

Некоторые пояснения по применению тесламетров-веберметров ТПУ-2В

Ю.И. Казанцев, к.т.н., технический директор, ООО «ЗЭТ», kazantsev@zel-zet.ru

Тесламетр-веберметр универсальный ТПУ-2В, как и следует из его названия, предназначен для измерений магнитной индукции и магнитного потока.

В измерениях магнитной индукции постоянного, переменного и импульсного магнитного поля с использованием измерительных зондов с преобразователями Холла нет никаких особенностей. Отметим, что верхний предел частоты измеряемой магнитной индукции, для которой мы нормируем погрешность, определяется в том числе частотным диапазоном, для которого ВНИИМ им. Д.И. Менделеева указал при поверке метрологические характеристики рабочего эталона единицы магнитной индукции ООО «ЗЭТ».

В ряде случаев может оказаться более удобным использовать для измерений переменных и импульсных полей индукционный измерительный зонд с преобразователем в виде печатной четырехслойной измерительной катушки, который входит в состав ТПУ-2В. Его особенностью, как известно, является то, что чувствительность такого преобразователя пропорциональна частоте измеряемого магнитного поля, что позволяет измерять сравнительно слабые магнитные поля килогерцового диапазона частот. Этот же измерительный зонд можно использовать и для измерений постоянных магнитных полей путем быстрого удаления зонда из измеряемого поля в режиме работы прибора «Тесламетр».

Интересен вопрос о точности измерений, приписываемой веберметрам.

Понятно, что нельзя говорить о погрешности, например, холловского тесламетра, не проведя калибровку (поверку) прибора в целом (электронный тракт плюс подключенный к нему первичный измерительный преобразователь Холла, в терминах РМГ 29-2013 – «измерительная цепь»). При этом физические и метрологические характеристики преобразователя Холла играют важнейшую роль. Совершенно другой подход исторически сложился при калибровках (поверках) веберметров.

По выражению академика В.Ф. Миткевича, «магнитное поле есть пространство, заполненное магнитным потоком» (Магнитный поток и его преобразования, М., 1946, стр. 11). В настоящее время не существует способов непосредственного преобразования неизменяющегося магнитного потока в какую-либо поддающуюся прямым измерениям физическую величину. Как и все веберметры, тесламетр-веберметр ТПУ-2В в режиме измерений «Веберметр» измеряет интеграл ЭДС, точнее говоря, напряжения, которое индуцируется в подключенной к прибору измерительной катушке при изменении сцепляющегося с ней магнитного потока. Т.е., прибор просто является интегратором напряжения на его входе за заданный отрезок времени. Веберметром он становится только, когда учитывается информация о числе витков используемой измерительной катушки.

При калибровке (поверке) веберметров методом прямых измерений магнитного потока, воспроизводимого рабочим эталоном единицы магнитного потока, как это указано в МИ 1930-88, определяют погрешность интегратора, подключенного непосредственно к вторичной обмотке эталона. По «Методике калибровки веберметров и катушек магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ Вб до $1 \cdot 10^{-2}$ Вб», ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, поверяемый веберметр подключают к вторичной обмотке эталонного делителя магнитного потока ДМП-1 из состава рабочего эталона единицы магнитного потока ВЭТ 12-1-85. Погрешности воспроизведения значений магнитного потока рабочими эталонами существенно меньше погрешности поверяемых приборов. Поэтому оцениваемая при калибровке (поверке) погрешность практически не включает в себя погрешность первичного измерительного преобразователя, преобразующего изменение измеряемого магнитного потока в электрическое напряжение. Роль этого преобразователя исполняет вторичная обмотка эталона. В дальнейшем при эксплуатации поверенного прибора предполагается, что пользователь обеспечивает пренебрежимо малые значения возможных дополнительных погрешностей, которые обусловлены не зависящими от изготовителя веберметра причинами и не могут учитываться при его поверке (калибров-

ке). Другими словами: погрешность, например, холловского тесламетра – это, при исключении методических погрешностей, погрешность измерений магнитной индукции; погрешность веберметра – это отнюдь не погрешность измерений магнитного потока.

Ну и чтобы совсем уже было понятно, что же определяется при калибровке (поверке) веберметров на самом деле. Напомним, что размерность вебера – произведение вольт \times секунда. ГОСТ 8.030-2013 допускает использовать в качестве рабочего эталона единицы магнитного потока 1-го разряда калибратор магнитного потока в виде генератора импульсов ЭДС, градуированного в веберах. Метод удобен своей помехозащищенностью и тем, что нет необходимости в переключениях проводов от катушек. В России пользуются установками У1855М, которые выпускались в СССР. Компания Walker Scientific Inc. (США) выпускает Precision Volt-Second Generator МТС-1, градуированный в вольт-секундах и в максвелл-витках ($1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Мкс}$), и декларирует прослеживаемость прибора к эталонам NIST вольта и секунды, а вовсе не к эталону вебера. При поверке по такому калибратору проверяется именно погрешность измерения интегратором вольт-секундной площади импульса напряжения – при разряде конденсатора в У1855М, прямоугольного импульса в МТС-1.

Способ, реализованный в МТС-1, используем и мы. Постоянное напряжение, которое подается на вход ТПУ-2В, воспроизводится калибратором напряжения 5522А (компания Fluke), а время интегрирования задается оператором по тактовому генератору блока цифровой обработки измерительной информации, который создан на базе кварцевого генератора VХ7 с годовой нестабильностью менее $5 \cdot 10^{-5}$. Калибратор 5522А при его поверке прослеживается к государственному эталону вольта, частотомер, которым мы проверяем тактовый генератор – к государственному эталону секунды. Прослеживаемость ТПУ-2В в режиме «Веберметр» к государственному первичному эталону единиц магнитных величин ГЭТ 12-2011 (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) обеспечивается тем, что мы используем также поверенную на этом эталоне меру взаимной индуктивности (меру магнитного потока) Р5009 с действительным значением $0,009975 \text{ Вб/А}$, которая аттестована нами в качестве рабочего эталона 1 разряда единицы отношения магнитного потока к силе тока.

Итак, при поверке (калибровке) мы подтверждаем (определяем) погрешность измерений не магнитного потока, а интеграла напряжения (потому что интегратор имеет конечное входное сопротивление) на входе прибора за заданный отрезок времени. К этой погрешности, когда мы говорим об измерении магнитного потока (магнитной индукции), следует добавить погрешность определения числа витков в измерительной катушке (и ее средней площади). Не надо забывать, что, например, ошибка (хоть бы даже в силу человеческого фактора) в количестве витков всего на 1 при 100 витках в катушке означает погрешность 1 %.

Тесламетр-веберметр ТПУ-2В позволяет проводить измерения магнитных характеристик магнитомягких и магнитотвердых материалов, в т.ч. по международным стандартам IЕС 60404-4:2008, IЕС 60404-5:2015, IЕС 60404-7:1982, IЕС 60404-14:2002. Методы, рекомендованные IЕС 60404-14:2002 («Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method»), широко применяются при измерениях характеристик образцов постоянных магнитов на основе соединений SmСо и сплавов Nd-Fe-B. В приборе предусмотрена возможность введения в его память характеристик используемых пользователем колец Гельмгольца и объема исследуемых образцов и вычисления дипольного момента и намагниченности образца.

Попеременно переключая режимы работы «Тесламетр» – «Веберметр» (время перехода от одного режима измерений к другому составляет 1 – 1,5 мин), можно использовать ТПУ-2В для измерений магнитной индукции (напряженности) приложенного магнитного поля и магнитной индукции (намагниченности) в образце при снятии петель гистерезиса магнитных материалов, т.е. в качестве средств измерений в гистерезисографе.

В заключение отметим, что мы неудачно сформулировали и записали в описание типа ТПУ-2В выражение для пределов допускаемой относительной погрешности измерений потокосцепления (магнитного потока): $\delta_0 = \pm [0,5 + 0,1 (\Psi_n / \Psi_n - 1)]$. В соответствии с этим выражением, когда измеряемое значение заметно меньше установленного предела измерения,

допускаемая погрешность сильно увеличивается, как это обычно бывает при недостатке рядов преобразования и индикации. Это не соответствует реальным погрешностям измерений, которые, как показала практика, оказались существенно ниже вычисляемых по приведенной формуле. Мы рекомендуем пользователям (это относится также к режиму работы прибора «Тесламетр»):

- не забывать определение термина в РМГ 29-2013: «7.7 предел допускаемой погрешности измерений: наибольшее значение погрешности средства измерений (без учета знака), устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается метрологически исправным» (т.е., это не фактические характеристики данного экземпляра средства измерений, а именно разрешенные допуски);

- пользоваться опцией индикации СКО измерений, которой снабжен ТПУ-2В, что позволяет оценить и учесть реальное значение мультипликативной составляющей погрешности;

- пользоваться фактическими данными, приведенными в протоколе поверки прибора.

И еще одно замечание по режиму «Веберметр». Иногда желательно установить более низкий предел измерения магнитного потока (более высокий коэффициент усиления блока усилителя), при этом напряжение, снимаемое с используемой измерительной катушки, оказывается выше допускаемого напряжения на входе блока усилителя. О наступлении такой ситуации будет говорить сообщение о перегрузке, индицируемое на дисплее прибора, либо обрезанный импульс напряжения на графике, тоже индицируемом на дисплее. В этом случае следует подсоединить параллельно измерительной катушке неполярный конденсатор с малыми потерями такой емкости, чтобы амплитуда импульса не превышала допускаемого напряжения на входе блока усилителя.