

6  
А-43

А К А Д Е М И Я   Н А У К   С С С Р  
С и б и р с к о е   о т д е л е н и е  
Совет секции технических наук Объединенного ученого  
Совета по физико-математическим и техническим наукам

---

На правах рукописи

Б.М. Рогачевский

И С С Л Е Д О В А Н И Е   М Е Т О Д О В   П О В Ы Ш Е Н И Я   Ч У В С Т В И Т Е Л Ь Н О С Т И  
М А Г Н И Т О М О Д У Л Я Ц И О Н Н Ы Х   Д А Т Ч И К О В

Автореферат диссертации,  
представленной на соискание  
ученой степени кандидата те-  
хнических наук

Новосибирск  
1968



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
Сибирское отделение  
Совет секции технических наук Объединенного ученого  
Совета по физико-математическим и техническим наукам

---

г. Новосибирск, 90

" 4 " ~~сентября~~ <sup>ноября</sup> 1968 г.

№ 28 - I - 809 фт/2999

Совет секции технических наук Объединенного ученого совета по физико-математическим и техническим наукам Сибирского отделения Академии наук СССР направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации Б.М.Рогачевского "Исследование методов повышения чувствительности магнитомодуляционных датчиков", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Заверенный учреждением отзыв об автореферате диссертации просим направить в адрес Совета секции технических наук Объединенного ученого совета в 2-х экземплярах.

О дне и времени защиты будет объявлено за 10 дней до защиты в газете "Советская Сибирь".

Ученый секретарь  
Совета секции технических наук  
Объединенного ученого совета,

доктор технических наук -

Н.А.Желтухин



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
Сибирское отделение  
Совет секции технических наук Объединенного ученого  
Совета по физико-математическим и техническим наукам

---

На правах рукописи

Б.М. Рогачевский

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Автореферат диссертации,  
представленной на соискание  
ученой степени кандидата те-  
хнических наук

Новосибирск  
1968



В различных областях науки и техники: в геофизике, биологии, при изучении космического пространства, в дефектоскопии и т.д. измерение постоянных и переменных магнитных полей является одной из важнейших задач.

В ряде случаев существующие магнитометры не удовлетворяют возрастающим требованиям практики, особенно при измерении весьма слабых магнитных полей в диапазоне частот от нуля до десятков герц. Такое положение имеет место, в частности, при решении задач структурной геофизики, где возникает необходимость в повышении эффективности использования методов магнито-теллурического зондирования и профилирования. Эти методы с успехом применяются в диапазоне частот магнитных полей от нуля до долей герца и выше  $20 \div 30$  гц. Однако измерение переменных магнитных полей  $10^{-5} \div 10^{-7}$  а/м с частотой от долей герца до  $20 \div 30$  гц встречает значительные трудности в связи с отсутствием для практического применения датчиков магнитного поля, обладающих требуемым порогом чувствительности. В то же время измерение и исследование указанных переменных магнитных полей представляет для геофизики большой интерес. Поэтому вопрос о разработке новых и совершенствовании известных принципов построения датчиков магнитного поля приобретает важное значение.

Из всего многообразия принципов построения магнитоприемников к наиболее перспективным для решения подобных задач можно отнести: приемники, основанные на принципе оптической накачки, приемники, использующие эффект сверхпроводимости, а также магнитомодуляционные датчики (ММД) типа второй гармоники (феррозонды). По имеющимся в литературе сведениям ожидаемый порог чувствительности приемников магнитного поля, основанных на эффекте сверхпроводимости и оптической накачки, оценивается значением порядка  $10^{-6}$  а/м, а магнитомодуляционных: при измерении постоянных магнитных полей, значением  $10^{-5}$  а/м, при измерении магнитных полей фиксированной низкой частоты -  $10^{-6}$  а/м.



Несмотря на несколько большее значение порога чувствительности магнитомодуляционных датчиков при измерении постоянных магнитных полей, они обладают рядом существенных преимуществ перед другими типами магнитоприемников.

Из наиболее важных положительных качеств ММД необходимо отметить следующие. 1. Высокая чувствительность и независимость её от частоты измеряемого поля в инфранизкочастотном диапазоне. 2. Большая надежность, весьма малые размеры и малая потребляемая мощность. 3. Возможность измерения составляющих магнитного поля по заданным направлениям без использования дополнительных устройств для этой цели. Последнее свойство ММД часто позволяет уменьшить влияние мешающих внешних полей, не совпадающих по направлению с измеряемой составляющей магнитного поля.

Вследствие перечисленных достоинств магнитомодуляционные датчики в ряде случаев оказываются незаменимыми. Поэтому, наряду с исследованием приемников, основанных на эффекте сверхпроводимости и оптической накачки, возникает необходимость в поисках путей улучшений метрологических характеристик магнитомодуляционных датчиков.

К настоящему времени известен целый ряд как теоретических, так и экспериментальных работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных анализу процессов в магнитомодуляционных датчиках. Большой вклад в развитие теории магнитомодуляционных датчиков внесли советские исследователи, и прежде всего, М.Д. Агеев, Ю.В. Афанасьев, Б.И. Блажкевич, Р.Я. Беркман, Г.С. Горелик, С.Ш. Долгинов, В.И. Дрожжина, В.Н. Михайловский, Ю.Ф. Пономарев, М.А. Розенблат, Ю.И. Спектор, Л.Х. Фридман, Р.И. Янус и др. Их усилиями была создана общая теория магнитомодуляционных датчиков, разработаны конкретные устройства, позволяющие измерять слабые магнитные поля.

Из теории ММД следует, что применение больших амплитуд поля возбуждения приводит к уменьшению ряда помех, ограничивающих порог чувствительности ММД. Следовательно, использование ММД в режиме сильного перевозбуждения является важным резервом улучшения метрологических характеристик магнитометров. Однако перевозбуждение существенно снижает чувстви-

тельность ММД. В связи с этим представляет интерес исследование таких вопросов как: влияние чувствительности ММД в этом режиме на порог чувствительности магнитометра, анализ возможных методов повышения чувствительности ММД при больших амплитудах поля возбуждения и выяснение целесообразности использования этих методов при построении магнитометров. Подобные вопросы в известной нам литературе практически затронуты не были.

Цель реферируемой диссертации – анализ влияния чувствительности ММД на порог чувствительности магнитометров и исследование методов повышения чувствительности при больших амплитудах поля возбуждения.

В первой главе проведена систематизация основных помех, ограничивающих порог чувствительности ММД. Это позволило выделить методы, которые пригодны для уменьшения одновременно нескольких видов помех. Среди таких методов наибольшими возможностями обладает перевозбуждение (использование значительных амплитуд поля возбуждения). Известно было, что перевозбуждение снижает уровень магнитных шумов и уменьшает уход нуля ММД, обусловленный остаточной намагниченностью и квадратурной составляющей. В работе показано, что, кроме этого, применение перевозбуждения создает благоприятные условия для снижения других видов помех: остаточного напряжения нечетных гармоник и остаточного напряжения четных гармоник, вызванного наличием четных гармоник в цепи возбуждения генератора. Получено следующее выражение для остаточного напряжения четных гармоник, которое справедливо при больших перевозбуждениях и синусоидальном поле возбуждения

$$e_{2p}(t) = -\frac{d}{dt} \left\{ \frac{2}{\pi} \frac{i_{2p}(t)}{I_m} \left[ W_1 S_1 B_{S1} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left\{ 2n\omega t - \varphi_{2n} \left( \frac{H_{c1}}{H_{m1}} \right) \right\} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - W_2 S_2 B_{S2} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left\{ 2n\omega t - \varphi_{2n} \left( \frac{H_{c2}}{H_{m2}} \right) \right\} \right) \right] \right\} \quad (I)$$

где.  $i_{2p}(t)$  – ток четных гармоник в цепи возбуждения;  
 $I_m$  – амплитудное значение тока возбуждения;  
 $\omega$  – частота поля возбуждения;



$W_1, S_1, B_{S1}, H_{c1}, H_{m1}$  и  $W_2, S_2, B_{S2}, H_{c2}, H_{m2}$  — число витков измерительной обмотки, сечение, индукция насыщения и коэрцитивная сила сердечника, амплитуда поля возбуждения (соответственно для 1-го и 2-го полуэлементов ММД). Для больших перевозбуждений остаточное напряжение нечетных гармоник определяется соотношением

$$\Delta E_{2n-1}(t) \approx \frac{4}{\pi} \omega \sum_{n=1}^{\infty} \left[ W_1 S_1 B_{S1} \cos \left\{ (2n-1) \omega t - \varphi_{2n-1} \left( \frac{H_{c1}}{H_{m1}} \right) \right\} - W_2 S_2 B_{S2} \cos \left\{ (2n-1) \omega t - \varphi_{2n-1} \left( \frac{H_{c2}}{H_{m2}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

Из анализа этих выражений следует, что при значительных амплитудах поля возбуждения нет необходимости добиваться совпадения петель гистерезиса во всех точках — достаточно иметь сердечники с одинаковыми коэрцитивными силами, а затем изменением числа витков измерительной обмотки и обмотки возбуждения свести  $E_{2p}(t)$  и  $\Delta E_{2n-1}(t)$  к минимуму.

Однако с увеличением амплитуды поля возбуждения чувствительность ММД падает. Это является нежелательным, поскольку, как показано в первой главе, приводит к увеличению порога чувствительности. В работе получено выражение, которое устанавливает связь между чувствительностью и порогом чувствительности магнитометра  $H_n$

$$H_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} 4kT \Delta \omega \left( \frac{z}{G^2} + \frac{R_{шш}}{G^2} \right) + \frac{2}{\pi} \frac{1}{G^2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega + \frac{\sum U_n^2}{G^2}} \quad (3)$$

где  $G$  — чувствительность ММД;  
 $z$  — активное сопротивление измерительной обмотки;  
 $R_{шш}$  — эквивалентное шумовое сопротивление усилителя;  
 $S(\omega)$  — спектральная плотность магнитного шума в рабочей полосе частот  $\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$  ;  
 $\sum U_n^2$  — квадрат действующего значения всех известных помех, кроме магнитного и теплового шума;  
 $k$  — постоянная Больцмана;  
 $T$  — температура по Кельвину;  
 напряжение помех приведено ко входу усилительно-избирательного тракта магнитометра.

На основании анализа выражения (3) делается вывод о целесообразности повышения чувствительности ММД при больших амплитудах поля возбуждения. Увеличение чувствительности уменьшает влияние на порог чувствительности магнитометра помех усилительно-избирательного тракта: собственных шумов усилителя, напряжения второй гармоники, появляющейся вследствие нелинейности амплитудной характеристики усилителя и наличия напряжения небаланса и т.д. Кроме того, повышение чувствительности ММД улучшает порог чувствительности магнитометра из-за уменьшения влияния остаточной намагниченности сердечников, остаточного напряжения нечетных гармоник, наличия четных гармоник в цепи возбуждения генератора. Таким образом, увеличение чувствительности ММД при больших амплитудах поля возбуждения весьма полезно не только для увеличения коэффициента передачи всей системы, но и уменьшения порога чувствительности.

Во второй и третьей главах диссертационной работы исследуются методы повышения чувствительности ММД в режиме значительных амплитуд поля возбуждения.

Вторая глава посвящена анализу влияния различных форм кривой поля возбуждения на чувствительность ММД.

В настоящее время для возбуждения ММД наиболее широкое применение получила синусоидальная форма кривой тока. Однако на основании уже имеющихся сведений можно говорить о некоторых преимуществах в получении большей величины чувствительности при значительных полях возбуждения других режимов, например, режима заданного прямоугольного или синусоидального питающего напряжений. К сожалению, они пока не нашли широкого применения, т.к. отсутствует сравнение их между собой и режимом заданного синусоидального тока, не рассмотрен ряд особенностей, позволяющих выявить свойства таких режимов. В связи с этим во второй главе основное внимание уделяется сравнительному анализу различных форм кривой поля возбуждения для получения рекомендаций о целесообразности их использования.

В первом параграфе второй главы проводится исследование режима заданного напряжения при трех формах кривой питающего напряжения: синусоидальной, прямоугольной, вида  $U_m \sin^3 \omega t$  для сердечников с большим (кусочно-линейная аппроксимация) и



малым коэффициентом размагничивания  $N$  (арктангенсная аппроксимация). Получены расчетные соотношения и построены кривые зависимости относительной чувствительности ММД по второй гармонике  $\frac{G_2}{5\pi\omega\mu_{grm}}$  от величины  $\epsilon$  ( $G_2$  - чувствительность ММД по второй гармонике,  $\mu_{grm}$  - максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости тела,  $\epsilon = \frac{B_m}{B_s}$ ,  $B_m$  - величина, зависящая от амплитуды приложенного напряжения и характеризующая то значение индукции, которое было бы в сердечнике при отсутствии насыщения). На основании этих данных сделаны следующие выводы.

1. При кусочно-линейной аппроксимации, которая наиболее правильно отражает характер кривой  $B(H_c)$  у сердечников с большим коэффициентом размагничивания  $N$ , независимо от формы кривой питающего напряжения максимальное значение чувствительности имеет место при  $\epsilon = 2$  и равно предельно-возможному значению  $\frac{4}{\pi} 5\pi\omega\mu_{grm}$ . С увеличением  $\epsilon$  ( $\epsilon > 2$ ) чувствительность уменьшается, причем более резко для прямоугольной формы кривой питающего напряжения и наименее заметно для  $u(t) = U_m \sin^3 \omega t$ . Если  $\epsilon > 2$ , то наибольшую величину чувствительности при значительных амплитудах поля возбуждения имеет ММД, питаемый источником напряжения  $u(t) = U_m \sin^3 \omega t$ .

2. В случае арктангенсной аппроксимации (она более правильно отражает зависимость  $B(H_c)$  у сердечников с малым  $N$ ) относительная чувствительность по второй гармонике меньше, чем для кусочно-линейной аппроксимации, при той же амплитуде и форме кривой питающего напряжения. Величины  $\epsilon$ , соответствующие максимальной чувствительности, сдвинуты в сторону меньших значений. Если используется прямоугольное питающее напряжение, то максимальное значение чувствительности несколько выше, чем у других форм кривой (наименьшее её значение для  $U_m \sin^3 \omega t$ ). Однако с увеличением  $\epsilon$  чувствительность падает менее значительно в случае применения  $U_m \sin \omega t$  и  $U_m \sin^3 \omega t$ . Поскольку разница в величине чувствительности невелика в большом диапазоне изменения  $\epsilon$ , можно считать, что для сердечников с малым коэффициентом размагничивания ни одна из рассматриваемых форм кривой питающего напряжения не обладает существенным преимуществом перед другой формой в повышении чувствительности ММД.

Для установления зависимости чувствительности ММД от амплитуды тока возбуждения в режиме заданного напряжения решена задача по определению пикового значения тока возбуждения в предположении, что после насыщения сердечника сопротивления цепи возбуждения носит активно-индуктивный характер. Из полученного решения следует, что увеличение  $\epsilon$  и уменьшение активного  $R_c$  и индуктивного в насыщенном состоянии сердечника  $X_c$  сопротивлений цепи возбуждения является эффективным средством повышения пикового значения тока возбуждения. Последнее обосновывает целесообразность использования режима заданного питающего напряжения вместо режима заданного синусоидального тока возбуждения. Выбрав значение  $\epsilon$ , соответствующее, например, области максимальной чувствительности, уменьшением  $R_c$  и  $X_c$  оказывается возможным увеличить пиковое значение поля возбуждения, не изменяя чувствительности. При использовании синусоидального тока возбуждения такой возможности нет - с ростом амплитуды тока обязательно уменьшается чувствительность по второй гармонике.

Анализ дифференциального уравнения цепи возбуждения, проведенный при кусочно-линейном представлении петли гистерезиса показал, что с уменьшением длины сердечника ММД эффективность использования режима заданного напряжения возбуждения падает. Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. I (сплошные линии,  $G_2(U_m \sin \omega t)$ )

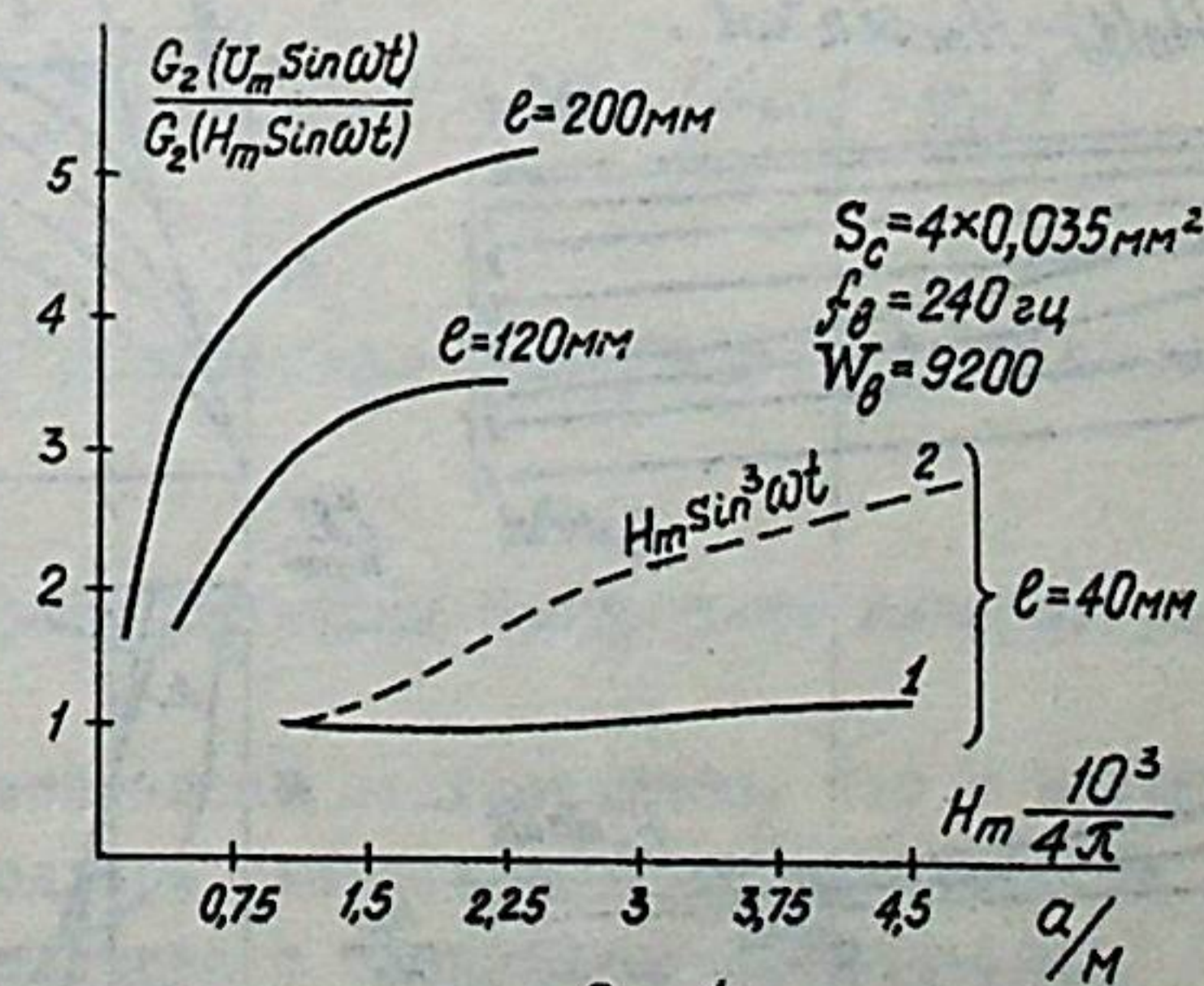


Рис. I  
II



чувствительность в режиме заданного синусоидального питающего напряжения,  $G_2(H_m \sin \omega t)$  - чувствительность в режиме заданного синусоидального поля возбуждения, материал сердечника 79НМА). Изменение сечения сердечника практически не влияет на возможность осуществления этого режима.

В работе исследуются возможности использования режима заданного тока, имеющего специальную форму, для повышения чувствительности ММД в том случае, когда применение режима заданного питающего напряжения неэффективно.

Во втором параграфе второй главы анализируется влияние на чувствительность ММД полей возбуждения, изменяющихся по закону  $H_B(t) = H_m \sin^{2n-1} \omega t$ , при пяти видах нелинейности средней кривой намагничивания. На рис. 2: 1 - кусочно-линейное представление кривой намагничивания, 2 -  $B = b \arctg \alpha H_B$ , 3 и 4 - соответствуют зависимостям  $\mu_{gr}(H_B)$ , изображенным на рис. 2в, 5 -  $B = b_1 \operatorname{th} \alpha H_B$ , 6 -  $B = b_2 \operatorname{th} \alpha_2 H_B$ . Результаты вычисления на ЭЦВМ относительной чувствительности по второй гармонике представлены на рис. 2а. Из рис. 2а видно, что независимо от характера нелинейности средней кривой намагничивания применение поля возбуждения вида  $H_m \sin^3 \omega t$  и  $H_m \sin^5 \omega t$  более предпочтительно, чем  $H_m \sin \omega t$ . Так, при арктангенсной аппроксимации и десятикратном перевозбуждении теоретически ожидаемый выигрыш в чувствительности по сравнению с  $H_m \sin \omega t$  - в 5 раз, если  $H_B(t) = H_m \sin^3 \omega t$  и в 7 раз, если  $H_B(t) = H_m \sin^5 \omega t$ .

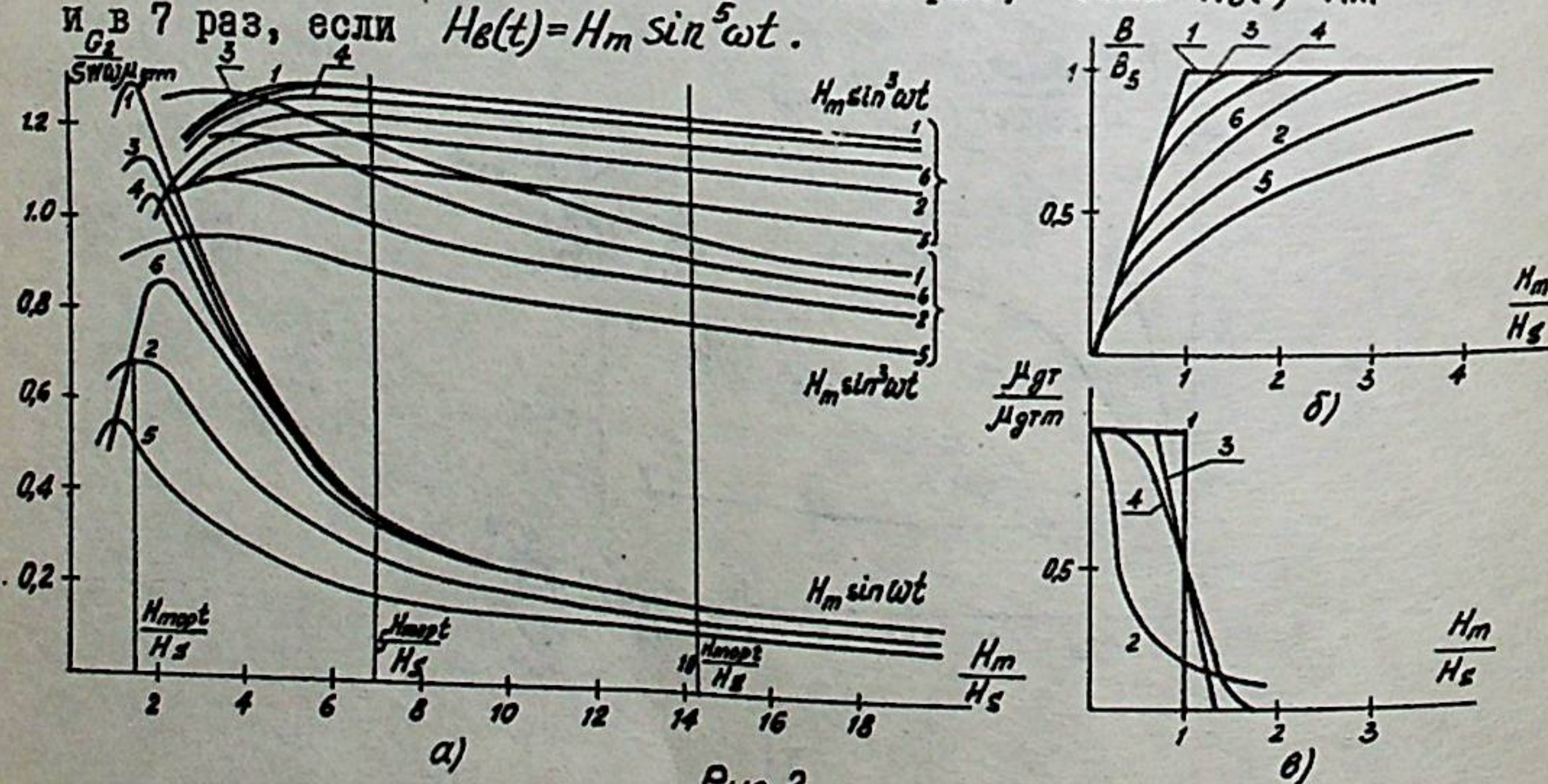


Рис. 2  
12

Максимальное значение чувствительности также увеличивается (чем более плавный характер имеет перегиб кривой намагничивания от прямолинейного участка к  $B_s$ , тем более значительно это увеличение при использовании  $H_m \sin^3 \omega t$  и  $H_m \sin^5 \omega t$  вместо  $H_m \sin \omega t$ ). Экспериментальные данные подтверждают полученные выводы и показывают, что при небольших длинах сердечника и значительных амплитудах поля возбуждения применение для возбуждения ММД поля, например, вида  $H_B(t) = H_m \sin^3 \omega t$  более предпочтительно, чем режима заданного синусоидального напряжения (кривые 1 и 2 на рис. 1).

Однако для сердечников с большой относительной длиной имеется расхождение между теоретическими и экспериментальными данными. Например, если  $L = 450$  и частота возбуждения  $f_e = 500$  гц, то для десятикратного перевозбуждения экспериментально получаемый выигрыш в чувствительности равен 1,8 раза вместо 5. Показано, что наблюдаемое несоответствие обусловлено наличием коэрцитивной силы сердечника, снижающей величину чувствительности при значительных амплитудах поля возбуждения тем больше, чем больше  $H_c$ . Для компенсации уменьшения чувствительности предложено ввести начальный фазовый сдвиг высших гармоник в кривой поля возбуждения  $H_B(t) = H_m \sin^{2n-1} \omega t$ . Тогда форма кривой поля возбуждения может описываться одним из следующих выражений

$$H_B(t) = \frac{H_m}{4} [3 \sin \omega t - \sin(3\omega t - \varphi_3)] \quad (4)$$

$$H_B(t) = \frac{H_m}{16} [\sin(5\omega t + \varphi_5) - 5 \sin(3\omega t - \varphi_3) + 10 \sin \omega t] \quad (5)$$

и т.д.

Рассмотрены принципы построения генераторов этих форм кривой.

Экспериментально подтверждено, что с введением начального фазового сдвига увеличение чувствительности оказывается близким по величине с теоретически ожидаемым.

Еще больший выигрыш в чувствительности получается при



использовании другой модификации  $H_m \sin^3 \omega t$ , а именно

$$H_e(t) = H_m(a, \sin \omega t - b, \sin 3\omega t); \quad b, > \frac{1}{3}a, \quad (6)$$

Отношение  $\frac{b,}{a,}$  выбирается таким, чтобы чувствительность ММД при каждом значении амплитуды поля возбуждения была наибольшей. Из экспериментальных данных, приведенных в работе, следует, что применение полей возбуждения:  $H_m \sin^3 \omega t$  — для сердечников с большим  $N$ ,  $\frac{H_m}{4} [3 \sin \omega t - \sin(3\omega t - \varphi_3)]$  и  $H_m(a, \sin \omega t - b, \sin 3\omega t); b, > \frac{1}{3}a,$  — для сердечников с малым  $N$  дает существенный выигрыш в чувствительности по сравнению с синусоидальным полем возбуждения (в 4–6 раз при десятикратном перевозбуждении). В связи с этим указанные формы кривой могут быть рекомендованы для возбуждения ММД, когда осуществление режима заданного напряжения не представляется возможным.

Четвертый параграф второй главы посвящен анализу некоторых особенностей использования ступенчато-прямоугольной формы кривой поля возбуждения. Исследование этого вопроса проводилось совместно с Ю.Ф. Пономаревым. Проанализировано влияние вихревых токов и конечной крутизны фронтов ступенчато-прямоугольного поля возбуждения. Показано, что из всех рассмотренных форм кривой это возбуждение обладает наибольшими возможностями для повышения чувствительности ММД в режиме больших амплитуд поля возбуждения в исследованном диапазоне частот (до 5 кГц). Экспериментально получено при десятикратном перевозбуждении увеличение чувствительности ММД на порядок и более по сравнению с синусоидальным полем возбуждения. Кроме этого, из проведенного анализа следует, что применение ступенчато-прямоугольной формы кривой поля возбуждения приводит не только к повышению чувствительности ММД, но и позволяет при определенных условиях снизить такие виды помех как квадратурная составляющая, остаточное напряжение нечетных гармоник, остаточное напряжение второй гармоники. Рассмотрены принципы построения схем, генерирующих ступенчато-прямоугольную форму кривой тока.

В последнем параграфе второй главы приведены результаты сравнения исследованных форм кривой поля возбуждения, полученные экспериментальным путем (частоты возбуждения от 240 Гц до 5 кГц). Наибольшая величина чувствительности во

всем рассматриваемом диапазоне амплитуд поля возбуждения имеет место при использовании ступенчато-прямоугольной формы. Однако её применение в магнитометрах, предназначенных для измерения магнитных полей менее  $10^{-4}$  а/м, может встретить затруднения, которые обусловлены сложностью фильтрации четных гармоник, содержащихся в выходном напряжении генератора. Дальнейшее совершенствование генераторов прямоугольного напряжения позволит более полно использовать все положительные качества ступенчато-прямоугольного поля возбуждения. В тех случаях, когда в выходном напряжении генератора прямоугольных колебаний содержание четных гармоник превышает допустимое значение, целесообразно применять поля возбуждения, изменяющиеся по закону  $\frac{H_m}{4} [3 \sin \omega t - \sin(3\omega t - \varphi_3)]$  и  $H_m(a, \sin \omega t - b, \sin 3\omega t); b, > \frac{1}{3}a,$ , а если используются длинные сердечники — режим заданного синусоидального напряжения. Для коротких сердечников применение режима заданного напряжения нецелесообразно, а возбуждение полем  $H_e(t) = H_m \sin^3 \omega t$  и его модификациями обеспечивает примерно одинаковую величину чувствительности.

Если в ММД необходимо использовать длинные сердечники и режим заданного тока возбуждения, то форма кривой  $H_e(t) = H_m(a, \sin \omega t - b, \sin 3\omega t); b, > \frac{1}{3}a,$  оказывается более предпочтительной, чем  $H_m \sin^3 \omega t$  и

$$\frac{H_m}{4} [3 \sin \omega t - \sin(3\omega t - \varphi_3)].$$

В третьей главе исследуется эффект параметрического усиления в ММД. Возможность получения дополнительного усиления при настройке измерительной обмотки в резонанс была известна ранее. Однако исследование этого режима проводилось в весьма упрощенном виде, что не позволило выявить ряд закономерностей, имеющих важное значение при решении вопроса о целесообразности применения указанного режима для повышения чувствительности ММД при больших амплитудах поля возбуждения. До сих пор при исследованиях не использовался подход, рассматривающий наблюдаемые явления как параметрические. Это ограничивало возможности выбора наиболее рациональной электрической



схемы цепи измерительной обмотки, позволяющей обеспечить условия для проявления эффекта параметрического усиления.

Принципиальной основой для получения дополнительного усиления в ММД за счет параметрического эффекта является наличие в ММД периодически изменяющейся индуктивности измерительной обмотки и э.д.с. сигнала, которая обусловлена измеряемым полем, имеющих одинаковый частотный спектр. На основании энергетических соотношений Мэнли-Роу, показано, что наличие "богатого" спектра периодически изменяющейся индуктивности позволяет использовать для повышения чувствительности ММД любой принцип построения преобразователей, известный в теории параметрического усиления.

В третьей главе детально исследуется схема, позволяющая осуществить синхронный (вырожденный) режим параметрического усиления. Указанный режим привлекает, прежде всего, простой схемный вариант: измерительная обмотка ММД включается на нагрузку емкостного характера.

Проведено обоснование выбора метода решения дифференциального уравнения цепи измерительной обмотки в виде бесконечного ряда гармоник тока. Показано, что приближенное решение дифференциального уравнения, учитывающее кроме второй гармоники и более высокие четные гармоники тока приводит к весьма существенным качественным изменениям в расчетных выходных характеристиках ММД в "параметрическом" режиме. Однако при этом значительно усложняются конечные выражения, что затрудняет их анализ. Тем не менее в ряде частных случаев при учете токов второй и четвертой гармоник оказывается возможным получить сравнительно простые выражения, которые позволяют сделать важные выводы об особенностях применения эффекта параметрического усиления в ММД. В таком приближении исследован параметрический режим ММД при использовании ступенчато-прямоугольной формы кривой. Как из энергетических соображений, так и приближенного решения дифференциального уравнения следует, что в этом случае в цепь вносится дополнительное затухание. Таким образом, если закон изменения магнитной проницаемости представляет собой последовательность прямоугольных импульсов со скважностью, равной двум, то настройка измерительной обмотки в резонанс приводит к уменьшению эквивалент-

ной добротности контура.

Анализ энергетических соотношений показал, что дополнительное усиление при настройке измерительной обмотки в резонанс возможно далеко не всегда. Для его получения необходимо выполнение определенных амплитудных и фазовых соотношений между гармониками тока нагрузки. Так, при ступенчато-прямоугольном возбуждении энергия в контур вносится только тогда, когда  $\cos \varphi_2 \cdot \sin \varphi_4 > 0$  ( $\varphi_2$  и  $\varphi_4$  - начальный фазовый угол тока соответственно второй и четвертой гармоник). Из анализа следует, что, если для возбуждения ММД используется ток ступенчато-прямоугольной формы, то  $\cos \varphi_2 \cdot \sin \varphi_4 < 0$ , и, следовательно, имеет место дополнительное затухание, а не усиление. Однако, если искусственным путем, например, введением соответствующих фазовращающих цепей добиться выполнения условия  $\cos \varphi_2 \cdot \sin \varphi_4 > 0$ , то можно получить дополнительное усиление. Последнее является основой для построения схем, обеспечивающих дополнительное усиление по мощности за счет параметрического эффекта при ступенчато-прямоугольном возбуждении или в других случаях, когда не выполняются необходимые амплитудные и фазовые соотношения между гармониками тока.

При средней кривой намагничивания сердечников ММД, близкой к арктангенсной аппроксимации, и синусоидальном поле возбуждения необходимые соотношения для получения усиления также не всегда выполняются. Однако их можно обеспечить соответствующим выбором величины  $\beta = \frac{2\omega W^2 S \mu_{grm}}{Rl}$ . Из выражения для коэффициента усиления (учитывается ток второй и четвертой гармоник)

$$K = 2\beta \mu_0 \frac{\sqrt{\beta^2 [\mu_4 + 4\beta^2 \frac{(\frac{3}{2}\mu_2 + \mu_6)(\mu_2 - \mu_6)^2}{1 + \beta^2(9\mu_2^2 - 4\mu_6^2)}]^2 + [1 + 2\beta^2 \frac{\mu_2 - \mu_6}{1 + \beta^2(9\mu_2^2 - 4\mu_6^2)}]^2}}{1 - \beta^2 \mu_4^2 + 4\beta^2 \frac{(\mu_2^2 - \mu_6^2)[1 + \beta^2(\mu_2^2 - \mu_6^2)] + 2\beta^2 \mu_4 [3\mu_2 \mu_6 - \mu_6(\mu_2 + \mu_6)]}{1 + \beta^2(9\mu_2^2 - 4\mu_6^2)}} \quad (7)$$



где  $\bar{v} = \frac{v}{2\mu_{grm}}$ ,  $\mu_{-}$  и  $\mu_{2n}$  - постоянная составляющая и амплитуды гармоник магнитной проницаемости, следует, что дополнительное усиление возможно, если  $v > 30$  и чем больше  $v$ , тем больше усиление.

Из (7) видно, что значения  $K$  можно изменять путем изменения соотношения между амплитудами гармоник магнитной проницаемости, например, изменяя амплитуду, форму кривой поля возбуждения, а также относительную длину сердечника.

Исследование зависимости  $K$  от амплитуды поля возбуждения показывает, что эффект параметрического усиления может быть использован для повышения чувствительности ММД при значительных амплитудах поля возбуждения.

Анализ влияния высших гармоник тока нагрузки на расчетные значения чувствительности ММД проводился с использованием ЭВМ БЭСМ-6. Вычисления проводились для ММД, возбуждаемого синусоидальным полем и имеющего сердечники, средняя кривая намагничивания которых может быть аппроксимирована функцией арктангенса. При этом получены следующие результаты.

1. Погрешность решения дифференциального уравнения при учете токов второй, четвертой, шестой, восьмой и десятой гармоник не превышает 2% в диапазоне перевозбуждений  $\frac{H_m}{H_{mopt}}$  от 2 до 80. ( $H_{mopt}$  - амплитуда поля возбуждения, соответствующая максимальной чувствительности ММД в режиме холостого хода).

2. Если учитывать при решении уравнения последовательно токи сначала второй и четвертой, затем второй, четвертой и шестой и, наконец, второй, четвертой, шестой и восьмой гармоник, то получаются качественно различные результаты. Это иллюстрируется кривыми зависимости коэффициента усиления  $K$  от  $\frac{H_m}{H_{mopt}}$ , приведенными на рис. 3 для различных значений  $v$  ( $q$  - число гармоник тока, которое учитывалось при решении уравнения). Во-первых, из анализа кривых рис. 3 следует, что для получения коэффициента усиления равного примерно 10, необходимо иметь значение  $v$  порядка 160. Экспериментальные данные подтверждают порядок этой величины. А в случае учета второй гармоники тока  $v$  равно 9+10, т.е. отличается в 16+18 раз. Такая ошибка при проектировании недопустима.

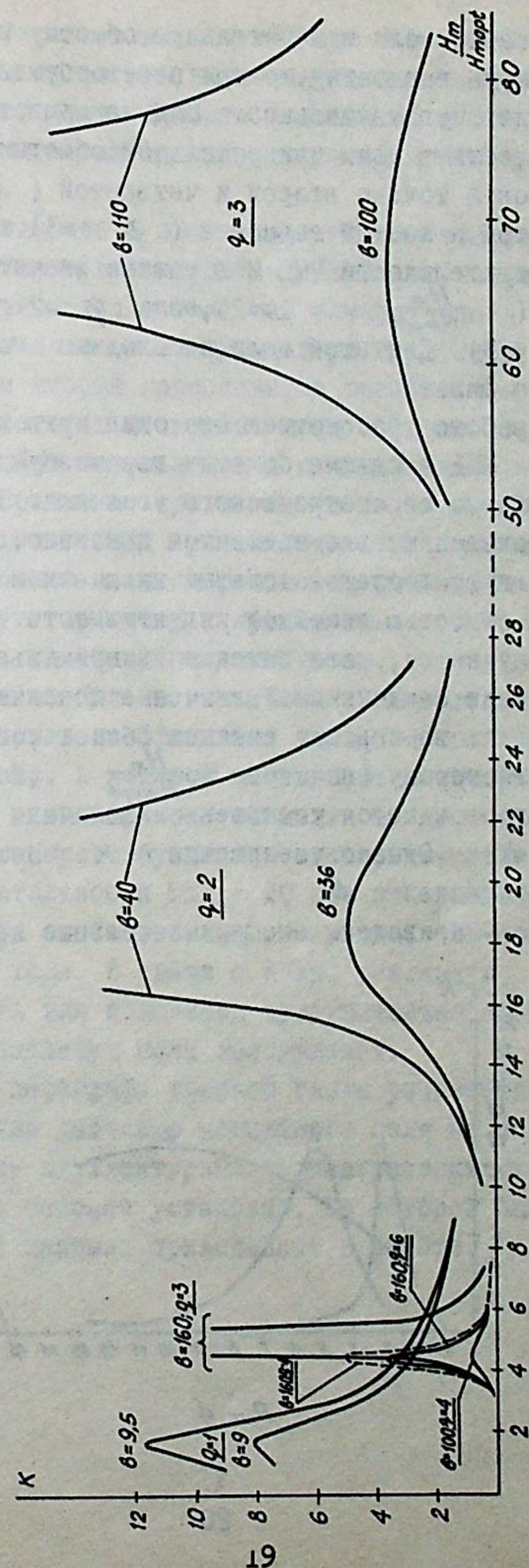


Рис. 3



Во-вторых, если измерительную обмотку настраивать емкостью на вторую гармонику, то при перевозбуждениях, больших пяти, увеличить чувствительность ММД не представляется возможным. Однако, если в цепи измерительной обмотки обеспечить прохождение токов только второй и четвертой ( $q = 2$ ) или второй, четвертой и шестой гармоник ( $q = 3$ ), то возможно повышение чувствительности ММД и в режиме значительных перевозбуждений ( $\frac{H_m}{H_{mopt}} = 14 \div 24$ , если  $q = 2$  и  $\frac{H_m}{H_{mopt}} = 55 \div 80$ , если  $q = 3$ ). Для этой цели необходимо использовать соответствующие фильтры.

3. В работе рассмотрен еще один путь повышения чувствительности ММД в режиме больших перевозбуждений при использовании эффекта параметрического усиления. На основании расчетов и проведенных экспериментов показано, что это может быть достигнуто последовательным включением с измерительной обмоткой и емкостью линейной индуктивности. Аналогичный результат получается, если сечение измерительной обмотки превышает сечение сердечника. Увеличение дополнительной линейной индуктивности: во-первых, смещает область, соответствующую  $K = K_{max}$  в сторону значений  $\frac{H_m}{H_{mopt}}$ , больших пяти; во-вторых, сопровождается уменьшением величины коэффициента усиления  $K$ . Однако уменьшение  $K$  нетрудно компенсировать увеличением  $\beta$ .

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые, показываю-

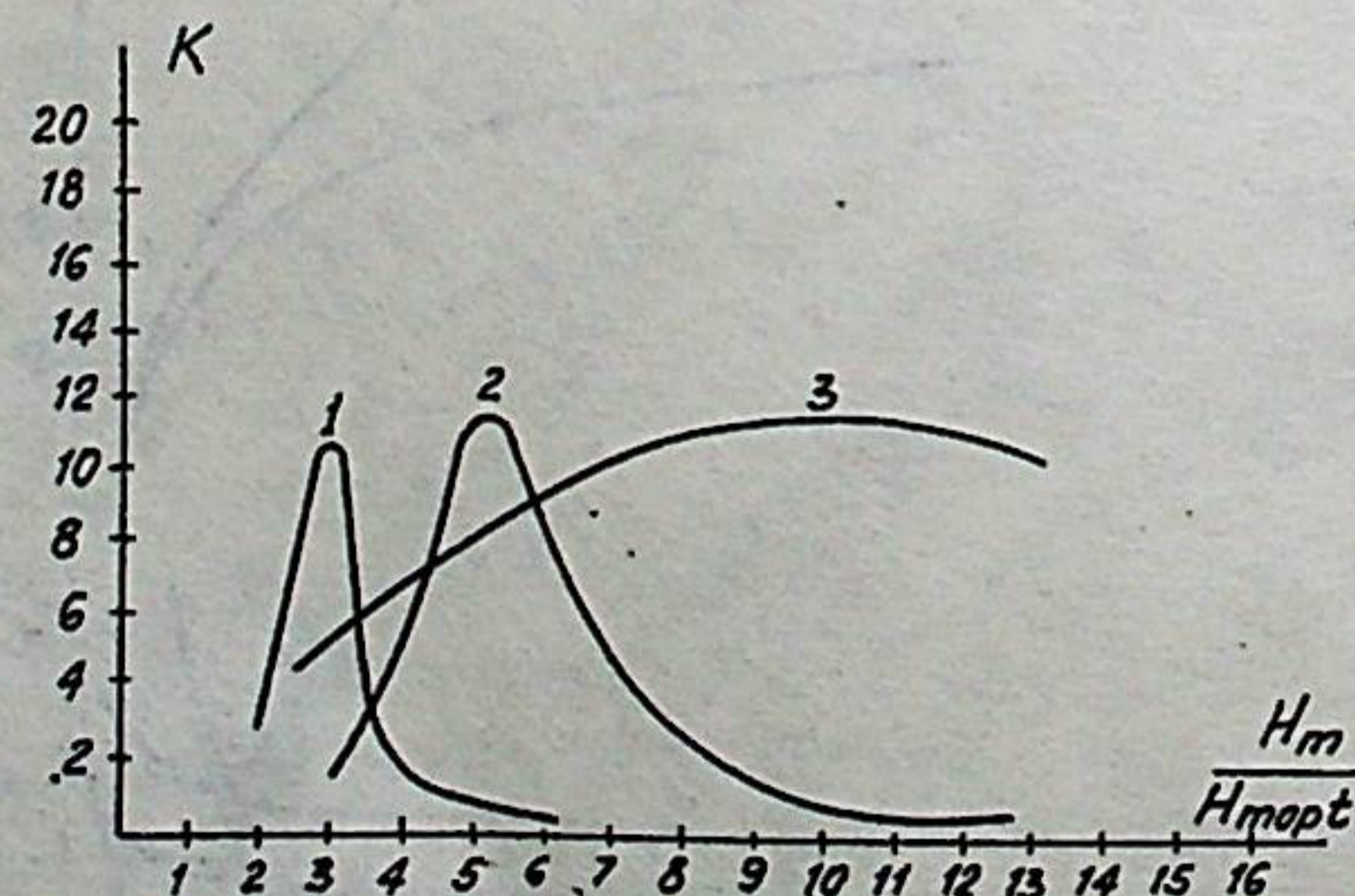


Рис. 4

щие увеличение чувствительности ММД при настройке цепи измерительной обмотки на вторую гармонику с использованием дополнительной линейной индуктивности (кривая 3) и без нее (кривая 1). Экспериментальные данные получены при синусоидальном поле возбуждения.

В работе предложен и экспериментально проверен также другой метод повышения чувствительности ММД при перевозбуждениях. Сущность его заключается в том, что измерительная обмотка настраивается в резонанс на высшую четную гармонику, а сигналом служит напряжение второй гармоники. На рис. 4 экспериментальная кривая 2 соответствует настройке цепи измерительной обмотки на 4-ю гармонику без использования дополнительной линейной индуктивности. Из сравнения кривых на рис. 4 видно, что для повышения чувствительности ММД при значительных амплитудах поля возбуждения наиболее целесообразно настраивать измерительную обмотку на вторую гармонику с применением последовательно включенной в цепь линейной индуктивности.

Исследования стабильности чувствительности показали, что при заданном значении коэффициента усиления большей стабильностью обладает схема, в которой используется линейная индуктивность. Для такой схемы при синусоидальном поле возбуждения и двенадцатикратном перевозбуждении экспериментально получено повышение чувствительности ММД в 20 раз по сравнению с режимом холостого хода при стабильности, не худшей, чем стабильность в режиме холостого хода. В связи с этим, указанную схему следует рекомендовать для повышения чувствительности ММД в режиме значительных амплитуд поля возбуждения.

В последнем параграфе третьей главы рассмотрены возможные принципы построения датчиков магнитного поля на основе ММД, включенных в схему двухконтурных параметрических усилителей.

В приложении описана установка, на которой были получены экспериментальные данные, приведенные в работе.



## Выводы

1. Систематизированы основные помехи, ограничивающие порог чувствительности измерительных устройств, использующих в качестве первичного преобразователя магнитомодуляционный датчик. Показано, что увеличение чувствительности ММД при значительных амплитудах поля возбуждения является важным резервом улучшения порога чувствительности магнитометров.
2. Исследованы особенности режима заданного питающего напряжения ММД при трех его формах кривой: синусоидальной, прямоугольной и вида  $U_m \sin^3 \omega t$ . Сделан вывод о целесообразности применения при больших амплитудах поля возбуждения режима заданного напряжения вместо режима заданного синусоидального поля возбуждения для увеличения чувствительности ММД, имеющих сердечники значительной длины. Показано, что эффективность использования режима заданного питающего напряжения падает для ММД, имеющих сердечники небольшой длины.
3. Предложено для повышения чувствительности ММД, имеющих сердечники небольшой длины, при значительных амплитудах поля возбуждения применять режим заданного тока с формой кривой вида  $I_m \sin^{2n-1} \omega t$  и её модификациями. Разработаны принципы построения генераторов указанных форм кривой.
4. Проанализированы особенности использования ступенчато-прямоугольной формы кривой поля возбуждения для повышения чувствительности и снижения некоторых помех, ограничивающих порог чувствительности ММД. Предложены принципиальные схемы генератора, позволяющие получить ток ступенчато-прямоугольной формы.
5. Проведено сравнение различных форм кривой поля возбуждения. Даны рекомендации о целесообразности их использования при больших амплитудах поля возбуждения в зависимости от относительной длины сердечника ММД и требуемого порога чувствительности магнитометра.

6. Показано, что наличие "богатого" спектра периодически изменяющейся индуктивности измерительной обмотки позволяет использовать для повышения чувствительности ММД любой принцип построения преобразователей, известный в теории параметрического усиления.
  7. Для повышения чувствительности ММД обоснована необходимость соблюдения определенных амплитудных и фазовых соотношений между гармониками тока нагрузки при настройке измерительной обмотки на вторую гармонику. Предложено использовать фазовращающие цепи в тех случаях, когда эти соотношения не выполняются.
  8. Произведен анализ влияния высших гармоник тока нагрузки на точность расчета чувствительности ММД в "параметрическом" режиме. В результате показано, что при учете высших гармоник тока до десятой включительно приближенное решение дифференциального уравнения цепи измерительной обмотки отличается от точного не более, чем на 2%.
  9. Обоснована нецелесообразность настройки измерительной обмотки в резонанс на вторую гармонику для увеличения чувствительности ММД при перевозбуждении, больших пяти, если сечение измерительной обмотки практически совпадает с сечением сердечника.
  10. Предложены методы повышения чувствительности ММД при перевозбуждениях, больших пяти: настройка измерительной обмотки на более высокую четную гармонику (сигналом является напряжение второй гармоники), использование дополнительной индуктивности, увеличение числа витков и сечения измерительной обмотки по сравнению с сечением сердечника, применение фильтров, пропускающих ток второй и четвертой, либо второй, четвертой и шестой гармоник.
- II. Показано, что наибольшей стабильностью чувствительности обладает схема, в которой измерительная обмотка настраивается в резонанс на вторую гармонику с использованием последовательно включенной дополнительной линейной индуктивности. Экспериментально получено в такой схеме при синусоидальном поле возбуждения и две -



надцатикратном перевозбуждении повышение чувствительности ММД в 20 раз по сравнению с режимом холостого хода при стабильности, не худшей, чем стабильность в режиме холостого хода. Поэтому указанная схема рекомендуется для использования.

12. Рассмотрены возможные принципы построения датчиков магнитного поля на основе ММД, включенных в схему двухконтурных параметрических усилителей.

Основные результаты работы доложены на УП сессии семинара по проблеме построения и использования магнитометрической аппаратуры, проходившей в г. Ленинграде с 23 по 25 апреля 1968 г., а также на IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений (г. Новосибирск, 1968 г.).

По материалам диссертации опубликованы следующие работы

1. Б.М.Рогачевский, Г.А.Штамбергер. К вопросу об аппроксимации характеристик нелинейных индуктивных и емкостных элементов электрических цепей арктангенсом и кусочно-линейной функцией. Автометрия, № 4, 1967.
2. Б.М.Рогачевский. О нечетных гармониках э.д.с. на выходе магнитомодуляционных датчиков. Автометрия, № 4, 1966.
3. Б.М.Рогачевский. О соотношении требований к избирательности системы и неидентичности характеристик четырехполосников измерительных балансных цепей. Автометрия, № 6, 1967.
4. Б.М.Рогачевский. Использование эффекта параметрического усиления для повышения чувствительности магнитомодуляционных датчиков (ММД). Автометрия № 3, 1968.
5. Ю.Ф.Пономарев, Б.М.Рогачевский. О характеристиках феррозондов при продольном импульсном возбуждении. В сб. Геофизическая аппаратура / в печати /.
6. Б.И.Рахманин, Б.М.Рогачевский. Метод измерения максимального значения дифференциальной магнитной проницаемости. Измерительная техника / в печати /.