

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ В СПЛАВЕ ОЛОВО — МЕДЬ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В. К. ЖУКОВ, Г. В. УШАКОВ

(Представлена научным семинаром
кафедры измерительной техники)

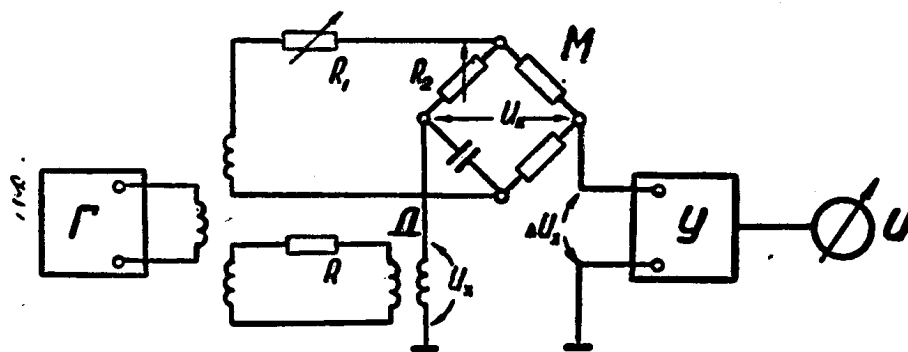
В практике производственного контроля определение состава двухкомпонентных сплавов осуществляется различными методами: химическими, физико-химическими, термоэлектрическими, электроконтактными, электромагнитными и др. Так, для сплава олово—медь эта задача на кабельных заводах, использующих сплав, решается методом химического анализа. Определение меди в сплаве Sn—Cu химическим методом требует продолжительного времени (несколько часов), поэтому возникает вопрос, а нельзя ли для этой цели применить какой-нибудь электрический метод? Нами были проведены исследования по определению процентного содержания меди в сплаве олово—медь методом вихревых токов (МВТ).

Сущность МВТ заключается в том, что при внесении проводящего тела в электромагнитное поле катушки в нем наводятся вихревые токи, создающие свое электромагнитное поле, которое изменяет величину и распределение первоначального, возбуждающего поля. Степень этого изменения зависит от электромагнитных параметров тела, его геометрической формы и размеров, наличия разного рода дефектов. Измеряя каким-либо образом изменения электромагнитного поля, можно тем самым измерять все перечисленные выше величины и, более того, измерять другие параметры тела, такие, как состав, структурное состояние и др., которые связаны функциональной зависимостью с электромагнитными свойствами материала тела.

Применительно к рассматриваемому случаю задача исследования возможностей метода сводится, во-первых, к установлению функциональной зависимости между составом сплава олово—медь и его электропроводностью и, во-вторых, к отысканию технических средств, способных регистрировать изменения электропроводности сплава, вызываемые изменением содержания в нем меди от 0 до 8%. Верхняя граница содержания меди указана, исходя из требований кабельной промышленности.

Исследование зависимости между электропроводностью сплава и его составом проводилось на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1. Чувствительным элементом установки являлся двухобмоточный токовихревой датчик с наружным диаметром катушки 12 мм и высотой 6 мм. Обмотки датчика содержали по 450 витков проволоки ПЭВ диаметром 0,12 мм. Внутри катушки располагался ферритовый сердечник диаметром 8 мм. Катушки устанавливались в бронзовом стакане, ко-

торый был выполнен таким образом, что служил одновременно высоко-частотным экраном и фиксатором положения образца.



Р и с. 1. Экспериментальная установка для исследования зависимости между электропроводностью сплава и содержанием в нем меди:

- Г — задающий генератор;
- М — фазовращающий мост;
- У — усилитель У2-4;
- И — индикаторный прибор;
- Д — датчик.

Образцы из исследуемых сплавов отливались в виде коротких цилиндров диаметром 65 мм, высотой 5, 8 и 12 мм. Нужное содержание меди в образцах получали сплавлением рассчитанных количеств лигатуры (сплав 20% Cu и 80% Sn) и чистого олова. Соответствие состава сплавов расчету проверялось химическим анализом. При этом было установлено, что различие между рассчитанным значением состава сплава и значением, полученным в результате анализа, не превышает $\pm 0,5\%$ Cu. Образцы исследуемых сплавов устанавливались на датчик.

Возбуждающая обмотка датчика подключалась к генератору синусоидальных колебаний. На выбор частоты возбуждающего тока накладываются определенные ограничения: с одной стороны, частота тока не должна быть низкой, так как это ведет к уменьшению чувствительности датчика к электропроводности материала образца и к необходимости увеличивать высоту образца, с другой стороны, частота тока не должна быть слишком высокой, чтобы не снижать чувствительности к удельной электропроводности и не увеличивать — к поверхностным микродефектам. Оптимальное значение частоты ориентировочно можно определить с помощью понятия «глубина проникновения электромагнитной волны» — δ . Для случая проникновения плоской электромагнитной волны в проводящее полупространство

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока возбуждения;

γ — удельная электропроводность

и μ — магнитная проницаемость материала изделия.

Практически можно считать, что на глубине 2δ электромагнитная волна целиком затухает. Если положить высоту образца из чистого олова равной 2δ , то можно найти частоту тока, при которой это условие будет выполняться. Она оказывается равной 3,74 кГц. Исходя из сказанного, частота возбуждающего тока в эксперименте была взята равной 4 кГц.

Величина возбуждающего тока выбрана по допустимому нагреву проволоки обмотки датчика.

Напряжение измерительной обмотки датчика при установке на него образца из чистого олова компенсируется специальным устройством, состоящим из фазовращательного моста M и добавочного сопротивления R_1 . О наступлении компенсации свидетельствует минимум отклонения стрелки выходного индикаторного прибора I . Свести до нуля показания выходного прибора при большом коэффициенте передачи усилителя не удается, даже если применить селективный усилитель, и определяются они основной 2-й гармоникой напряжений U_x и U_k . После проведения компенсации по «нулевому» образцу на датчик устанавливался образец с содержанием меди 10% и коэффициент передачи усилителя выбирался таким, чтобы выходной прибор не зашкаливал ни при каком положении образца. Затем на датчик поочередно устанавливались все исследуемые образцы.

На первой стадии исследования датчик имел симметричную конструкцию, катушки этого датчика были расположены соосно с экраном и, следовательно, реагировали на электропроводность участков образца, примыкающих к его оси. С таким датчиком интересующая нас зависимость не была найдена.

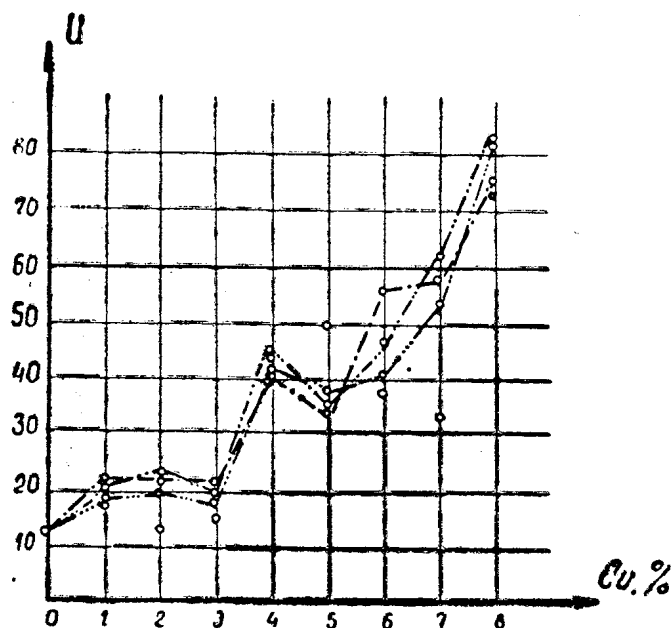


Рис. 2. Графики зависимости электропроводности от процентного содержания меди в сплаве: 1, 2, 3 — номера плавок

Тогда был изготовлен несимметричный датчик, у которого катушки смещены относительно центра экрана. При работе с таким датчиком исследованию подвергались участки образца, расположенные по окружности, с радиусом, равным расстоянию между осью катушки и осью экрана. В процессе исследования образец поворачивался, благодаря чему получали информацию о значении электропроводности на 12 локальных участках образца, расположенных по окружности с указанным выше радиусом. По отсчетам, взятым в 12-ти точках, выводились среднеарифметические значения показаний выходного прибора для каждого образца. По средним значениям строилась кривая предполагаемой зависимости (рис. 2). Дальше партия образцов подвергалась переплавке без изменения состава, и вновь проводились измерения. Результаты измерений, по-

лученные после 2-й и последующих переплавок, представлены на рисунке 2.

Анализируя кривые рис. 2, можно сделать два вывода: во-первых, кривые не повторяются, во-вторых, заметна корреляционная зависимость между электропроводностью сплава и содержанием в нем меди.

Коэффициент корреляции увеличивается при увеличении числа точек измерения и количества переплавок. Из этого же рисунка видно, что результат измерения, найденный по 12 точкам, отличается от «истинного» значения не более, чем на 1%. Таким образом, если измерение электропроводности образцов проводить в нескольких точках, то можно утверждать, что среднее значение электропроводности сплава Sn—Cu связано корреляционной зависимостью с процентным содержанием меди и по величине средней электропроводности с погрешностью $\pm 1\%$ Cu, можно судить о процентном содержании меди в сплаве.

Полученные на основании экспериментальных исследований выводы были использованы при разработке прибора. Блок-схема созданного прибора аналогична блок-схеме экспериментальной установки и содержит: генератор, токовихревой несимметричный датчик, компенсирующее устройство, избирательный усилитель, узел индикации и стабилизированный выпрямитель (рис. 3).

Блок генератора служит для питания первичной обмотки токовихревого датчика и компенсирующего устройства напряжением частотой 4 кГц. Задающий генератор блока выполнен по схеме «емкостной трехточки» на транзисторе T_1 . Сигнал с контура генератора поступает на вход резонансного усилителя, который настроен на первую гармонику выходного напряжения генератора. Применение резонансного усилителя и введение кольца отрицательной обратной связи позволяют уменьшить коэффициент гармоник в выходном напряжении генератора.

Компенсирующее устройство включает в себя фазовращающий мост, переменное сопротивление R_{10} и предназначено для подбора модуля и фазы компенсирующего напряжения, которое сравнивается с напряжением на вторичной обмотке катушки датчика. При $|U_x| = |U_k|$ и $\varphi_x = \varphi_k$ входной сигнал недокомпенсации будет отсутствовать.

Избирательный усилитель предназначен для селективного усиления сигнала недокомпенсации и выполнен на транзисторах T_3 — T_6 . Каскад на транзисторе T_6 является избирательным с LC —контуром в коллекторной цепи. Усилитель охвачен цепью отрицательной обратной связи для улучшения стабильности коэффициента усиления и уменьшения величины нелинейных искажений. Общий коэффициент передачи усилителя равен $\sim 10\,000$.

Усиленное напряжение с выходного каскада (T_6) поступает на детектор среднего значения (D_2 , C_{20}) и далее через фильтр R_{32} , C_{21} на вход усилителя постоянного тока (T_7). Между коллектором УПТ и делителем R_{37} , R_{38} , используемым для компенсации тока покоя, включен показывающий прибор. Для защиты прибора от перегрузок, возникающих при снятии изделия с датчика, используется поляризованное реле Р.

Дополнительные исследования, проведенные с разработанным прибором, показали, что он обеспечивает измерение процентного содержания меди в сплаве Sn—Cu с погрешностью $\pm 1\%$ Cu в диапазоне $0 \div 10\%$ Cu.

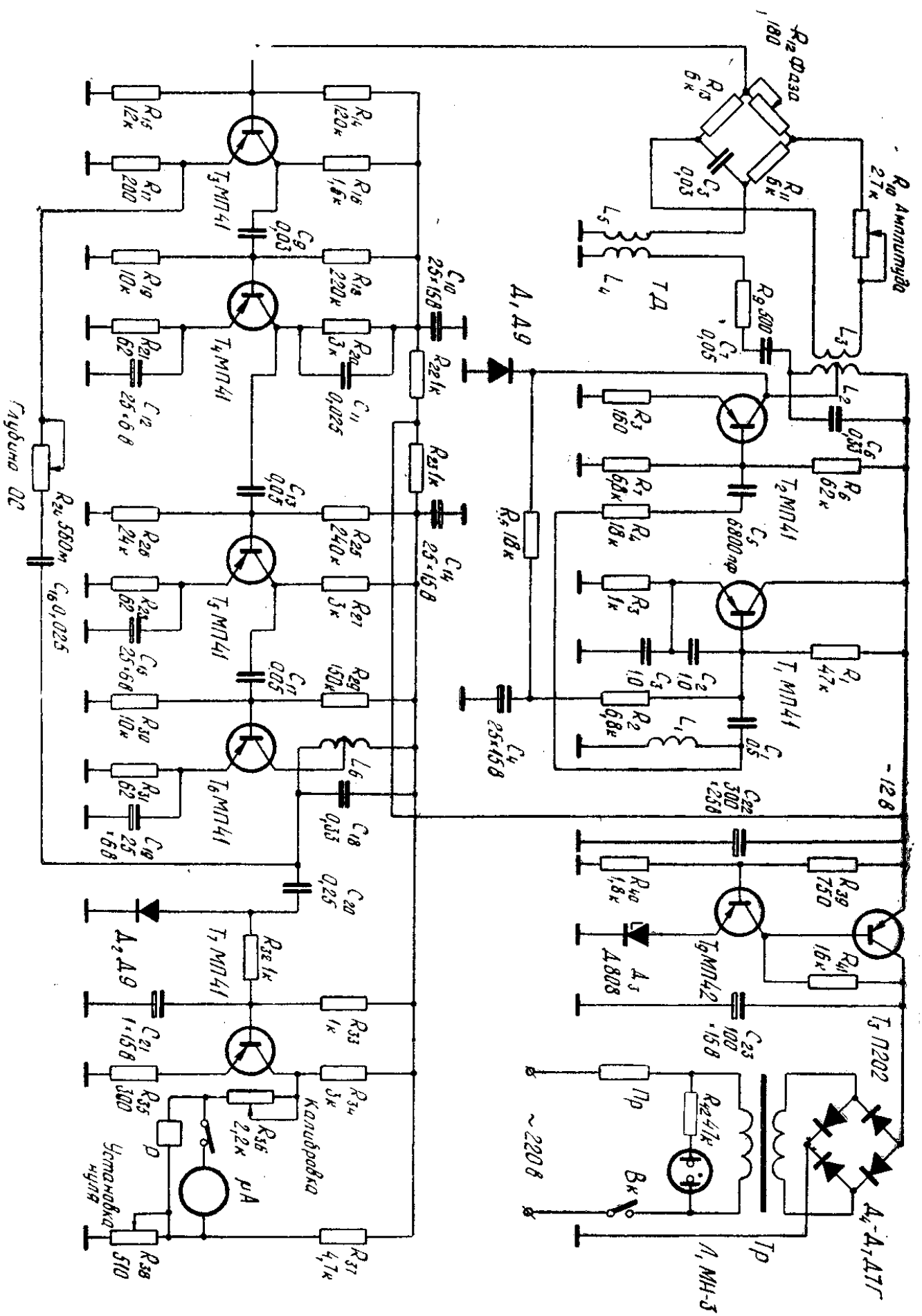


Рис. 3. Принципиальная схема разработанного токовольтового прибора.