

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА ТОНКИХ ПРОВОЛОК МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В. К. ЖУКОВ, В. Э. ДРЕЙЗИН, М. С. РОЙТМАН, И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

При измерении диаметра тонких проволок методом вихревых токов чувствительным элементом является проходной индуктивный датчик, в полости которого находится измеряемая проволока. Изменение диаметра проволоки приводит к изменению активного и реактивного сопротивлений датчика, то есть к изменению его индуктивности и добротности. Качественные и количественные соотношения, получающиеся при этом, анализируются в [1]. Из этого анализа следует, что при измерении тонких и тончайших проволок ( $50 \div 300$ ) мк оптимальная частота получается порядка нескольких десятков мегагерц, при этом для измерения диаметра проволоки наиболее удобно использовать изменения реактивного сопротивления датчика. Ввиду того, что при измерении тонких проволок не удается конструктивно и из эксплуатационных соображений обеспечить большой коэффициент заполнения (практически он получается порядка  $0,01 \div 0,05$ ), чувствительность датчика получается низкой, порядка  $0,015 \div 0,08$  процента изменения индуктивности на 1% изменения диаметра проволоки.

В этих условиях наиболее эффективными являются генераторные измерительные схемы, в которых датчик является основной частью колебательного контура автогенератора. Мостовые и резонансные схемы для этой цели мало пригодны: первые потому, что измерение должно проводиться на высокой частоте, а вторые — вследствие низкой добротности датчика (не превышает  $10 \div 20$ ). В генераторных измерительных схемах изменения индуктивности и добротности датчика приводят к изменениям частоты и амплитуды генерируемых колебаний. Дальнейшую измерительную схему можно строить как для измерения изменений амплитуды, так и для измерения изменений частоты колебаний. Но амплитудный метод не может дать требуемой точности по следующим причинам. Во-первых, точность будет определяться стабильностью амплитуды генератора. Применяя же только пассивные меры стабилизации, трудно уменьшить нестабильность генератора до требуемой величины, а активные меры стабилизации, то есть обратную связь по амплитуде, применить невозможно, так как измерение ведется именно по изменению амплитуды. Во-вторых, точность измерения будет зависеть от погрешности самой измерительной схемы, то есть всего тракта от контура генератора до показывающего прибора, которая также достаточно велика. Гораздо более перспективным является частотный метод ввиду того, что стабильность генератора по частоте, даже если использовать лишь пассивные меры стабилизации, можно сделать гораздо бо-

лее высокой, чем по амплитуде и, кроме того, измерение частоты можно производить с гораздо большей точностью, чем измерение амплитуды. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только частотные генераторные схемы.

В наиболее общем виде такая схема будет иметь вид, показанный на рис. 1, где Д — датчик, Г — измерительный генератор, ИЧ — индикатор частоты.

Элементы измерительной схемы помимо полезного воздействия  $d$  диаметра на датчик будут испытывать действие различных дестабилизирующих факторов ДФ, к которым в первую очередь следует отнести: изменение окружающей температуры, старение элементов и нестабильность питающих напряжений (погрешности, связанные с измеряемой проволокой, не относятся к числу схемных погрешностей, поэтому они не затрагиваются). Как отмечалось выше, датчик имеет малую чувствительность, поэтому дестабилизирующие факторы, если не принять никаких мер, могут привести к большой погрешности измерения.

Проще всего точность измерения можно повысить, если периодически проводить ручную калибровку частоты генератора. Этот вариант является далеко не лучшим решением задачи, так как введение ручных регулировок в схему не желательно, особенно в случае непрерывного измерения диаметра в условиях волочения. Гораздо лучшим и со стороны

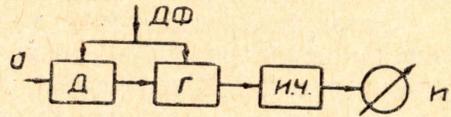


Рис. 1.

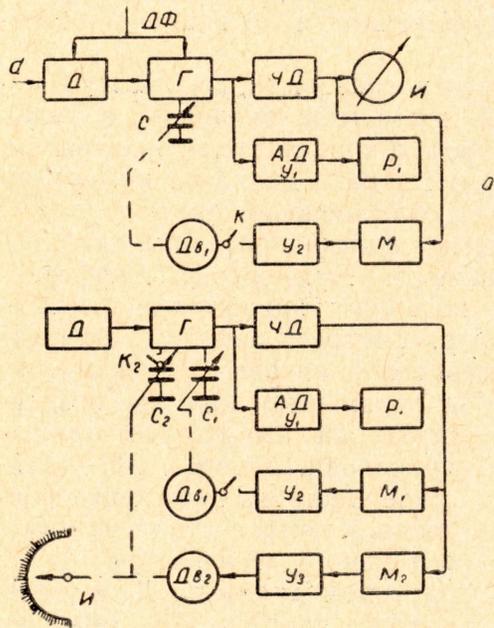


Рис. 2.

точности измерения, и со стороны эксплуатационных удобств является введение в схему автоматической калибровки частоты генератора, которая будет проводиться тогда, когда в датчике отсутствует измеряемая проволока. Если калибровка производится по индикатору частоты, то тем самым автоматически устраняется погрешность от действия дестабилизирующих факторов на ИЧ.

Более полная функциональная схема с использованием автоматического генератора представлена на ской калибровки частоты измеририс. 2,а. Когда в датчике отсутствует измеряемая проволока, напряжение генератора увеличивается. Это увеличение напряжения через амплитудный детектор АД и усилитель  $У_1$  передается на реле  $Р_1$ , вызывая его срабатывание. При этом контакт К реле замыкается и подключает двигатель  $Дв_1$  к выходу усилителя  $У_2$ . Если в таком состоянии схемы напряжение на выходе частотного детектора ЧД отлично от нуля, то через модулятор М и усилитель  $У_2$  оно приведет во вращение двигатель, с ксторым механически связана ось подстроечного конденсатора С. Двигатель будет вращаться до тех пор, пока на выходе частного детектора напряжение не станет равным нулю. На этом процесс калибровки заканчивается.

При вставлении в датчик измеряемой проволоки напряжение, вырабатываемое генератором, вследствие уменьшения добротности контура, падает, контакт К размыкается и цепь автоподстройки не действует. Напряжение, развиваемое на выходе частотного детектора, определяется только измеряемой проволокой.

Недостатком рассмотренной схемы является то, что она не устраняет погрешность от изменения функции преобразования индикатора частоты и пригодна только для регистрации абсолютных значений диаметра. В случае измерения отклонений диаметра от номинального значения схема не обеспечит высокой точности контроля.

Указанный недостаток устраняется, если наряду с калибровкой частоты использовать компенсационный принцип измерения, как показано на рис. 2,б. В этой схеме так же, как и в предыдущей, при отсутствии проволоки в датчике реле Р срабатывает, при этом контакт К<sub>1</sub> замыкается, а контакт К<sub>2</sub> размыкается. Цепь М<sub>1</sub>—У<sub>2</sub>—Дв<sub>1</sub>—С служит для подстройки частоты генератора Г<sub>1</sub>. В результате автоподстройки напряжение на выходе ЧД устанавливается равным нулю. При вставлении проволоки в датчик контакт К<sub>1</sub> размыкается, отключая тем самым цепь автоподстройки, а контакт К<sub>2</sub> замыкается. Если при этом выходное напряжение частотного детектора не будет равно нулю, двигатель Дв<sub>2</sub> придет во вращение. С валом двигателя Дв<sub>2</sub> механически связана ось подстроечного конденсатора С<sub>2</sub>. Система будет находиться в движении до тех пор, пока не наступит компенсация изменения частоты генератора Г<sub>1</sub>, вызванного вставлением проволоки в датчик, изменением частоты, вызванным конденсатором С<sub>2</sub>. С осью конденсатора С<sub>2</sub> механически связан указатель И, перемещающийся по шкале и имеющий градуировку в мк.

В такой схеме измерения устраняется погрешность, связанная с изменением передаточных коэффициентов элементов, входящих в тракт индикатора частоты. Кроме того, подключая конденсаторы постоянной емкости параллельно емкости С<sub>2</sub>, можно выбрать диапазон измерения любой ширины и в любом месте числовой оси значений диаметра.

Использование калибровки частоты не единственный путь устранения действия дестабилизирующих факторов. Применение дифференциальных измерительных схем, также позволяет значительно снизить их влияние. В качестве примера можно рассмотреть работу дифференциальной измерительной схемы, представленной на рис. 3. Здесь через

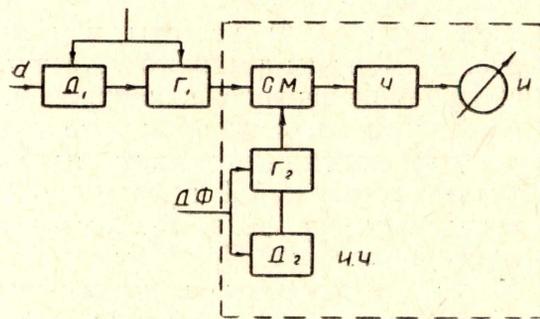


Рис. 3.

*d* обозначено полезное воздействие на схему измеряемой проволоки, а через ДФ — действие дестабилизирующих факторов. Схема состоит из измерительного генератора Г<sub>1</sub> с датчиком диаметра Д<sub>1</sub> и индикатора частоты ИЧ (обведен пунктиром), который включает в себя генератор Г<sub>2</sub> с датчиком Д<sub>2</sub>, аналогичными Г<sub>1</sub> и Д<sub>1</sub>, смеситель частоты С<sub>м</sub>, частотомер Ч и выходной индикатор И. Измерительный гене-

ратор Г<sub>1</sub> и контрольный Г<sub>2</sub> так же, как и датчики Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub>, находятся в одинаковых рабочих условиях, поэтому они в равной степени в качественном и количественном отношении подвержены действию дестабилизирующих факторов. В идеальном случае, то есть в случае, когда гене-

раторы и датчики абсолютно одинаковые, их реакция на действие возмущающих факторов получается одинаковой, тем самым устраняется погрешность измерения от неустойчивости элементов измерительной схемы. Действительно, частота генератора  $\Gamma_1$  несет информацию о диаметре  $[d]$  и о дестабилизирующих факторах  $[D\Phi_1]$ , а частота генератора  $\Gamma_2$  только о дестабилизирующих факторах  $[D\Phi_2]$ . В смесителе происходит вычитание частот, так что информация, которую содержит разностная частота, равна  $[d] + [D\Phi_1] - [D\Phi_2]$ . В идеальном случае  $[D\Phi_1] = [D\Phi_2]$  и на вход частотомера подается частота, несущая информацию только о диаметре. В действительности невозможно добиться полной идентичности измерительного и компенсирующего трактов (имеется в виду компенсация влияния дестабилизирующих факторов), поэтому погрешность контроля уменьшается, но все-таки остается значительной.

Увеличения эффективности дифференциальных схем можно добиться уменьшением числа элементов, составляющих измерительный и компенсирующий тракты. С этой целью можно видоизменить рассмотренную схему, используя один измерительный генератор и два коммутируемых датчика, один из которых измерительный, а другой компенсирующий. Видоизмененная схема показана на рис. 4,а.

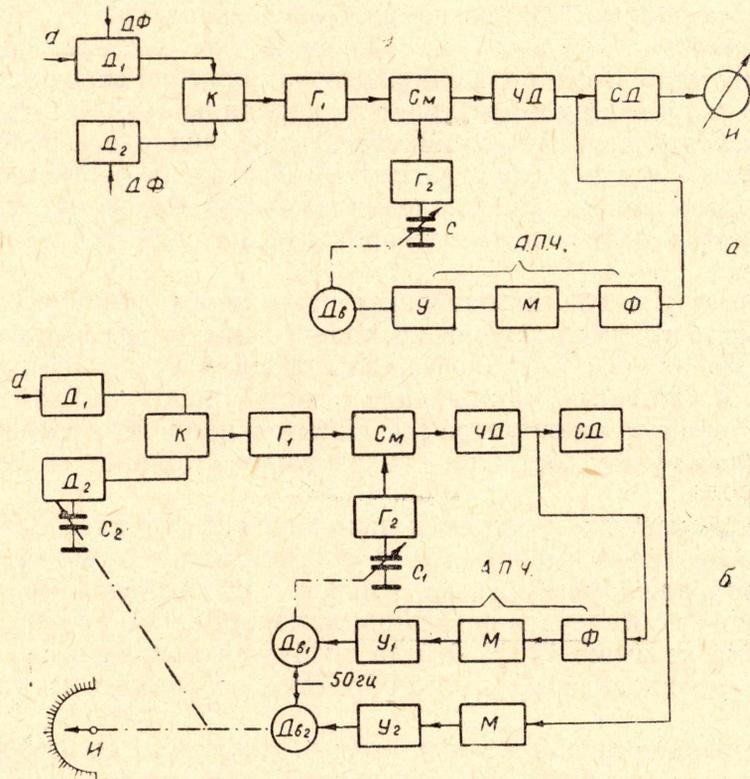


Рис. 4.

Датчики  $D_1$  и  $D_2$  посредством коммутатора  $K$  поочередно подключаются к измерительному генератору  $\Gamma_1$  в качестве индуктивности его колебательного контура. При этом генератор выдает пакеты напряжений, частоты которых пропорциональны значениям индуктивности датчиков. Задачей последующей части схемы является выделение разности между частотами пакетов и представление ее в удобной для наблюдения форме. Измеритель разности частот ИРЧ (обведен на схеме пунктирной линией) состоит из вспомогательного генератора  $\Gamma_2$ , смесителя  $C_M$ , частотного детектора ЧД и синхронного детектора СД с пока-

зывающим прибором *И* на выходе. Для уменьшения погрешности индикации разности частот пакетов в ИРЧ вводится тракт автоподстройки частоты, включающей фильтр *Ф*, модулятор *М*, усилитель *У*, двигатель *Дв* и подстроечный конденсатор *С*. В такой схеме дестабилизирующие факторы, действующие на генератор  $\Gamma_1$ , не изменяют разность между частотами пакетов, а поэтому не вызывают погрешности контроля. Влияние окружающей среды на погрешность контроля в основном будет сказываться через датчики и оно будет тем меньше, чем выше степень одинаковости датчиков. Очевидно, что данной схемой может быть получена более высокая точность контроля, чем схемой, изображенной на рис. 3, так как здесь меньше элементов, которые должны быть одинаковыми.

Для уменьшения погрешности контроля, вносимой измерителем разностной частоты, можно использовать компенсационный принцип измерения. Схема, изображенная на рис. 4,б, отличается от схемы на рис. 4,а, введением цепи изменения реактивного сопротивления компенсирующего датчика  $D_2$ . Эта цепь подключается к выходу синхронного детектора СД и содержит: модулятор *М*, усилитель  $U_2$ , двигатель  $Dв_2$  и подстроечный конденсатор  $C_2$ . При вставлении проволоки в измерительный датчик его реактивное сопротивление изменится, в результате чего между частотами пакетов напряжения генератора  $\Gamma_1$  появится некоторая разность, ведущая к появлению на выходе синхронного детектора постоянного напряжения. Это напряжение модулируется частотой 50 гц, усиливается и поступает на управляющую обмотку двигателя  $Dв_2$ . Двигатель начинает вращаться, поворачивая ось подстроечного конденсатора  $C_2$  и стрелку указателя *И*. Двигатель остановится, когда уравниваются реактивные сопротивления датчиков. Очевидно, что в такой схеме индикатор разности частот практически не вносит погрешности в измерение.

Известные нам по литературным источникам приборы для измерения диаметра тонких проволок, использующие метод вихревых токов, выполнены по схемам с ручной калибровкой частоты измерительного генератора. В частности, как сделано в индуктивном микрометре ИМ-1 [2] и в электронном микрометре [3]. По этой причине схемная погрешность измерения у них составляет значительную долю от общей погрешности контроля.

Из предложенных нами схем измерения были исследованы дифференциальные схемы, собранные в соответствии с функциональными схемами, изображенными на рис. 3 и рис. 4,а. Исследования показали, что схемы могут обеспечить погрешность контроля изменений индуктивности датчика не выше  $10^{-4}$ . Когда требуется получить еще меньшую схемную погрешность, необходимо обратиться к схемам на рис. 2,б или на рис. 4,б.

Использование предложенных схем в приборах для измерения диаметра позволяет получить малую схемную погрешность контроля, так что погрешность измерения в целом будет определяться факторами, связанными с измеряемой проволокой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Э. Дрейзин, В. К. Жуков, И. Г. Лещенко. Теория проходного датчика применительно к контролю диаметра тонкой медной проволоки методом вихревых токов. (Статья печатается в настоящем сборнике).
2. В. Г. Герасимов, В. Г. Хлебников. Индуктивный микрометр ИМ-1, Проект МЭИ, 1961.
3. Jaensch Klaus. Wire gage provides continuous measurement, Electronics, 33, № 7, 109—111, 1960.
4. В. Э. Дрейзин, В. К. Жуков, И. Г. Лещенко. Погрешности измерения диаметра тонких проволок методом вихревых токов. (Статья печатается в настоящем сборнике).