

**ТЕОРИЯ ПРОХОДНОГО ДАТЧИКА ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К КОНТРОЛЮ ДИАМЕТРА ТОНКОЙ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ
МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ**

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

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Быстрое развитие электротехнической промышленности, электроники, радиотехники и связи требует дальнейшего и количественного, и качественного развития кабельной промышленности. Узким местом кабельной промышленности является качественное изготовление тонкой и тончайшей медной проволоки. Одним из качественных показателей является точное соответствие фактического диаметра проволоки номинальному. В настоящее время производственный допуск на диаметр проволоки для номиналов от 0,05 мм до 0,19 мм составляет $-2 \div +3$ мк. Это накладывает высокие требования на контрольно-измерительную аппаратуру и на точность изготовления фильер. Однако современное состояние этих проблем далеко не соответствует этим требованиям. Начать хотя бы с процесса изготовления и методов контроля фильер. Для изготовления тонкой и тончайшей проволоки применяются победитовые и алмазные фильеры, до 18 фильер на маршрут. Срок службы их колеблется от двух до пяти недель. Затем их приходится перешлифовывать на большие диаметры. Таким образом, требуется частая проверка большого количества фильер. Причем при подборе маршрута даже отклонения диаметра фильер от номинальных на ± 1 мк приводит к значительным нарушениям правильности технологического процесса волочения, в результате чего заметно ухудшается качество проволоки и увеличивается количество обрывов. Однако до сих пор большинство фильер проверяется с помощью обычного микрометра с ценой деления 10 мк и заводской погрешностью ± 4 мк путем замера проволоки, протаскиваемой через данную фильеру. Лишь наиболее ответственные — выходные фильеры проверяются с помощью рычажных микрометров и специальных фотооптиметров с ценой деления 1 мк ввиду того, что эти приборы требуют очень осторожного и умелого обращения, легко разрегулируются и вообще для цеховых условий мало пригодны. К тому же все эти приборы — механические, контактные и требуют значительного контактного усилия — до 300 г, в результате чего возможно смятие измеряемой проволоки, а отсюда неверные показания.

Отсюда возникает потребность в создании высокочувствительного и желателно бесконтактного прибора для точного измерения диаметра проволоки в статике с погрешностью не свыше $\pm 0,5$ мк, который был

бы прост в обращении, надежен и пригоден для цеховых условий. Этот же прибор может быть использован для контроля готовой продукции в ОТК, так как здесь наблюдается такое же несоответствие между допусками на диаметр и средствами его измерения.

Кроме того, из-за непостоянного срока службы фильер желательнее контролировать диаметр проволоки в процессе волочения, чтобы не допустить брака. Отсюда возникает проблема контроля диаметра проволоки в динамике. Точность здесь требуется почти такая же, а условия работы много хуже. Так как скорость волочения доходит до 30 м/сек, то здесь уже безусловно отпадают все контактные методы. Из бесконтактных методов наиболее перспективны для измерения диаметра тонкой и тончайшей проволоки метод вихревых токов и фотоэлектрический метод.

В данной статье, а также в наших работах [4, 5], помещенных в этом же сборнике, рассматриваются основные вопросы, связанные с контролем диаметра тонкой медной проволоки методом вихревых токов в статике и динамике.

Метод вихревых токов применительно к измерению диаметра цилиндрических тел состоит в том, что данное металлическое тело помещается в полость катушки, питаемой током высокой частоты. Вихревые токи, возникающие в этом теле под действием падающей на него электромагнитной волны, образуют свое электромагнитное поле — отраженную волну, что приводит к изменению результирующего поля внутри датчика. А это, в свою очередь, приводит к изменению его активного и реактивного сопротивления, то есть индуктивности и добротности. Степень этих изменений зависит от диаметра и удельной электропроводности вносимого тела (а если оно является ферромагнетиком, то и от его магнитных свойств). Нас будет интересовать случай контроля немагнитного цилиндрического тела, а именно, медной проволоки. Следует отметить, что, кроме описанного однообмоточного датчика, существует и двухобмоточная конструкция датчика, когда внутри обмотки, питаемой переменным током, находится другая обмотка, в которой наводится э. д. с., модуль и фаза которой зависят от параметров контролируемого тела. Такая конструкция датчиков в практике неразрушающего контроля изделий методом вихревых токов получила наибольшее распространение ввиду того, что потери энергии в самих обмотках датчика здесь почти не оказывают влияния на результаты измерений, что повышает стабильность датчика. Однако двухобмоточный датчик дает хорошие результаты лишь на сравнительно низких частотах, в то время как при контроле тонкой и тончайшей проволоки приходится работать на частотах до десятков мегагерц. Здесь уже применение однообмоточных датчиков позволяет достигнуть большей чувствительности и точности, чем в случае применения двухобмоточных датчиков, так как при таких частотах наиболее эффективными являются генераторные измерительные схемы, то есть когда датчик является составной частью колебательного контура автогенератора. Действительно, пользуясь частотным методом, можно измерять изменения индуктивности датчика с погрешностью в 0,01% и меньше, тогда как при измерении э. д. с. такой частоты не удается снизить погрешность менее 1—2%. Кроме того, однообмоточные датчики проще по конструкции, что играет немаловажную роль при контроле тонкой проволоки, так как в этом случае диаметр обмотки приходится делать очень малым.

Однако до настоящего времени не существовало достаточно строгой теории однообмоточного проходного датчика. Существующая теория Двайта — Грабовецкого [1, 2] не учитывает явление возникновения вихре-

вых токов и связанных с этим дополнительных потерь энергии в обмотке датчика. Это не приводило к большим погрешностям на низких частотах при условии, когда диаметр испытуемого тела много больше диаметра провода намотки. Однако на высоких частотах при контроле диаметра тонких и тончайших проволок, когда диаметры измеряемой проволоки и проволоки намотки датчика оказываются примерно одинаковыми, эти добавочные потери могут превосходить те потери энергии, которые учитываются формулами Грабовецкого.

В данной работе мы будем использовать более строгие аналитические выражения, связывающие полное сопротивление датчика с параметрами измеряемой проволоки, для получения которых нами использовалась методика, применяемая в теории индукционного нагрева [3]. Здесь уже учитываются потери электромагнитной энергии не только в металле испытуемого изделия (измеряемой проволоки), но и в металле обмотки датчика.

При выводе формул делались следующие упрощения:

1. Краевые эффекты не учитывались, то есть рассматривалась бесконечно длинная система. Практически это допущение справедливо, если отношение длины намотки к диаметру ее $\frac{l}{D_n} > 5$.

2. Рассматривался датчик с однослойной обмоткой, ибо в этом случае можно добиться максимальной стабильности электрических параметров датчика.

3. Обмотка датчика считалась со всех сторон окруженной воздухом. Практически, если вместо воздуха будет другой диэлектрик, то это не внесет заметных изменений в полный импеданс датчика.

Для того, чтобы учесть по возможности все потери энергии, имеющие место в датчике, он рассматривается как система, состоящая из трех частей: измеряемой проволоки, расположенной по его геометрической оси, воздушного зазора между обмоткой датчика, и этой проволокой и обмотки датчика.

Используя в качестве исходных уравнения электромагнитного поля для проводящей и непроводящей среды, рассчитываются активные и реактивные мощности, поглощаемые в каждой из названных частей в отдельности. При этом мощности, поглощаемые в измеряемой проволоке и в зазоре, рассчитываются по обычной методике, исходя из рассмотрения случая падения цилиндрической электромагнитной волны на наружную поверхность сплошного изотропного металлического цилиндра. Чтобы учесть мощность, поглощаемую самой обмоткой датчика, он заменяется эквивалентной металлической трубой и рассматривается случай падения цилиндрической электромагнитной волны на внутреннюю поверхность полого цилиндра. Но ввиду того, что в действительности электромагнитная волна излучается не из какого-то постороннего источника, находящегося внутри трубы, как это имеет место в [3], а возбуждается током, проходящим по самой обмотке, необходимо ввести добавочный член, характеризующий потери мощности на постоянном токе. Затем подсчитываются суммарные мощности, поглощаемые всей системой и, исходя из этого, находится полное комплексное сопротивление датчика. Полученные выражения имеют следующий вид:

$$Z_{\text{полн}} = 6,2 \cdot 10^{-4} \frac{\omega^2}{l} \left\{ \sqrt{2} \cdot 10^{-4} d_0^2 f \psi_a + \frac{D_b}{k_{\text{укл}}} \left[\sqrt{\rho_u f} F_{\text{вип}} + 0,645 \cdot 10^4 \frac{\rho_u}{d_u} \right] + \right. \\ \left. + j \left[10^{-4} d_0^2 f (\sqrt{2} \psi_r - 1) + 10^{-4} D_b^2 f + D_b \sqrt{\rho_u f} \frac{G_{\text{вип}}}{k_{\text{укл}}} \right] \right\} [\text{ом}];$$

$$Z_{\text{хол}} = 6,2 \cdot 10^{-4} \frac{\omega^2}{l} \left\{ \frac{D_{\text{в}}}{k_{\text{укл}}} \left(V \sqrt{\rho_u f} F_{\text{вип}} + 0,645 \cdot 10^4 \frac{\rho_u}{d_u} \right) + \right. \\ \left. + j \left(10^{-4} D_{\text{в}}^2 f + D_{\text{в}} V \sqrt{\rho_u f} \frac{G_{\text{вип}}}{k_{\text{укл}}} \right) \right\} [\text{ом}],$$

где ω — число витков датчика;
 l — длина намотки датчика (в см);
 $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр обмотки датчика (в см);
 $k_{\text{укл}} = \frac{d_u \omega}{l}$ — коэффициент укладки обмотки датчика;

ρ_u — удельное электросопротивление провода намотки датчика (в ом. см. для медного провода $\rho_u = 1,8 \cdot 10^{-6}$ ом. см);
 f — частота электромагнитного поля (гц);
 d_u — диаметр провода намотки датчика (в см);
 ψ_a, ψ_r — функции Вебера и Фишера, образованные из функций Бесселя и зависящие от обобщенного аргумента

$$p = \frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_3} = \frac{d_0 \sqrt{2}}{2 \cdot 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho_0}{f}}} \simeq d_0 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{2f}{\rho_0}};$$

ρ_0 — удельное электросопротивление измеряемой проволоки (в ом. см.);
 d_0 — диаметр измеряемой проволоки (в см);
 $F_{\text{вип}}, G_{\text{вип}}$ — функции Берча и Дэвиса для случая падения электромагнитной волны на внутреннюю поверхность полого металлического цилиндра.

Для анализа подобных выражений обычно используются построенные по ним графические диаграммы, на которых показывается зависимость относительных приращений сопротивления датчика от различных параметров испытуемого изделия в широком диапазоне частот. В нашем случае такими параметрами будут диаметр и удельное электросопротивление контролируемой проволоки. При использовании генераторных измерительных схем, а они являются в данных условиях наиболее эффективными, так как мостовые схемы для таких частот непригодны, а резонансные обладают малой чувствительностью и точностью, удобно пользоваться комплексной диаграммой в осях

$$\frac{\Delta X}{X_{\text{хол}}} = f \left(\frac{\Delta R}{X_{\text{хол}}} \right)$$

(рис. 1). Действительно, генераторные измерительные схемы реагируют на изменения реактивного сопротивления датчика (изменяется частота генерируемых колебаний) и его добротности (изменяется амплитуда колебаний). Данная же комплексная плоскость как раз и дает нам наглядное представление об относительных изменениях реактивного сопротивления датчика и величины обратной добротности при изменениях различных параметров контролируемой проволоки и частоты. На этой диаграмме при постоянном диаметре намотки датчика каждая точка однозначно определяет удельное сопротивление материала измеряемой проволоки и ее диаметр. Сплошные дугообразные линии показывают изменения приращений сопротивления датчика с изменением аргумента p при различных значениях коэффициента заполнения, равного $v = \frac{d_0^2}{D_0^2}$.

Изменение аргумента здесь достигается за счет изменения частоты или

удельного электросопротивления ρ_0 . Штриховые линии показывают изменения этих приращений при изменении диаметра проволоки при различных частотах. Уже из анализа этой диаграммы можно сделать следующие выводы:

1) для увеличения чувствительности датчика нужно стремиться к возможно большему коэффициенту заполнения $v = \frac{d_0^2}{D_a^2}$;

2) так как изменение ρ_0 приводит лишь к изменению аргумента p , то чувствительность датчика к изменению удельной электропроводности проволоки будет максимальной при малых значениях аргумента ($p=1 \div 4$) и минимальной при больших значениях аргумента ($p > 10$);

3) чувствительность датчика к диаметру будет напротив повышаться при увеличении аргумента;

4) для контроля диаметра при больших значениях аргумента удобно пользоваться изменением реактивного сопротивления датчика, что и осуществляется в генераторных частотных схемах. Однако при измерении тонкой проволоки добиваться больших значений аргумента можно только путем увеличения рабочей частоты. Но уже для проволоки диаметром 100 мк значению аргумента $p=10$ соответствует частота $f=91$ мгц, то есть частота уже заходит в метровый диапазон. При этом сильно возрастает влияние различных дестабилизирующих факторов, в особенности паразитных емкостей и индуктивностей, трудно становится применять цепи с сосредоточенными параметрами, то есть применение чрезвычайно высокой частоты нежелательно. Поэтому имеет смысл вывести выражения для чувствительности датчика по реактивному сопротивлению (или, что то же, по индуктивности) к диаметру контролируемой проволоки и к ее удельному сопротивлению в зависимости от аргумента и выбирать рабочую частоту путем их тщательного анализа. Кроме того, эти выражения необходимы для количественного подсчета чувствительности датчика к изменению диаметра измеряемой проволоки и погрешности от возможного изменения ее удельной электропроводности. Эти выражения легко получить из общего выражения для полного реактивного сопротивления датчика путем его дифференцирования по соответствующему параметру. Действительно, абсолютное изменение реактивного сопротивления при изменении диаметра проволоки на Δd_0 можно найти как

$$\Delta X_{\text{полн}} = \frac{\partial X_{\text{полн}}}{\partial d_0} \Delta d_0.$$

Относительное изменение будет

$$\frac{\Delta X_{\text{полн}}}{X_{\text{полн}}} = \frac{\partial X_{\text{полн}}}{\partial d_0} \cdot \frac{\Delta d_0}{X_{\text{полн}}}.$$

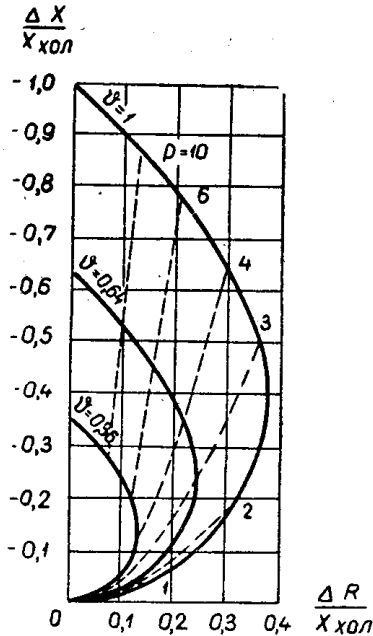


Рис. 1. Диаграмма приращений комплексного сопротивления датчика для немагнитного металлического цилиндра.

дуктивностей, трудно становится применять цепи с сосредоточенными параметрами, то есть применение чрезвычайно высокой частоты нежелательно. Поэтому имеет смысл вывести выражения для чувствительности датчика по реактивному сопротивлению (или, что то же, по индуктивности) к диаметру контролируемой проволоки и к ее удельному сопротивлению в зависимости от аргумента и выбирать рабочую частоту путем их тщательного анализа. Кроме того, эти выражения необходимы для количественного подсчета чувствительности датчика к изменению диаметра измеряемой проволоки и погрешности от возможного изменения ее удельной электропроводности. Эти выражения легко получить из общего выражения для полного реактивного сопротивления датчика путем его дифференцирования по соответствующему параметру. Действительно, абсолютное изменение реактивного сопротивления при изменении диаметра проволоки на Δd_0 можно найти как

Но

$$\frac{\Delta X_{\text{полн}}}{X_{\text{полн}}} = S_{\text{отн}} \frac{\Delta d_0}{d_0},$$

отсюда

$$S_{d_0(X)} = \frac{\partial X_{\text{полн}}}{\partial d_0} \cdot \frac{d_0}{X_{\text{полн}}}.$$

Аналогично этому

$$S_{\rho_0(X)} = \frac{\partial X_{\text{полн}}}{\partial \rho_0} \cdot \frac{\rho_0}{X_{\text{полн}}}.$$

Подставляя значения производных, получаем:

$$S_{d_0(X)} = \frac{2d_0^2 \left[\sqrt{2} \psi_r + 10^{-4} d_0 \sqrt{\frac{f}{\rho_0} \frac{\partial \psi_r}{\partial p} - 1} \right]}{d_0^2 (\sqrt{2} \psi_r - 1) + D_B^2 + 10^4 D_B \sqrt{\frac{\rho_{\text{н}}}{f} \frac{G_{\text{вип}}}{k_{\text{укл}}}}} \left[\frac{\% X_{\text{полн}}}{\% d_0} \right];$$

$$S_{\rho_0(X)} = \frac{10^{-4} d_0^3 \sqrt{\frac{f}{\rho_0} \frac{\partial \psi_r}{\partial p}}}{d_0^2 (\sqrt{2} \psi_r - 1) + D_B^2 + 10^4 D_B \sqrt{\frac{\rho_{\text{н}}}{f} \frac{G_{\text{вип}}}{k_{\text{укл}}}}} \left[\frac{\% X_{\text{полн}}}{\% \rho_0} \right].$$

На рис. 2 представлен совмещенный график чувствительности датчика к диаметру проволоки и ее удельному сопротивлению в зависимости от аргумента p .

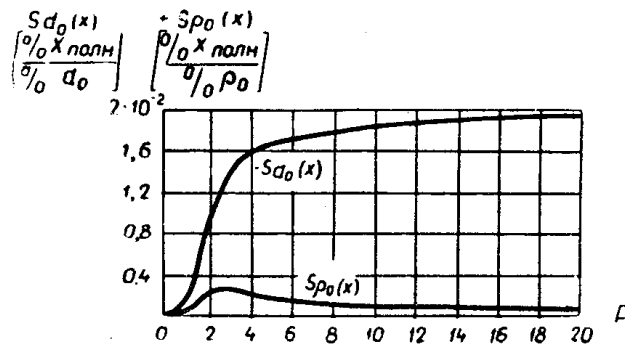


Рис. 2. Зависимость чувствительности датчика к диаметру и к удельной электропроводности контролируемой медной проволоки от аргумента (частоты). Коэффициент заполнения $v = 0,01$.

сти от аргумента p при коэффициенте заполнения $v = 0,01$. Из него видно, что чувствительность датчика к диаметру резко растет, а чувствительность к удельному сопротивлению резко падает лишь при увеличении аргумента от 0 до 6—8. При дальнейшем увеличении аргумента изменение чувствительностей все более и более замедляется и при аргументах $p > 15$ чувствительности практически остаются постоянными. Поэтому не имеет смысла добиваться увеличения аргумента больше 10.

Очень полезным для правильного выбора диаметра намотки датчика является график чувствительности датчика к диаметру проволоки в зависимости от коэффициента заполнения. Такой график для нескольких значений аргумента представлен на рис. 3.

Мы уже говорили, что выбор рабочей частоты и параметров датчика приходится делать не только из анализа чувствительности датчика,

но и с учетом обеспечения максимальной стабильности его параметров, ибо точность прибора при использовании генераторной измерительной схемы будет зависеть от стабильности частоты генератора, которая для $L-C$ генераторов определяется главным образом стабильностью параметров колебательного контура и, следовательно, датчика. С целью

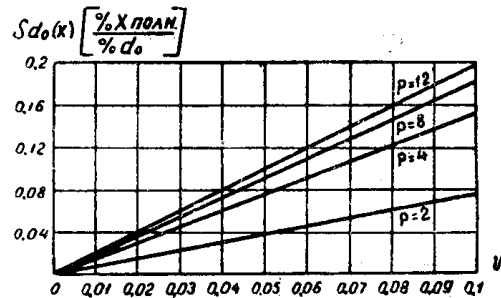


Рис. 3. Зависимость чувствительности датчика к диаметру контролируемого провода от коэффициента заполнения при различных значениях аргумента.

обеспечения уверенного самовозбуждения генератора и уменьшения поправки на частоту необходимо стремиться к максимальной добротности датчика. Кроме того, необходимо учитывать технические и эксплуатационные требования, которые зачастую оказываются решающими. Таким образом, вопрос о выборе параметров датчика и рабочей частоты решается путем комплексного анализа всех требований, предъявляемых к нему. И в этой связи приведенные выше аналитические выражения и графики, построенные по ним, оказываются весьма полезными для правильного и обоснованного выбора оптимальной рабочей частоты и оптимальных параметров датчика для каждого конкретного случая.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Dwight, M. M. B a g a i. Calculation for Coreless Induction Furnaces, Trans. AIEE, v. 54, 1935.
2. В. П. Грабовецкий. Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления и геометрических размеров при помощи вихревых токов. «Автоматика и телемеханика», т. XX, № 7, 1959.
3. А. М. Вайнберг. Индукционные плавильные печи. Госэнергоиздат. 1960.
4. В. К. Жуков, В. Э. Дрейзин, И. Г. Лещенко, М. С. Ройтман. Измерительные схемы для контроля диаметра тонкой проволоки методом вихревых токов. (Статья помещена в этом сборнике).
5. В. К. Жуков, В. Э. Дрейзин, И. Г. Лещенко. Погрешности измерения диаметра тонких проволок методом вихревых токов. (Статья помещена в этом сборнике).