

СОЗДАНИЕ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ИНДУКТИВНОСТИ

Коломиец Т. А., Казакова Е. А., Говоровская А. Ю., Романюк Т. Г.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
РУП «Белорусский государственный институт метрологии», Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время на предприятиях и в организациях Республики Беларусь эксплуатируется большая номенклатура средств измерений индуктивности, это: мосты переменного тока, измерители емкости и индуктивности, меры индуктивности, магазины индуктивности, универсальные цифровые вольтметры, а также многофункциональные калибраторы и мультиметры.

Для организации производства и метрологического обеспечения выпуска и эксплуатации этих средств измерений создан эталон единицы индуктивности, который по своим метрологическим характеристикам соответствует национальным и международным требованиям.

При создании эталона рассматривались наиболее распространенные методы воспроизведения и измерения единицы индуктивности:

Метод вольтметра–амперметра является простейшим методом измерения индуктивности. Метод вольтметра–амперметра по существу сводится к закону Ома, по которому измеряемое сопротивление пропорционально падению напряжения на нём и обратно пропорционально току, проходящему через него. При измерении индуктивности катушки методом вольтметра–амперметра необходимо, чтобы ее активное сопротивление было значительно меньше ее реактивного сопротивления [1]. Данный метод не обеспечивает высокую точность результатов.

Резонансный метод используется для высокочастотных катушек индуктивности в диапазоне их рабочих частот. Он основан на измерении параметров колебательного контура, составленного из рабочего (эталонного) элемента и исследуемой цепи. Резонансная схема обычно включает в себя генератор высокой частоты, индуктивно или через емкость связанный с измерительным LC-контуром. При резонансном методе измерения индуктивности катушки должны быть известны емкость эталонного конденсатора и частота генератора, на которую настроен контур в резонанс [2]. Достоинством резонансного метода является то, что он позволяет производить измерения в широком диапазоне частот (от долей до сотен мегагерц). Важная особенность метода — возможность определить действующие значения параметров, т. е. фактические значения сопротивления, индуктивности или емкости на зажимах исследуемой цепи с учетом паразитных составляющих ее эквивалентной схемы. Кроме того, по результатам измерений на нескольких

частотах можно определить паразитные параметры измеряемых элементов собственной (межвитковую) емкость катушки, собственную индуктивность конденсатора и т. п.

Мостовой метод измерения, дающий наиболее точные результаты измерения индуктивности, основан на автоматической балансировке моста. Для этого метода применяют уравновешенные мосты переменного тока. Измерение производят балансированием моста в результате попеременной подстройки двух его плеч.

Мосты, предназначенные для измерения параметров катушек индуктивности, формируются из двух плеч активного сопротивления, плеча с объектом измерений, сопротивление которого в общем случае является комплексным, и плеча с реактивным элементом — конденсатором или катушкой индуктивности.

Наиболее распространенным мостом переменного тока для измерения индуктивности является мост Максвелла–Вина.

Мост Максвелла–Вина позволяет сравнивать эталоны индуктивности (L) с эталонами емкости на известной точно рабочей частоте. Эталоны емкости применяются в измерениях высокой точности, поскольку они конструктивно проще прецизионных эталонов индуктивности, более компактны, их легче экранировать, и они практически не создают внешних электромагнитных полей.

К недостаткам данного вида измерителей можно отнести работу на одной (фиксированной) частоте.

Одной из проблем, возникающих при использовании моста Максвелла–Вина, является возникновение взаимоиндукции между измеряемой индуктивностью и другими элементами схемы, или же электромагнитные наводки, приводящие к искажениям результатов измерений. В сбалансированном мосте индуктивное сопротивление измеряемой катушки прямо противоположно емкостному сопротивлению конденсатора, что позволяет точно измерить параметры неизвестной индуктивности.

Преимущества измерения при использовании моста Максвелла–Вина: точность, возможность независимо воспроизводить единицу при обоих номинальных значениях, отсутствие частоты в уравнении измерения, простота схемы и возможность поэлементной аттестации резисторов и конденсаторов в плечах моста.

Мостовые измерители индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений имеют ряд идентичных элементов. Поэтому они часто совмещаются в одном приборе — универсальном измерительном мосте.

Традиционно сравнение параметров эталонных мер импеданса, воспроизведение единиц этих параметров и передача их размера производятся при помощи комплекса очень сложных и разнообразных по конструкции мостов переменного тока.

Хранение единицы индуктивности, размер которой получают косвенным методом через единицы емкости и сопротивления, осуществляется с помощью тороидальных катушек индуктивности, составляющих групповой эталон. Для воспроизведения и передачи размера каждый из эталонов включает соответствующие компараторы специфической конструкции.

Требования к создаваемому эталону исходили из сравнительной характеристики функционирующих эталонов единицы индуктивности в России, Казахстане и в Украине.

В период с 10.2012 года по 06.2014 год был создан эталон индуктивности, состоящий из измерителей импеданса, предназначенных для передачи размера единицы, и мер индуктивности, предназначенных для хранения и воспроизведения единицы индуктивности, а именно из:

1) комплекса эталонного оборудования для хранения значения индуктивности в диапазоне от 10^{-6} до 10 Гн на частоте 1 кГц:

– комплекта термостатированных мер индуктивности 10 мГн и 100 мГн;

– комплекта мер индуктивности серии 1482 в диапазоне от 10^{-6} до 10 Гн;

2) комплекса эталонного оборудования для передачи значения индуктивности в диапазоне от 0,001 нГн до 99,99999 Гн в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц:

– прецизионного LCR-метра 7600;

– прецизионного RLC-моста 1693;

3) дополнительного оборудования:

– комплекта мер индуктивности эталонных P596 в диапазоне от 10^{-6} до 1 Гн на частоте 1 кГц;

– комплекта катушек индуктивности измерительных P547 с номиналами от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до 1 Гн;

– комплекта эталонных мер индуктивности L-0170-2 с номиналами от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до 0,2 Гн;

– прецизионного компаратора RLC STANDART COMPARATOR в комплекте с магазином термостатированных эталонных мер электрической емкости от 1 нФ до 1 мкФ и мер электрического сопротивления (активного) в диапазоне от 1 Ом до 10 МОм;

– термостатированной камеры 9300А;

В качестве национального эталона индуктивности применяется эталонный комплект термостатированных мер. Национальный эталон обеспечивает хранение единицы индуктивности со средним квадратическим отклонением (СКО) результатов не превышающим $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-6}$. Нестабильность эталонных мер за год составляет не более $1 \cdot 10^{-5}$.

Национальный эталон используется для передачи размера единицы рабочему эталону методом сличения (замещения) при помощи компаратора.

Комплект мер индуктивности серии 1482 с номинальными значениями от $1 \cdot 10^{-6}$ до 10 Гн используется в качестве рабочего эталона. Случайная погрешность S_0 составляет от $1 \cdot 10^{-5}$ до $30 \cdot 10^{-5}$. Рабочий эталон применяется для поверки/калибровки эталонных средств измерений 1 разряда при помощи компаратора методом прямых измерений.

Дополнительное оборудование обеспечивает передачу размера единицы индуктивности от $1 \cdot 10^{-6}$ до 10 Гн в диапазоне частот от 40 Гц до 1 МГц.

Обработка результатов поверки/калибровки проводится с применением специально разработанного программного обеспечения.

В результате проведенных исследований метрологических характеристик составных частей эталона установлено, что:

– эталон обеспечивает хранение и передачу единицы индуктивности от 1 мкГн до 10 Гн на частоте от 40 Гц до 1 МГц;

– среднее квадратическое отклонение результатов измерений индуктивности при частоте 1 кГц не превышает значений от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-6}$;

– годовая нестабильность эталонных мер не превышает значений от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-6}$.

Создание и внедрение эталона обеспечило повышение точности измерения индуктивности и качества метрологического обслуживания отраслей народного хозяйства в Республике Беларусь; единство измерений; улучшение и совершенствование точностных характеристик вновь разрабатываемых СИ и подтверждение метрологических характеристик импортных СИ, поступающих в Республику Беларусь; развитие приборостроения в области измерения электрических величин; подтверждение наилучших возможностей при калибровке; возможность участия в сличениях и признания результатов калибровки на международном уровне.

1. Терешин Г. М. «Радиоизмерения».
2. Сурду М. Н., Ахмадов А. А., Ахмадов С. А., Курсин С. Н., Ламеко А. Л., Мухаровский М. Я. «Прецизионный компаратор для воспроизведения единицы индуктивности и передачи ее размера в диапазоне значений».