



## Возможности и особенности веберметра (флюксметра) портативного ТВП-2

Веберметр (флюксметр, интегратор) ТВП-2 производит цифровое интегрирование ЭДС самоиндукции в измерительной катушке, подключенной к прибору, при изменении магнитного потока, который сцепляется с витками измерительной катушки (потокосцепления), за заданное время интегрирования. Строго говоря, интегрируется напряжение на входе веберметра, который имеет активное (в полосе частот до 100 кГц) входное сопротивление 40 кОм. Размерность измеряемой величины: В·с (Вб). Для корректного измерения потокосцепления не обязательно знать параметры измерительной катушки, достаточно обеспечить условия, при которых происходит интегрирование всего импульса ЭДС независимо от его амплитуды, длительности и формы. Погрешность измерения потокосцепления, нормируемая изготовителем веберметра ТВП-2, определяется погрешностью интегрирования импульса ЭДС самоиндукции.

По результатам измерений потокосцепления  $\Psi$  веберметр ТВП-2 может производить вычисление и индикацию следующих магнитных величин:

- магнитный поток  $\Phi = \Psi/w$  через измерительную катушку (при допущении, что катушка находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости поперечного сечения катушки), для чего в память веберметра следует внести количество витков в катушке  $w$ . Для удобства пользователей измеренное потокосцепление (интеграл импульса ЭДС) индицируется в единицах В·с, вычисленный магнитный поток – в Вб;

- магнитную индукцию магнитного поля  $B$  при подключении к веберметру измерительной катушки с известными постоянной  $K_1$ , Вб/Тл ( $B = \Psi/K_1$ ), или числом витков и площадью поперечного сечения катушки  $S$ , м<sup>2</sup>, формула  $B = \Psi/(S \cdot w)$ , при указанном выше допущении;

- напряженность магнитного поля  $H$ , А/м, путем деления магнитной индукции  $B$ , Тл, на магнитную постоянную  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;

- дипольный магнитный момент ферромагнитного образца  $m$ , Вб·м, путем деления измеренного потокосцепления  $\Psi$  с катушкой однородного магнитного поля (например, катушкой Гельмгольца) на постоянную катушки по напряженности магнитного поля  $K_2$ , м<sup>-1</sup>, при удалении образца из центрального объема катушки в зону вне катушки (или развороте образца на 180°) и соответствующем изменении магнитного потока образца, сцепляющегося с катушкой (см. международный стандарт IEC 60404-14:2002):  $m = \Psi/K_2$ ;

- магнитную поляризацию образца  $j$ , Тл, известного объема  $V$  в соответствии с выражением  $j = m/V$  (которое, строго говоря, справедливо только для эллипсоидов вращения, намагниченных в однородном магнитном поле).

Иногда полезно различать магнитный момент витка  $M$ , А·м<sup>2</sup>, и диполя  $m$ , Вб·м, а также интенсивность намагничения  $J$ , А/м, и магнитную поляризацию  $j$ , Тл. Размерности указанных величин зависят от способов представления магнитного состояния материала: в ГОСТ 21559-76 и стандартах серии IEC 60404, в т.ч. IEC 60404-5:2015 «Magnetic materials – Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties» используется соотношение  $B = \mu_0 H + j$ , т.е. величина  $j$  имеет размерность магнитной индукции; в физике же больше принято соотношение  $B = \mu_0(H + J)$  т.е. величина  $J$  имеет размерность напряженности магнитного поля. Понятно, что  $m = \mu_0 \cdot M$ ;  $j = \mu_0 \cdot J$ .

Основные технические характеристики веберметра ТВП-2

Диапазон измерений и показаний от 1·мкВб (1 мкВ·с) до 10 Вб (10 В·с).

Пределы измерений и показаний: 0,1·10<sup>-3</sup>; 1·10<sup>-3</sup>; 10·10<sup>-3</sup>; 100·10<sup>-3</sup>; 1; 10 Вб (10 В·с).

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений магнитного потока:

- в диапазоне измерений от 2 до 10 мкВб (мкВ·с) включительно 2,5 %;
- в диапазоне измерений свыше 10 мкВб (мкВ·с): 1,0 %.

Время интегрирования: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 10 с.

#### Особенности веберметра ТВП-2:

- возможна сигнализация о том, что контролируемый параметр вышел за допуск, установленный оператором (удобно, например, при разбраковке постоянных магнитов);
- возможны запись и хранение всех переменных параметров в десяти ячейках памяти;
- имеется связь с внешним компьютером (интерфейс USB), в поставку входит соответствующее ПО. Для автоматизации процесса измерений и интеграции ТВП-2 в измерительные установки предоставляются библиотеки с примерами использования;
- наибольшее допускаемое входное напряжение 100 В;
- защита по входу от воздействия кратковременных перенапряжений до 1000 В.

#### О погрешности измерений веберметра.

Понятно, что нельзя говорить о погрешности, например, тесламетра Холла, 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 электрофизические параметры конкретного преобразователя Холла играют важнейшую роль. В тесламетре Холла измеряемая магнитная индукция непосредственно преобразуется первичным измерительным преобразователем в холловское напряжение, которое после обработки сигнала индицируется в единицах магнитной индукции.

В настоящее время не существует способов непосредственного преобразования неизменяющегося магнитного потока в какую-либо поддающуюся прямым измерениям физическую величину. Измеряется приращение магнитного потока (потокосцепления с витками измерительной катушки) за заданный отрезок времени, для чего производится интегрирование за это время ЭДС, индуцированной в катушке.

В разделе 1 «Область применения» ГОСТ 8.030-2013 указано: «В настоящем стандарте под магнитным потоком понимают потокосцепление с витками измерительной обмотки». При поверках производится не передача размера единицы физической реальности – магнитного потока, а определяются погрешности интегрирования входного сигнала веберметра (импульса напряжения с калиброванными формой и амплитудой), т.е. измерения интеграла по времени приращения потокосцепления. См. также рекомендацию МИ 1930-88 «Веберметры. Методика поверки», 1989 г.

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 полярности выводов катушек. В России в основном используются установки 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 ( $1 \text{ В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Мкс}$ ), и декларирует прослеживаемость прибора к эталонам NIST вольта и секунды, а вовсе не к эталону вебера, которого у США нет. При поверке по таким калибраторам проверяется именно погрешность измерения интегратором вольт-секундной площади импульса напряжения – при разряде конденсатора в установке У1855М или прямоугольного импульса в МТС-1.

ООО «Завод электронной техники» использует аналогичную методику поверки веберметра ТВП-2. Постоянное напряжение, которое подается на вход веберметра ТВП-2, воспроизводится источником постоянного тока и напряжения прецизионным GS210 (компания Yokogawa Electric Corp., Япония), а время интегрирования устанавливается по тактовому генератору блока цифровой обработки измерительной информации, который создан на базе кварцевого генератора VX7 с годовой нестабильностью менее  $5 \cdot 10^{-5}$ . Источник GS210 при его поверке прослеживается к государственному эталону вольта, частотомер, которым проверяется тактовый генератор – к государственному эталону секунды. Напряжение на входе веберметра и время интегрирования задаются оператором в соответствии с методикой поверки РТ-МП-5822-551-2019, утвержденной ФБУ «Ростест-Москва».

Прослеживаемость веберметра ТВП-2 к государственному первичному эталону единиц магнитных величин ГЭТ 12-2011 (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) обеспечивается тем, что при поверке веберметра в ряде точек начала диапазона размер единицы воспроизводится

рабочим эталоном 1 разряда единицы отношения магнитного потока к силе тока, в качестве которого аттестована мера взаимной индуктивности P5009 с действительным значением 0,009975 Вб/А, которая поверяется на эталоне ГЭТ 12-2011.

Итак, при поверке веберметра ТВП-2, как и любого веберметра, проверяется погрешность измерения не магнитного потока, а интеграла импульса ЭДС (напряжения, потому что интегратор имеет конечное входное сопротивление) на входе прибора за заданный отрезок времени. К этой погрешности, в зависимости от того, об измерении какой магнитной величины идет речь, следует добавить погрешность определения постоянной  $K_1$ , Вб/Тл, или числа витков  $w$  и средней площади измерительной катушки  $S$  при измерении магнитного потока (магнитной индукции, напряженности магнитного поля) или погрешность определения постоянной  $K_2$ ,  $m^{-1}$  катушки Гельмгольца при определении магнитного момента образца. Не следует также забывать погрешности принятого метода измерений, в которых используется веберметр (например, при измерениях магнитного момента образца по ИЕС 60404-14:2002 – погрешность, обусловленную тем, что образец оказался в катушке Гельмгольца вне зоны наилучшей однородности магнитного поля), для которой определено значение  $K_2$ .

Несколько пояснений по применению веберметра ТВП-2.

ЭДС самоиндукции тем больше, чем больше скорость изменения магнитного потока. Даже при незначительном магнитном потоке (порядка 1 мВб и меньше), который сцепляется с измерительной катушкой, ЭДС самоиндукции в катушке, обусловленная быстро изменяющимся магнитным потоком, может достигать существенных значений в единицы, десятки и более вольт. Поэтому диапазон измерений веберметра и его динамический диапазон по напряжению могут быть слабо между собой связаны. В процессе измерений веберметр производит сравнение результатов измерений входного напряжения с динамическим диапазоном АЦП на выбранном пределе измерений. По итогам этого сравнения на дисплее веберметра появляется либо результат измерений потокосцепления, либо информация о перегрузке, либо указание о возможности перейти на более чувствительный предел измерений.

При необходимости можно установить более чувствительный предел измерения (соответственно, при этом будет более низким допускаемое входное напряжение), более адекватный измеряемому значению потокосцепления, для чего следует растянуть энергию импульса ЭДС самоиндукции во времени. Наибольшее значение входного напряжения при этом уменьшится, а интеграл этого напряжения останется практически неизменным. Для этого следует подсоединить параллельно измерительной катушке неполярный конденсатор с малыми потерями (чтобы не допустить потери точности) и подобрать его емкость так, чтобы амплитуда импульса не превышала желаемого значения.

Следует помнить, что погрешность измерений веберметра, нормированная изготовителем, может быть реализована только при достаточно низком уровне электромагнитных помех, воздействующих на веберметр и подключенные к нему катушки. Желательно, чтобы оценка уровня СКО на дисплее веберметра не превышала 5 – 10 %. В противном случае следует проводить многократные измерения одного и того же значения и вычислять его среднее арифметическое, такая возможность в веберметре ТВП-2 предусмотрена. Если какое-либо измеренное значение выпадает из ряда измерений в меньшую сторону, полезно просмотреть измерительный сигнал на входе веберметра (для чего в приборе предусмотрена соответствующая опция). Можно увидеть, что при большой зашумленности сигнала и неудачно выбранном времени интегрирования процесс интегрирования иногда начинается уже после появления на входе веберметра импульса напряжения или заканчивается до окончания импульса, т.е. импульс интегрируется не полностью. Этот результат измерения следует отбросить.

*Регистрационный номер (номер в госреестре СИ) веберметра (флюксметра) портативного ТВП-2: 75099-19.*