

**ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ТОНКИХ ПРОВОЛОК  
МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ**

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

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Применение метода вихревых токов для контроля диаметра тонких проволок связано с необходимостью регистрировать малые изменения индуктивности датчиков, так как их чувствительность не удастся получить достаточно высокой по причинам, изложенным в [1]. Это предъявляет строгие требования к стабильности и точности измерительных схем, в качестве которых, в основном, используются генераторные схемы. Все причины, вызывающие нестабильность частоты генераторов, естественно, будут причинами погрешности измерения. В первую очередь это относится к самим датчикам, нестабильность которых характеризуется величиной температурного коэффициента индуктивности — ТКИ.

Принимая меры для снижения величины ТКИ, применяя термокомпенсацию в контуре измерительного генератора и стабилизацию питающих напряжений, можно обеспечить температурный коэффициент частоты не выше  $10^{-5}$ . В случае, когда в схеме используется трансформация частоты, в качестве второго генератора лучше использовать генератор, аналогичный первому. Тем самым погрешность измерения, связанная с нестабильностью частоты, вызываемой датчиком, может быть снижена. Еще лучшие результаты, как это показано в [2], могут быть получены в случае использования одного генератора и двух коммутируемых датчиков, один из которых измерительный, а другой — контрольный.

Использование двухгенераторных или однопгенераторных с коммутацией схем может обеспечить погрешность контроля изменений индуктивности датчика, вызванных изменением контролируемого диаметра, порядка  $5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-4}$ . При коэффициенте заполнения датчика 0,01 из [1] видно, что в пересчете на микроны это составит для проволоки 0,1 мм не более 0,5 мк.

Таким образом, схемная погрешность контроля может быть сделана малой и, в этом отношении, не существует каких-либо значительных трудностей использования метода вихревых токов.

Более существенными оказываются погрешности, связанные с измеряемой проволокой, а именно, погрешности от смещения и перекосов проволоки относительно датчика и от изменения ее удельного сопротивления.

При радиальных смещениях проволоки погрешность определяется тем, что, во-первых, в силу неоднородности поля на краях реактивное и активное сопротивления датчика будут изменяться и, во-вторых, если отсутствует электростатический экран между измеряемой проволокой и

обмоткой емкость последней на «землю» также не будет постоянной. При перекосах (состояние, когда угол между осью датчика и осью проволоки отличен от нуля) изменяется периметр сечения проволоки плоскостью, нормальной к оси датчика. Изменение периметра по действию на параметры обмотки эквивалентно некоторому приращению диаметра проволоки при ее коаксиальном расположении с обмоткой датчика.

Увеличением длины датчика, а точнее отношения длины обмотки к ее диаметру, можно снизить влияние смещения, обусловленное неоднородностью поля. Однако на практике это не всегда реализуется, так как размеры обмотки, ко всему прочему, еще определяются частотой измерительного генератора и требованием обеспечения удобного обращения с датчиком в эксплуатации. Поэтому основным средством борьбы со смещениями и перекосами следует считать точное фиксирование проволоки в датчике, что достигается использованием разного рода направляющих устройств. Погрешность от емкостного эффекта, то есть от изменения емкости между обмоткой датчика и контролируемой проволокой, значительно уменьшается при использовании незамкнутого электростатического экрана, помещенного между обмоткой и проволокой. В экспериментах, проведенных нами, механические узлы датчика и направляющего устройства были изготовлены по 2 классу точности, причем в качестве направляющего устройства использовались алмазные фильеры. Для датчика с диаметром намотки 1 мм и контролируемой проволокой 0,14 мм при этом наблюдались погрешности от смещения, не превышающие 1 мк.

Параметры датчика зависят не только от диаметра контролируемой проволоки, но и от величины ее удельного сопротивления  $\rho$ , определяемого качеством меди, из которой сделана проволока. Эта зависимость определенным образом связана с частотой тока, питающего датчик. В [1] показано, что влияние  $\rho$  уменьшается с ростом частоты, тогда как чувствительность датчика к изменению диаметра возрастает. Следовательно, частота должна выбираться с учетом обеспечения минимальной чувствительности к изменению  $\rho$ .

Найденная таким образом частота получается значительно выше той, которая нужна для обеспечения высокой чувствительности датчика к изменению диаметра. Так в [1] указано, что чувствительность к диаметру достигает своего максимального значения при отношении радиуса измеряемой проволоки к глубине проникновения вихревых токов равному  $8 \div 10$ , тогда как для обеспечения нечувствительности датчика к изменению  $\rho$  это отношение в [3] рекомендуется выбирать больше 100. Выполнение последнего условия для тонких проволок требует использования диапазона СВЧ, чего нельзя делать из соображений конструктивного характера. Таким образом, погрешность контроля, связанная с удельным сопротивлением, определяется тем, насколько сильно в реальных условиях будет изменяться величина  $\rho$ , и тем, насколько выполняется условие нечувствительности датчика к изменению  $\rho$ .

Измерение в условиях волочения сопровождается увеличением погрешностей контроля от изменения  $\rho$  и от смещения. Объясняется это тем, что в результате испытываемых деформаций удельное сопротивление проволоки, особенно ее поверхностного слоя, может изменяться в более широких пределах и тем, что труднее осуществляется фиксация проволоки в датчике, вследствие истирания направляющих устройств. Кроме того, измерение в условиях волочения сопровождается погрешностями, обусловленными медной пылью и нагревом. Действительно, из волочильной машины проволока выходит в нагретом состоянии, и, проходя через измерительный датчик, она будет в некоторой степени разогреваться.

его, в результате чего, при ТКИ, не равно нулю, индуктивность будет изменяться. При этом температурные условия контрольного датчика и других элементов генераторов неизменны, то есть изменение индуктивности измерительного датчика, вызванное подогревом, ничем не компенсируется и, следовательно, ведет к погрешности. Эта составляющая погрешность может быть уменьшена только за счет снижения ТКИ обмотки. Эксперименты показывают, что тепловое равновесие в датчике наступает примерно через 10 минут при первом пуске машины. При повторных пусках машины после кратковременных остановок (1÷3) мин это время значительно меньше. Во время испытания приборов для измерения диаметров тонких проволок при прогреве наблюдались изменения индуктивности датчика (при коэффициенте заполнения 0,01), достигающие  $5 \cdot 10^{-4}$ , что эквивалентно изменению проволоки диаметром 0,2 мм на 5 мк. Степень влияния нагрева зависит от многих факторов, в частности, от конструкции датчиков и, естественно, от разности температуры между измеряемой проволокой и окружающей средой. С возрастанием коэффициента заполнения датчика влияние нагрева увеличивается.

Наличие медной пыли на измеряемой проволоке при отсутствии достаточно эффективной очистки ведет к постепенному оседанию пыли на стенках датчика. По действию на его параметры этот процесс эквивалентен увеличению диаметра контролируемой проволоки, то есть появлению погрешности. Очевидно, что влияние пыли уменьшается при использовании очистки проволоки и при периодической чистке рабочего отверстия датчика.

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы:

1. Использование метода вихревых токов для контроля диаметров тонких проволок (50÷300) мк не встречает затруднений со стороны измерительных схем, так как наиболее приемлемые для данного случая варианты генераторных схем могут обеспечить погрешность контроля изменений индуктивности датчика, вызванных контролируемой проволокой порядка 0,01%. В переводе на диаметр, например, при коэффициенте заполнения 0,01, это составит не более 0,01 номинального значения.

2. Погрешность измерения в процессе волочения в основном определяется нагревом, медной пылью и смещением. Принятием соответствующих мер погрешности от перечисленных причин могут быть значительно снижены, но тем не менее остаются достаточно высокими. Поэтому для малых диаметров вряд ли удастся получить погрешность менее (2÷3) мк.

3. Измерение диаметров неподвижных проволок можно производить с более высокой точностью, так как при этом отпадают погрешности, связанные с медной пылью и нагревом. Кроме того, погрешности от смещения и перекосов уменьшаются ввиду более лучшей осевой фиксации проволоки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Жуков, В. Э. Дрейзин, И. Г. Лещенко. Теория проходного датчика применительно к контролю диаметра тонкой медной проволоки методом вихревых токов с использованием проходного однообмоточного датчика. (Статья печатается в настоящем сборнике).

2. В. К. Жуков, В. Э. Дрейзин, М. С. Ройтман, И. Г. Лещенко. Измерительные схемы для контроля диаметра тонких проволок методом вихревых токов. (Статья печатается в данном сборнике).

3. В. П. Грабовецкий. Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления и геометрических размеров при помощи вихревых токов. Автоматика и телемеханика, т. XX, № 7, 1959.