

## РАЗДЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В. Э. ДРЕЙЗИН, В. К. ЖУКОВ, И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

В настоящее время различают три основных вида неразрушающего контроля:

- 1) измерение параметров изделий в широком диапазоне их изменений;
- 2) допусковый контроль этих параметров, т. е. измерение их малых отклонений от некоторых номинальных значений;
- 3) индикация дефектов типа нарушения сплошности, инородных включений или местных неоднородностей.

Мы ограничиваемся рассмотрением первых двух видов контроля, поскольку именно здесь наиболее ярко проявляются трудности раздельного контроля и подавления влияния мешающих факторов. При индикации дефектов эти трудности в большинстве случаев сравнительно легко преодолеваются путем использования дифференциальных датчиков с самокомпенсацией, где подавление влияния колебаний электромагнитных и геометрических параметров достигается благодаря сравнению двух соседних мест контролируемой детали, а также путем динамического анализа сигнала при сканировании всей поверхности контролируемого изделия, который заключается в отделении резких изменений сигнала, вызванных наличием дефекта, от плавных изменений, определяемых некоторым изменением электромагнитных или геометрических параметров от участка к участку.

Из двух оставшихся видов неразрушающего контроля наиболее общим является первый, поскольку допусковый контроль можно рассматривать лишь как частный случай измерения параметров изделия, когда их значения колеблются в каких-то небольших, заранее известных, пределах вокруг некоторых номинальных значений. Выделение же допускового контроля в отдельный вид производят из-за того, что подход к решению задач раздельного контроля в том и другом случаях оказывается несколько отличным. Естественно, что резкой границы между этими двумя видами контроля провести нельзя. Критерием же, позволяющим относить каждый конкретный случай к тому или иному виду, должна являться возможность линеаризации зависимостей параметров датчика от параметров изделия в заданном диапазоне их изменения.

При общем рассмотрении вопроса многопараметрового раздельного контроля можно выявить три основных момента.

Во-первых, необходимость предварительного изучения характера влияния каждого параметра изделия на датчике, т. е. нахождение функ-

циональных зависимостей между непосредственно измеряемыми параметрами датчика и неизвестными параметрами изделия.

Во-вторых, необходимость получения от датчика многомерной информации в соответствии с числом неизвестных параметров изделия.

В-третьих, необходимость расшифровки полученной информации.

Остановимся коротко на каждом из них. Первый момент сводится к отысканию функциональных зависимостей между непосредственно измеряемыми параметрами датчика и неизвестными параметрами изделия.

В общем виде эти функциональные зависимости можно записать как

$$X_i = F_i (Y_1, Y_2, \dots, Y_n), \quad (1)$$

где  $X_i$  — один из непосредственно измеряемых параметров датчика (или его приращение),

$Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  — неизвестные параметры изделия (или их приращения).

Эти зависимости могут находиться либо экспериментально, либо аналитически. Экспериментальный путь наиболее удобен при исследовании немагнитных образцов, поскольку здесь остается только один электромагнитный параметр — удельная электропроводность, — что позволяет легко получить для исследования набора образцов с одним меняющимся параметром (при исследовании влияния удельной электропроводности изготавливаются одинаковые образцы из разных материалов, при исследовании влияния геометрических размеров из одного и того же материала изготавливаются образцы разных размеров).

Однако при исследовании ферромагнитных материалов получение наборов образцов с одним меняющимся параметром становится очень затруднительным, поскольку здесь, кроме удельной электропроводности, добавляется еще, по меньшей мере, два электромагнитных параметра — составляющие комплексной магнитной проницаемости вещества. Их приходится отбирать из большого количества образцов с разными значениями электромагнитных параметров. Для этого, естественно, необходимо располагать аппаратурой для точного измерения этих параметров. Такой аппаратуры в настоящее время еще не создано.

Кроме того, необходимые зависимости мало получить, их еще необходимо представить в удобной для анализа форме.

В настоящее время общепринятым является графическое изображение функций в виде нормированных комплексных плоскостей, предложенных Фёрстером:  $\frac{\Delta X}{|X_{хол}|} = f\left(\frac{\Delta R}{|X_{хол}|}\right)$  для однообмоточного датчика и  $\frac{\mathcal{E}_{мн}}{|\mathcal{E}_{хол}|} = f\left(\frac{\mathcal{E}_{вещ}}{|\mathcal{E}_{хол}|}\right)$  для двухобмоточного.

Вид этих комплексных плоскостей для ферромагнитных цилиндров показан на рис. 1 (комплексная плоскость  $\frac{\Delta X}{|X_{хол}|} = f\left(\frac{\Delta R}{|X_{хол}|}\right)$  отличается от плоскости  $\frac{\mathcal{E}_{мн}}{|\mathcal{E}_{хол}|} = f\left(\frac{\mathcal{E}_{вещ}}{|\mathcal{E}_{хол}|}\right)$  только тем, что ось абсцисс сдвинута на единицу вверх).

Подобная нормализация, осуществляемая делением на модуль реактивного сопротивления холостого датчика для однообмоточной конструкции и на модуль э.д.с. холостого датчика для двухобмоточной конструкции, позволяет полностью освободиться от влияния обмоточных данных датчика, а также, используя законы подобия, распространить полученные графики на датчики и образцы любых геометрических размеров, т. е. требование универсальности здесь выполняется наилучшим образом. Однако при этом учитывается то обстоятельство, что при различных спо-

$\frac{Э_{MH}}{|Э_{хол}|}$

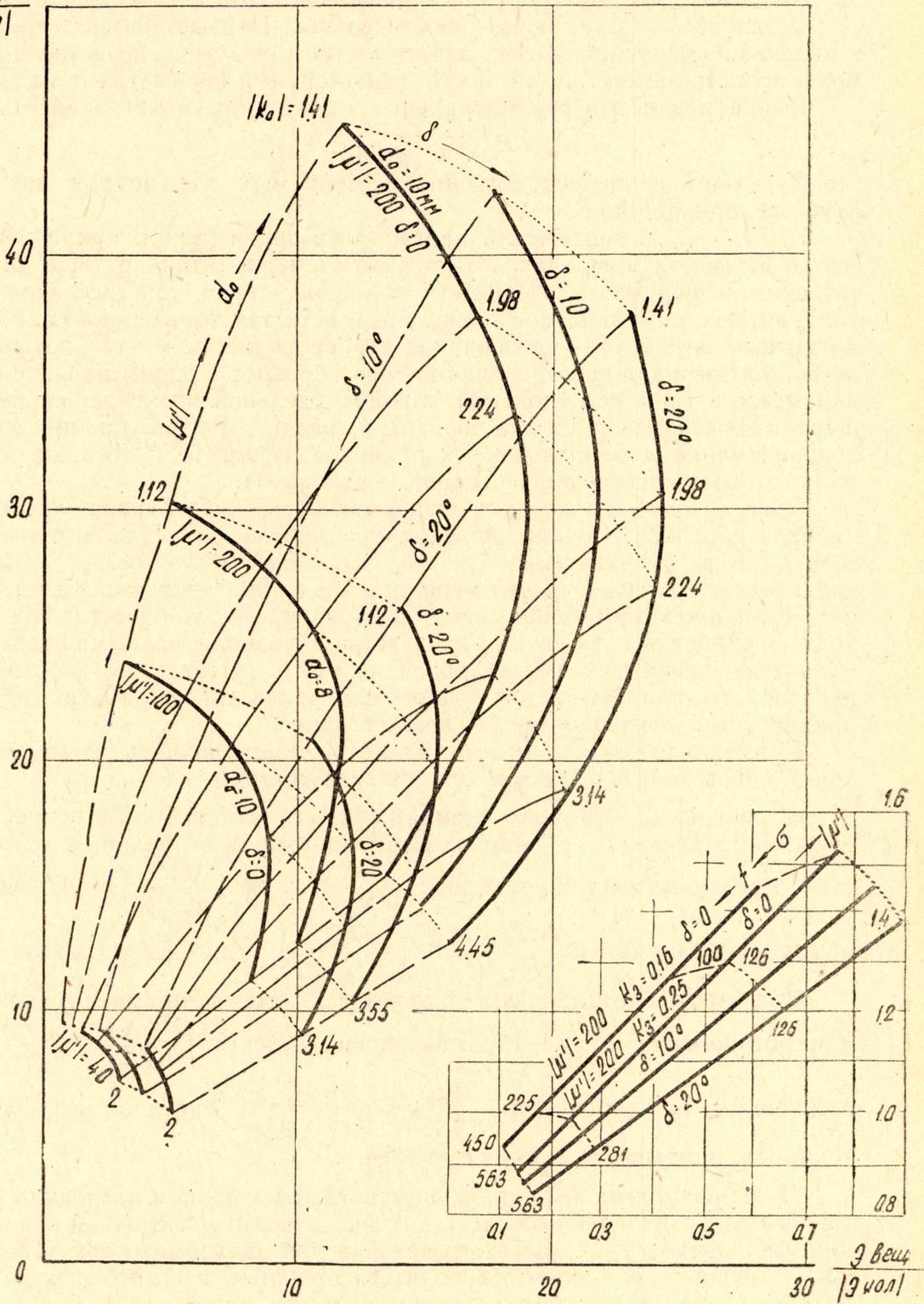


Рис. 1

собах включения датчика непосредственно измеряемыми могут быть самые разнообразные электрические параметры датчика.

Поэтому, наряду с данными комплексными плоскостями, имеет смысл ввести дополнительные плоскости, характеризующие основные способы включения датчика.

В случае однообмоточного датчика к таким способам относятся следующие:

1. Включение датчика в качестве индуктивности в резонансный контур (резонансные и автогенераторные измерительные схемы).

Непосредственно измеряемыми параметрами датчика здесь являются его реактивное сопротивление и добротность. С учетом этого наиболее удобной здесь является комплексная плоскость вида

$$\frac{X}{|X_{хол}|} = f\left(\frac{R}{|X|}\right),$$

поскольку она дает наглядное представление об изменении реактивного сопротивления датчика (ось ординат) и величины, обратной добротности (ось абсцисс), и в то же время в некоторой мере удовлетворяет требованию универсальности. Вид этой плоскости показан на рис. 2.

2. Включение датчика в мостовую уравновешенную схему. Выходные величины при этом определяются относительными приращениями активного и реактивного сопротивлений датчика и наиболее полно характеризуются комплексной плоскостью  $\frac{\Delta X}{|X_{хол}|} = f\left(\frac{\Delta R}{R_{хол}}\right)$ , представленной на рис. 3.

3. Включение датчика в мостовую неуравновешенную схему. Выходной величиной здесь является напряжение разбаланса моста, которое полностью определяется комплексной величиной  $\frac{\Delta Z}{Z_{хол}}$ . Поэтому здесь наиболее удобно использовать комплексную плоскость  $f\left(\frac{\Delta Z}{Z_{хол}}\right) J_m =$

$f\left(\frac{\Delta Z}{Z_{хол}}\right) R_e$ . Она показана на рис. 4.

Для двухобмоточного датчика можно различить два основных способа включения: простое и смешанное. При простом включении выходной сигнал определяется только величиной и фазой э.д.с., возникающей в измерительной обмотке датчика, что будет полностью характеризоваться

нормализованной комплексной плоскостью  $\frac{\mathcal{E}}{|\mathcal{E}_{хол}|}$ , показанной на

рис. 1. При смешанном включении (измерительная обмотка датчика включается в резонансный контур) выходной сигнал будет зависеть как от э.д.с., возникающей в измерительной обмотке, так и от полного импеданса этой обмотки. Характеризовать данный способ включения можно

комплексной плоскостью  $\frac{U_{к.мн}}{|U_{рез}|} = f\left(\frac{U_{к.вещ}}{|U_{рез}|}\right)$ , однако при этом необ-

ходимо условиться, при каких значениях параметров изделия (или, может быть, вообще при отсутствии изделия) контур настраивается в резонанс.

Построение всех этих комплексных плоскостей позволяет представить зависимости между непосредственно измеряемыми параметрами датчика при различных способах его включения и параметрами контролируемого изделия в наглядном и удобном для анализа виде.

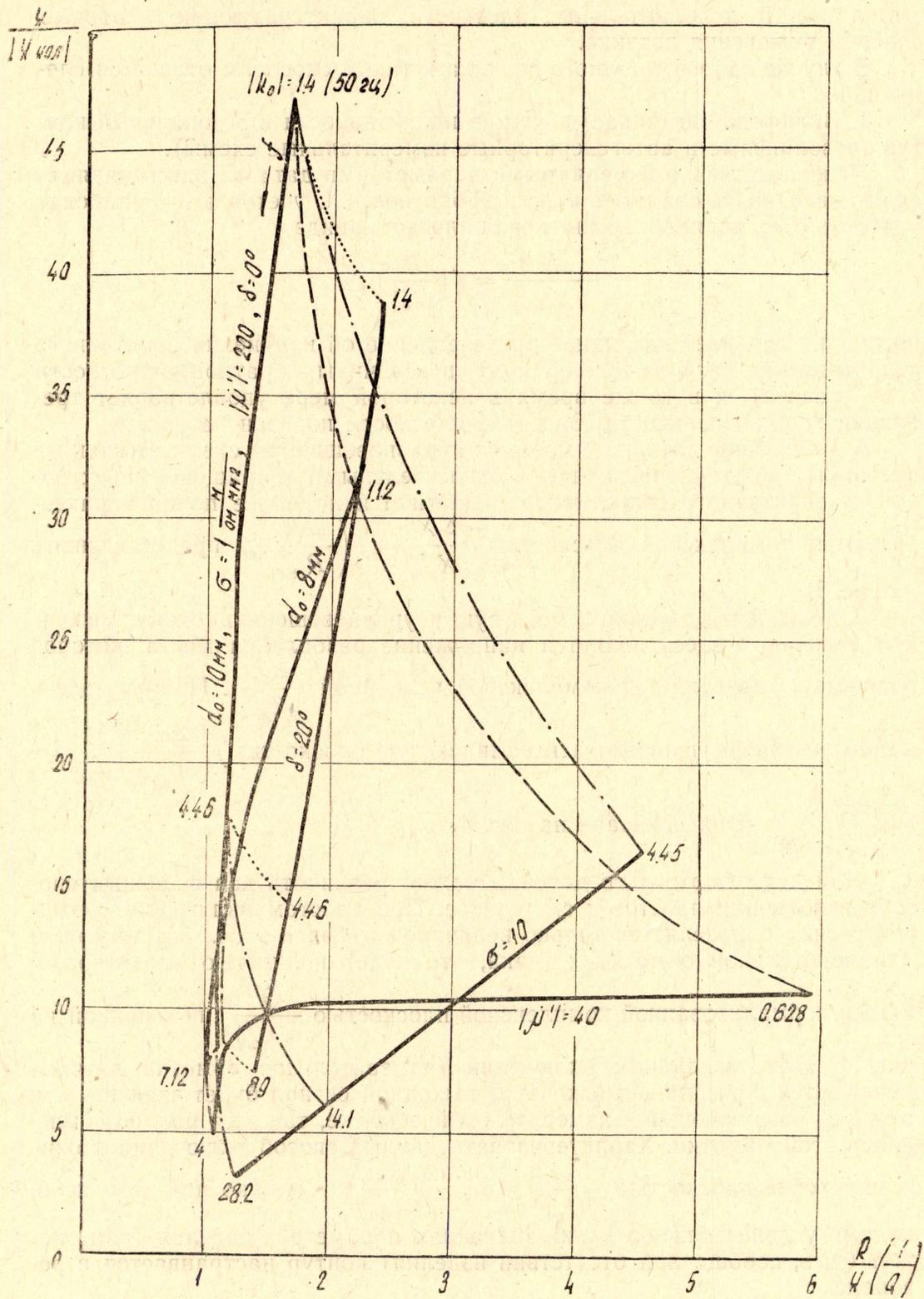


Рис. 2

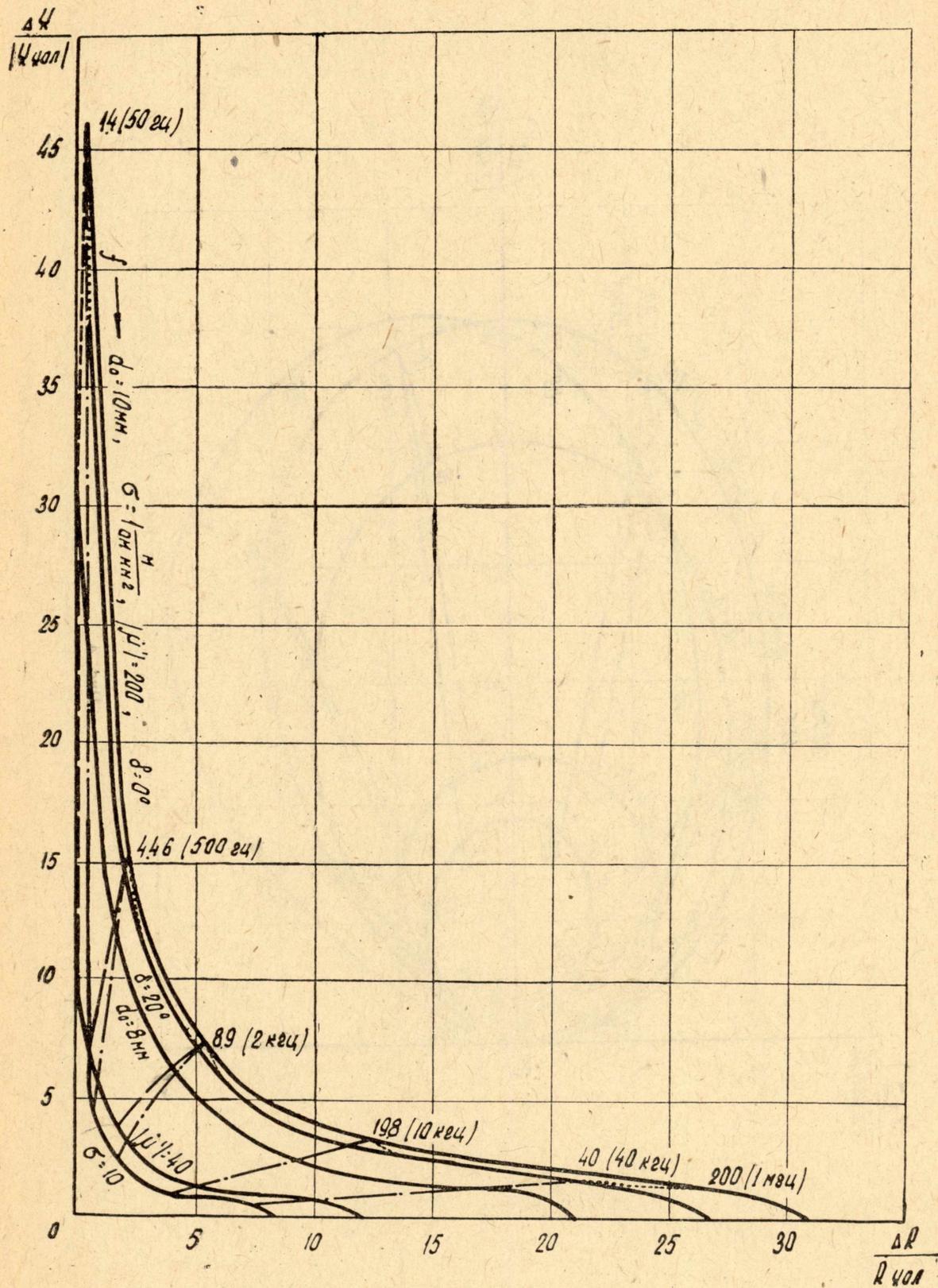


Рис. 3



Вслед за этим перед нами встает вопрос, составляющий второй основной момент многопараметрового раздельного контроля — вопрос получения информации достаточной мерности.

Если подходить к этому вопросу с математической стороны, то можно выявить следующее.

1. Для получения решения системы уравнений вида (1) необходимо иметь  $n$  независимых уравнений.

2. Решение можно проводить на основе аппроксимации данных функций теми или иными алгебраическими функциями.

3. Число возможных решений зависит от вида аппроксимирующих функций.

Первое условие говорит о том, что при  $n$ -ом числе неизвестных параметров изделия нам необходимо иметь такое же число измерительных каналов, измеряющих  $n$  независимых электрических параметров датчика. Однако при использовании гармонических немодулированных полей может быть только два независимых параметра датчика, а все остальные будут лишь какими-то функциональными комбинациями этих двух, поскольку источником информации о контролируемом изделии является в конечном итоге модуль и фаза суммарного магнитного потока, охватываемого контуром датчика.

Если же число неизвестных параметров больше двух, необходимо каким-то образом увеличить мерность получаемой информации. Это можно сделать, изменяя условия возбуждения. В простейшем случае это приводит к необходимости использовать несколько рабочих частот. Действительно, значения непосредственно измеряемых параметров датчика ( $X_i$ ) зависят не только от значений параметров изделий ( $Y_i$ ), но и от частоты возбуждающего поля. При этом частоту можно рассматривать не только как дополнительную независимую переменную величину в уравнениях (1), а как параметр, влияющий на самый вид функций  $X_i = F_i(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ . Остается лишь найти такие частоты, при которых данные функции будут независимыми, т. е. необходимые нам дополнительные измерительные каналы можно получить, измеряя одни и те же параметры датчика, но на разных частотах. Условия независимости полученных функциональных зависимостей при разных частотах могут быть выражены аналитически и будут определяться видом аппроксимирующих функций. При аппроксимации алгебраическими многочленами данное условие выражается неравенством нулю якобиана полученных систем уравнений. В частности, при аппроксимации многочленами первой степени это условие сводится к неравенству нулю определителя системы (этот случай имеет место при допусковом контроле).

При выполнении условий независимости аппроксимирующих уравнений, составляющих данную систему, очевидно, могут быть найдены и решения этой системы относительно неизвестных параметров изделия. Нахождение этих решений и составляет сущность третьего основного момента многопараметрового контроля — расшифровки полученной информации. В случае аппроксимации многочленами первой степени это решение однозначно. Но при аппроксимации многочленами более высоких степеней, что имеет место при наличии существенных нелинейностей исходных зависимостей, мы будем иметь уже  $p^n$  возможных решений системы (где  $p$  — порядок многочленов,  $n$  — число уравнений). Для получения однозначности решения, очевидно, необходимо наложить на эту систему какие-то дополнительные условия.

Таким образом, одним из путей осуществления расшифровки информации при многопараметровом раздельном контроле является математическая обработка полученных результатов при измерении отдельных электрических параметров датчика на различных частотах.

Однако использование этого метода приводит к необходимости разработки сложных многоканальных схем, включающих автоматическое счетно-решающее устройство. При этом независимо от числа интересующих нас параметров контролируемого изделия число измерительных каналов должно быть равным числу неизвестных параметров, поэтому более целесообразным, на наш взгляд, является использование «гибридных» схем, совмещающих математическую обработку и корректировку результатов с широко применяемыми в настоящее время различными способами отстройки от влияния мешающих параметров, такими, например, как применение схем с параметрической или фазовой избирательностью и др. Синтез таких схем может быть осуществлен только на базе всестороннего и тщательного анализа приведенных выше комплексных плоскостей, а также диаграмм чувствительностей датчика.

Данная методика позволяет осуществить не только допусковый контроль, но и отдельное измерение абсолютных значений различных параметров ферромагнитных изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Э. Дрейзин, В. К. Жуков. Об использовании комплексной магнитной проницаемости вещества при расчете электромагнитных полей в ферромагнитных телах, Дефектоскопия, № 2, 1966.
  2. В. Э. Дрейзин. Теоретические основы контроля ферромагнитных материалов вихревыми токами, Известия ТПИ, т. 141, 1966.
  3. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ОНТИ, ч. II, 1936.
-