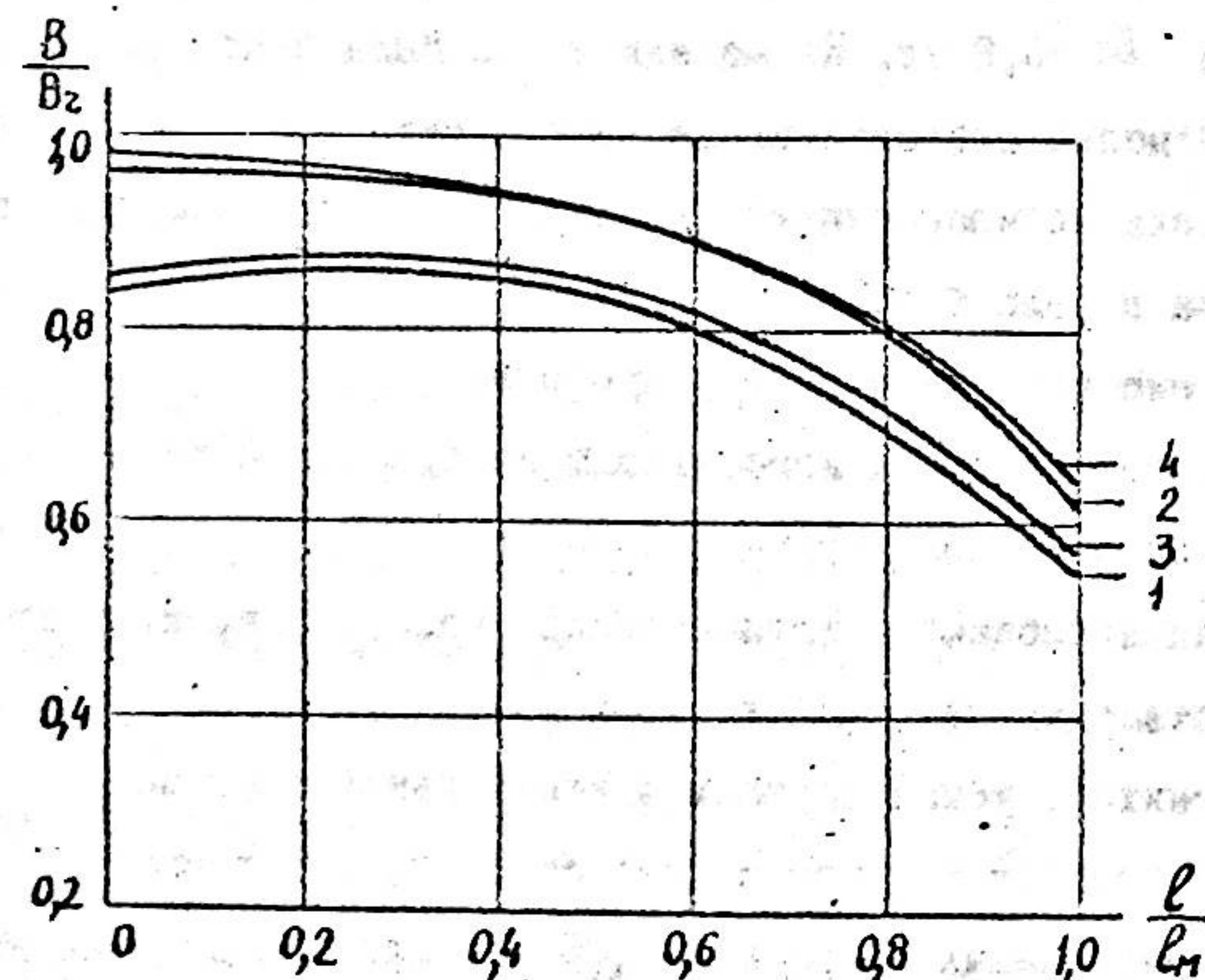


Рис. 2. 1-реальная система; 2-моделирование; 3,4 - расчет на ЭЦВМ с учетом и без учета насыщения фланца и полюсных наконечников

После установления нужного распределения потенциалов на поверхности модели измерялись следующие электрические величины: напряжения участков U_i , продольные токи участков I_i ; токи рассеяния с поверхности участков I_{si} ; разности потенциалов между серединами участков и нейтралью магнитной системы U_{oi} .

На основе экспериментальных данных моделирования были рассчитаны коэффициенты рассеяния магнитной системы и ее участков, построены зависимости изменения потенциалов на поверхности магнита U_m и напряженностей внутри магнита H_m в зависимости от длины магнита. На рис. 2 изображен график изменения индукции в различных поперечных сечениях магнита (кривая 2). Величина индукции в рабочем зазоре модели составляла $B_s = 0,8$ тл. На модели также была снята топография поля. С целью проверки правильности методики электрического моделирования и оценки уровня случайных погрешностей измерения на модели была выбрана как контрольная реальная магнитная система ленточного микрофона.

Магниты системы изготовлены из сплава МНДК-24, полюсные наконечники из пермендюра, а фланец из стали типа Э. Учитывая возможный технологический разброс характеристик магнитотвердых материалов, были сняты кривые размагничивания магнитов, установленных в контрольной системе.

Индукция в рабочем зазоре системы, измеренная датчиком Холла, оказалась равной 0,75 тл. Для определения кривой распределения потока по длине магнита использовалась измерительная катушка с числом витков $W = 10$ и высотой $h_k = 0,25$ см, которая включалась на милливеберметр.

Результаты измерений приведены в таблице I и на рис. 2 (кривая 1).

Таблица I

	Расстояние до фланца, см							
	0	0,25	1,0	2,0	3,0	3,5	3,75	4,0
$\Phi, 10^{-4}$ вб	3,4	3,43	3,54	3,33	2,72	2,42	2,26	2,09
$S_m, \text{см}^2$	3,42	3,37	3,32	3,25	3,18	3,16	3,15	3,14
$B, \text{тл}$	0,99	1,02	1,065	1,025	0,857	0,768	0,715	0,67

Используя величины потоков в начальных и конечных сечениях магнита, рассчитывалась индукция в поперечных сечениях полюсных наконечников и фланца.

Наибольшая индукция в поперечном сечении полюсного наконечника $B_n = 1,65$ тл. Учитывая рассеивание потока с поверхности полюсного наконечника, можно утверждать, что индукция во всех остальных поперечных сечениях наконечника меньше 1,65 тл. Полюсные наконечники изготовлены из пермендюра, для которого индукция насыщения равна 2,4 тл. Таким образом, материал не насыщен, сопротивлением наконечников можно пренебречь и их можно моделировать как эквипотенциальные участки.

Индукция в поперечном сечении фланца $B_{\phi} = 2,16$ тл. Полученное значение B_{ϕ} указывает на значительное насыщение фланца, который изготовлен из стали типа Э.

Насыщение фланца и связанное с этим заметное падение напряжения на нем явилось причиной изменения направления

потоков рассеяния и перемещения максимума рабочего потока (см. рис.2).

Магнитная система с насыщенным фланцем не оправдана в инженерном отношении. Поэтому к фланцу была привинчена дополнительная стальная накладка толщиной 0,6 см и поперечное сечение его увеличилось в 2,5 раза, чем было устранено насыщение. После намагничивания магнитной системы вместе с накладкой индукция в рабочем зазоре повысилась до 0,81 тл против ее прежнего значения 0,75 тл. Это значение индукции рабочего зазора хорошо совпадает со значением индукции в рабочем зазоре электрической модели системы $B\delta = 0,8$ тл, что подтверждает правильность предлагаемой методики моделирования.

Исследование серии электрических моделей позволило построить кривые зависимости частичных проводимостей при различных соотношениях геометрических размеров, проверить и уточнить известные по литературе формулы проводимостей, которые необходимы для расчета систем ленточных микрофонов.

При неизменном воздушном зазоре и взаиморасположении полюсных наконечников основными геометрическими параметрами магнитной системы ленточного микрофона, определяющими ее магнитное состояние, является длина магнита l_m , площадь поперечного сечения магнита S_m и расстояние между магнитами A_m . С целью выяснения влияния каждого из этих параметров на магнитное состояние системы и на величины ее частичных проводимостей был проведен ряд экспериментов. Суммарная проводимость магнитной системы g_x рассматривалась, как состоящая из следующих частичных проводимостей: рабочего за-

зора g_δ , рассеяния между полюсными наконечниками g_{ms} и параллельными магнитными стержнями g_{ms} .

Исследовалось влияние изменения площади поперечного сечения магнитов на магнитное состояние системы. Минимальная площадь сечения магнитов задается положением рабочего участка на горизонтальной части спинки петли гистерезиса, дальнейшее снижение величины S_m не имеет практического смысла, т.к. это приводит к ухудшению использования энергии, запасенной в магнитах. Как показывает практика расчета микрофонов, верхний предел рабочего диапазона индукции в воздушном зазоре равен 1 тл. Поэтому, этим параметром задается наибольшая площадь сечения. На основе моделирования были построены кривые зависимостей индукции рабочего зазора от площади сечения магнита $B\delta(S_m)$ и удельных проводимостей рассеяния между магнитами от длины магнита $g_{\delta\delta}(l_m)$ для различных значений S_m .

Исследование влияния расстояния между магнитами A_m на состояние магнитной системы при различных величинах длины и площади сечения магнитов проводилось для следующих значений $A_m = 0,8; 1,6; 2,0; 2,4$ см. Расстояние меньше 0,8 см не бралось, т.к. это приводит к нежелательному увеличению потока рассеяния между магнитами.

По результатам моделирования построены кривые зависимостей удельных проводимостей между магнитами $g_{\delta\delta}(l_m)$ для различных расстояний между ними. Следует отметить, что с увеличением A_m проводимость рассеяния между магнитами g_{ms} уменьшается, а проводимость рассеяния между полюсными наконечниками g_{ms} увеличивается в связи с их удлинением.

Магнитная система работает в наиболее рациональном режиме, когда общая проводимость рассеяния системы оказывается наименьшей.

Для исследования влияния длины магнитов ℓ_m на состояние магнитной системы было произведено моделирование при различной величине $\ell_m = 2; 4; 6$ см. По данным моделирования получены кривые зависимости удельной проводимости между магнитами от их длины $g_{\mu}(\ell_m)$ и индукции рабочего зазора от длины магнитов $B_{\delta}(\ell_m)$. Выведена уточненная формула удельной проводимости между параллельными магнитами прямоугольного сечения, учитывающая реальную картину поля магнитной системы

$$g_{\mu} = \frac{b}{a_n} + \sqrt{2(1 + \frac{c}{a_n})} + 3,2(\frac{\ell}{\ell_m} - 0,5) \quad (I)$$

где b и c — ширина и толщина постоянных магнитов

Введен дополнительный коэффициент в формулы проводимостей между поверхностями полюсных наконечников, лежащими в одной плоскости.

Данные моделирования показывают, что проводимость рабочего зазора системы следует определять как среднее арифметическое между двумя предельными значениями, полученными по формулам Кремпа и Кольдервуд, что снижает погрешность до 1,2%.

Приведенные в диссертации кривые и формулы позволяют определить все элементы цепной схемы замещения магнитной системы микрофона по заданным геометрическим размерам и известной кривой размагничивания материала. Расчет схем

замещения для ряда конструктивных модификаций системы позволяет найти оптимальный вариант.

В третьей главе рассмотрено применение ЭЦВМ для расчета схем замещения магнитных систем ленточных микрофонов. Полная схема замещения включает сетку внутренней области системы, к узлам которой присоединены сосредоточенные сопротивления, замещающие потоки рассеяния. Число уравнений для такой системы оказывается сравнительно небольшим, т.к. оно определяется только степенью дискретизации внутреннего объема. Учет внешнего пространства увеличивает количество уравнений лишь на число, равное числу участков разбиения магнитной системы вдоль оси.

Расчет ведется в двух вариантах: в первом варианте полюсные наконечники и фланец магнитной системы принимаются ненасыщенными и, поэтому, их сопротивления магнитному потоку и падения напряжений в них равны нулю. Во втором варианте расчет ведется с учетом насыщения полюсных наконечников и фланца. Основной целью задачи является создание методики и программы расчета на ЭЦВМ.

На рис. 3а изображена эквивалентная схема замещения одной половины магнитной системы микрофона, в которой отсутствует насыщение фланца и полюсных наконечников. Для упрощения схемы сопротивления рассеяния между симметричными участками магнитов приведены к концам участков.

Если принять линейным распределение потенциала на каждом участке, то коэффициент приведения равен

$$K_{pi} = \frac{\varphi_{i-1} + \varphi_i}{2\varphi_i} = \frac{2i-1}{2i} \quad (2)$$

итерационную формулу Ньютона получаем полином вида

$$H_i(B_i) = m_0 + m_1 B_i + m_2 B_i^2 + \dots \quad (5)$$

Система уравнений (4) преобразуется

$$\left. \begin{aligned} -B_1 + B_2 + \frac{\ell_1}{z_{1s} S_1} (m_0 + m_1 B_1 + m_2 B_1^2 + \dots) &= 0 \\ \frac{z_{1s}}{z_{1s} + z_{2s}} B_1 - B_2 + \frac{z_{2s}}{z_{1s} + z_{2s}} B_3 + \frac{\ell_2}{(z_{1s} + z_{2s}) S_2} (m_0 + m_1 B_2 + m_2 B_2^2 + \dots) &= 0 \\ \dots &\dots \\ \frac{z_{n-1s}}{z_{n-1s} + z_{ns}} B_{n-1} - B_n + \frac{\ell_n}{(z_{n-1s} + z_{ns}) S_n} (m_0 + m_1 B_n + m_2 B_n^2 + \dots) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Система нелинейных уравнений (6) должна решаться численными методами. Как показал предварительный расчет, значение коэффициентов рассматриваемой системы таково, что не обеспечивается сходимость простого итерационного метода решения.

Применение метода Ньютона позволило создать устойчивый и удобный алгоритм расчета. Представим систему (4) в виде

$$\left. \begin{aligned} f_1(B_1, B_2, \dots, B_n) &= 0 \\ f_2(B_1, B_2, \dots, B_n) &= 0 \\ \dots &\dots \\ f_n(B_1, B_2, \dots, B_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

или в матричном виде

$$\|f(B)\| = 0 \quad (8)$$

Точный корень уравнения

$$B = B^{(n)} + \beta^{(n)} \quad (9)$$

где $\|\beta^{(n)}\| = (\beta_1^{(n)}, \beta_2^{(n)}, \dots, \beta_n^{(n)})$ - поправка (погрешность корня);

$B^{(n)}$ - корень "n"-го приближения

Подставляя выражение (9) в уравнение (8), получим

$$\|f(B^{(n)} + \beta^{(n)})\| = 0 \quad (10)$$

Предполагая, что функция $f(B)$ непрерывно дифференцируема в области, содержащей B и $B^{(n)}$, разложим левую часть уравнения (10) по степеням малого вектора $\beta^{(n)}$, ограничиваясь линейными членами

$$f(B^{(n)} + \beta^{(n)}) = f(B^{(n)}) + f'(B^{(n)}) \beta^{(n)} = 0 \quad (11)$$

Под производной $f'(B)$ следует понимать матрицу Якоби системы функций $f_1, f_2, \dots, f_n$ относительно переменных $B_1, B_2, \dots, B_n$

$$f'(B) = W(B) = \left[\frac{\partial f_i}{\partial B_j} \right]; \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

Применяя метод Ньютона к исходной системе нелинейных уравнений (6), получим систему линейных уравнений для поправок β_i в общем виде

$$\begin{aligned} -a_i \beta_{i-1} + (1 - c_i H_i'(B_i)) \beta_i - b_i \beta_{i+1} &= \\ &= a_i B_{i-1} - b_i + b_i B_{i+1} + c_i H_i(B_i) \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{z_{i-1s}}{z_{i-1s} + z_{is}} \quad (i = 2, 3, \dots, n) (a_1 = 0) \\ b_i &= \frac{z_{is}}{z_{i-1s} + z_{is}} \quad (i = 2, 3, \dots, n-1) (b_1 = 1; b_n = 0) \\ c_i &= \frac{\ell_i}{(z_{i-1s} + z_{is}) S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Каждое новое значение $B^{(n)}$ определяется прибавлением к предыдущему значению $B^{(n-1)}$ поправки $\beta^{(n)}$, найденной из системы (13). Процесс последовательных приближений повторяется до тех пор, пока относительные поправки $\left(\frac{\beta^{(n)}}{B^{(n)}}\right)$ не станут меньше наперед заданной величины ε .

В диссертации даны рабочая программа решения задачи на ЭЦВМ "Минск-22" и инструкция по ее использованию. Программа составлялась на алгоритмическом языке АКИ.

С целью исследования скорости сходимости итерационного процесса решения уравнений для систем с постоянными магнитами, был произведен поверочный расчет контрольной магнитной системы микрофона с известными геометрическими размерами и материалом постоянных магнитов. Расчет был произведен для системы с постоянными магнитами из двух магнитных материалов: МДК-24 и МДК-25БА. Кривая размагничивания сплава МДК-24 с достаточной точностью аппроксимируется полиномом 4-й степени, а сплава МДК-25БА полиномом 5-й степени.

На основе решения на ЭЦВМ были определены значения индукций в рабочем зазоре и различных поперечных сечениях магнита.

На рис. 2 построена кривая 4 распределения индукции в поперечных сечениях магнита, которая хорошо совпадает с кривой 2, полученной по данным электрического моделирования.

Сходимость процесса последовательных приближений обеспечивается для начальных значений индукций, соответствующих любым точкам кривой размагничивания материала $B(H)$.

Однако, при начальных значениях индукции, равных остаточной индукции $B_i^{(0)} = B_z$ или индукции в точке максимальной энергии $B_i^{(0)} = B_d$, обеспечивается наилучшая сходимость - 4+5 итераций.

При расчете магнит разбивался на 4, 8 и 16 участков. Число разбиений магнита на участки практически не влияет на скорость сходимости последовательных приближений. Скорость сходимости итерационного процесса несколько зависит от порядка системы уравнений; с увеличением степени полинома $H(B)$ от четырех до пяти, число итераций увеличилось с 5 до 7.

Предлагаемая методика расчета позволяет с помощью ЭЦВМ исследовать изменение магнитного состояния системы вследствие технологического разброса магнитных характеристик постоянных магнитов.

При уточненных расчетах систем с постоянными магнитами может возникнуть необходимость учета насыщения магнитомягких участков цепи. В главе рассматриваются особенности расчета магнитной системы микрофона с учетом насыщения фланца и полюсных наконечников. С этой целью фланец и полюсные наконечники были разбиты на элементарные участки и их магнитные сопротивления Z_{m1} , Z_{m2} , Z_{m3} включены в расчетную схему замещения (рис. 3б).

В качестве материала полюсных наконечников и фланца была выбрана магнито-мягкая сталь типа 9.

Основная кривая намагничивания стали с достаточной точностью аппроксимируется полиномом четвертой степени. На основе применения методов контурных токов и Ньютона был получен алгоритм, аналогичный выражению (13).

В работе приведена программа решения задачи, составленная на алгоритмическом языке АКИ.

В качестве примера приведен числовой расчет рассмотренной ранее магнитной системы микрофона, в которой по данным измерения имеет место насыщение стали фланца. По результатам расчета индукция внутри фланца равна $B_{\text{фл}} = 2,03$ тл, что хорошо совпадает со значением индукции $B_{\text{фл}} = 2,16$ тл, полученным в результате обмера реальной магнитной системы. Индукция в полюсных наконечниках были соответственно равны $B_{\text{н1}} = 1,57$ тл и $B_{\text{н2}} = 1,53$ тл.

На рис. 2 построен график изменения индукции в магнитах (кривая 3). Характер изменения индукции в поперечных сечениях магнита получен такой же, как в реальной магнитной системе: в обоих случаях имеет место перемещение нейтралей вверх по длине магнита.

Расчетное значение индукции в рабочем зазоре магнитной системы из-за насыщения фланца уменьшилась до 0,79 тл против 0,832 тл без учета насыщения, т.е. на 5,2%.

Предлагаемая методика расчета с учетом насыщения позволяет определить распределение поля внутри магнита, фланца и полюсного наконечника, выявить такие участки магнитопровода, где имеет место насыщение стали. Изменением геометрических размеров отдельных участков магнитопровода можно устранить нежелательное явление насыщения стали и повторением расчета проверить это.

С целью определения падения напряжений в стыках между отдельными частями магнитной системы микрофона, сопротивление этих стыков, как пассивные линейные элементы могут быть

включены в соответствующих местах в продольную цепочку эквивалентной схемы замещения системы.

Четвертая глава посвящена проектированию оптимальных магнитных систем ленточных микрофонов. Практика применения постоянных магнитов показывает, что основную часть себестоимости систем с постоянными магнитами составляет стоимость магнитов, изготавливаемых из дефицитных и дорогостоящих материалов. Уменьшение веса и габаритных размеров магнита имеет большое экономическое значение.

Объем постоянного магнита в системе приближенно определяется выражением

$$V_{\text{м}} = \frac{B_{\text{д}}^2 V_{\text{з}}}{2 W_{\text{д}}} \quad (15)$$

где $B_{\text{д}}$ - магнитная индукция поля в рабочем зазоре;
 $V_{\text{з}}$ - объем рабочего зазора;
 $W_{\text{д}}$ - удельная полезная магнитная энергия, отнесенная к единице объема магнита.

$$W_{\text{д}} = \frac{B H}{2 G} \quad (16)$$

где G - коэффициент рассеяния магнитной системы;
 B и H - индукция и напряженность поля в нейтральном сечении магнита.

Из выражений (15) и (16) вытекает, что для получения минимума объема магнита необходимо добиваться максимума удельной полезной магнитной энергии; наибольшей отдачи энергии магнитом во внешний рабочий объем системы и выбор такой конфигурации и соотношения размеров магнитной системы, при которых обеспечивается минимальное рассеяние. Од-

нако, магнит работает с максимальной отдачей энергии в том случае, если рабочие точки всех участков внутри магнита совпадают с точкой максимальной энергии на кривой размагничивания материала. Это требование выполняется при постоянстве индукции во всех поперечных сечениях магнита. По длине магнита распределены потоки рассеяния и сечение магнита должно уменьшаться по мере удаления от нейтральной зоны, пропорционально этим потокам.

Обычно при проектировании систем с постоянными магнитами заранее задаются геометрическими размерами рабочего зазора и величиной индукции в нем. После выбора формы и материала магнита, задача сводится к конструктивному расчету его оптимальных размеров, удовлетворяющих поставленным требованиям.

Во всех существующих методах проектирования систем с постоянными магнитами частичные проводимости этих систем определяются аналитическими формулами, которые составлены на основе больших упрощений, и имеют порою низкую точность. С целью повышения точности расчета предлагается методика проектирования оптимальных систем с постоянными магнитами с применением электрического моделирования, которая ведется в следующей последовательности:

1. Ориентировочный расчет магнитной системы микрофона с прямолинейными магнитами и определение ее частичных проводимостей по рекомендуемым в главе II формулам.

2. Расчет геометрических размеров оптимальной системы с переменным сечением магнитов по полной схеме замещения.

3. Поверочный расчет полученной магнитной системы с помощью электрического моделирования, сравнение значений индукции в сечениях магнита и рабочем зазоре с их заданными значениями. В случае недопустимого расхождения, на модели определяются частичные проводимости системы и производится повторный аналитический расчет ее на оптимум.

В диссертации дается пример расчета оптимальной магнитной системы микрофона. Профиль постоянных магнитов спроектирован так, что ширина остается постоянной и равной ширине полюсного наконечника; толщина магнитов изменяется в соответствии с площадью сечения магнитов, обеспечивая постоянство положения рабочих точек на кривой размагничивания $B(H)$ (координаты точек соответствуют максимальной энергии). Спроектированная магнитная система микрофона дает около 50% экономии магнитотвердого материала. Ее габаритные размеры значительно меньше, чем у аналогичной системы, выпускаемой промышленностью, что способствует повышению качества звукопреобразования в микрофоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Существующие аналитические методы расчета систем с постоянными магнитами имеют существенные недостатки. В методе Пику магнит любой конфигурации рассматривается как однороднополяризованная область. Метод ступенчатого интегрирования Эвершеда опирается в значительной мере на интуицию расчетчика и результаты первого приближения не могут непосредственно использоваться для последующего приближения. Поэтому процесс последовательных приближений метода

Эвершеда не может быть автоматизирован на цифровой вычислительной машине.

2. Существующие формулы магнитных проводимостей, основанные на разбиении поля магнитной системы сложной конфигурации на трубки потока и замене их простыми геометрическими фигурами приводят во многих случаях к большим погрешностям. Поэтому аналитические методы расчета, в которых используются эти формулы, характеризуются низкой точностью.

3. Электрическое моделирование позволяет с высокой точностью определить истинные значения частичных проводимостей рассеяния магнитной системы сложной конфигурации, так как в проводящей среде электролита образуется поле токов, аналогичное исследуемому полю магнитной системы. На моделях легко исследовать влияние отдельных геометрических параметров магнитной системы на потокораспределения и напряженность поля в рабочем зазоре и внутри магнитов.

4. В результате моделирования ряда систем ленточного микрофона получены кривые распределения индукции по длине магнита, зависимость напряжения на рабочем зазоре, частичных проводимостей рассеяния от длины, площади сечения магнитов и расстояния между ними. Рекомендованы формулы, позволяющие с достаточной точностью определить проводимости рассеяния магнитов и полюсных наконечников.

5. По данным моделирования могут быть найдены параметры эквивалентной схемы замещения магнитной системы ленточного микрофона с нелинейными активными и пассивными элементами. Схема замещения описывается системой нелинейных уравнений, количество которых определяется числом участков, на ко-

торое разбита система.

6. Предложенная аппроксимация характеристик $B(H)$ в виде степенного полинома, позволила решить эту систему уравнений на ЭЦВМ по методу Ньютона.

Исследование скорости сходимости процесса Ньютона на примере расчета системы ленточного микрофона показало, что сходимость обеспечивается при любых нулевых значениях индукции. Однако, при нулевых приближениях индукции, равных остаточной индукции обеспечивается наилучшая сходимость (4-5 итераций). Увеличение числа участков разбиения магнитной цепи незначительно отражается на длительности расчета.

7. С помощью ЭЦВМ легко исследовать влияние типа магнитного материала, насыщения полюсных наконечников и фланца, сопротивления стыков между элементами системы на величину напряженности поля в рабочем зазоре.

8. Совместное применение электрического моделирования и аналитического метода расчета дает возможность после 2-3 циклов получить оптимальную магнитную систему с минимальным объемом магнитного материала и с заданными выходными параметрами.

Опыт оптимального проектирования магнитной системы ленточного микрофона показал, что при предлагаемом методе достигается экономия дефицитного магнитнотвердого материала до 50%. Соответствующее уменьшение габаритных размеров системы улучшает электроакустические характеристики микрофона.

Отдельные части диссертации доложены на следующих конференциях:

1. Научно-техническая конференция ИЭИ по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 годы, Москва, 1969.

2. Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов, Баку, 1969.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Коген-Далин В.В., Гусейнов Т.Ш., Ализаде П.Г. Методика и алгоритм расчета нелинейной магнитной системы (с постоянными магнитами) на ЭЦВМ. Известия ВУЗов, "Электромеханика", № 10, 1970.

2. Гусейнов Т.Ш., Коген-Далин В.В. Оптимальное проектирование систем с постоянными магнитами с применением электрического моделирования. "За технический прогресс", № 11, Баку, 1970.

3. Коген-Далин В.В., Шатуновский В.В., Гусейнов Т.Ш., Глебов В.А. Совместное применение АВМ и ЦВМ при проектировании систем с постоянными магнитами. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 г.г., секция электромеханическая, подсекция проблемной лаборатории по постоянным магнитам, Москва, 1969.

4. Ализаде П.Г., Гусейнов Т.Ш., Коген-Далин В.В. Методика и алгоритм расчета нелинейной системы с постоянными магнитами. "За технический прогресс", № 12, Баку, 1969.

5. Коген-Далин В.В., Гусейнов Т.Ш. Уточненный расчет магнитных систем электроакустики с помощью аналоговых и цифровых вычислительных систем. Сб. "Вопросы радиоэлектроники" ВНИИ им.Попова А.С., серия "Техника радиовещательного приема и акустики" (принята к печати).