

УДК 537.214.089.68(045)

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

Коломиец Т.А., Казакова Е.А., Сосновская Т.Г.

Белорусский государственный институт метрологии, г. Минск, Республика Беларусь

В период с 2008 по 2010 гг. в Белорусском государственном институте метрологии создан Национальный эталон единицы электрической емкости. В работе рассмотрены основные этапы создания Национального эталона единицы электрической емкости. Представлен состав эталона, его метрологические характеристики и результаты их исследований с момента создания эталона по настоящее время. (E-mail: kolomiets@belgim.by)

Ключевые слова: электрическая емкость, меры емкости, воспроизведение единицы, передача единицы, мост электрической емкости.

Введение

В настоящее время на предприятиях и в организациях Республики Беларусь эксплуатируется большая номенклатура средств измерения (СИ) электрической емкости. На начало 2008 г. производственно-исследовательский отдел измерений электрических величин БелГИМ располагал двумя мерами емкости 1-го разряда с номинальными значениями 100 и 1000 пФ, комплектом мер электрической емкости 2-го разряда и мостом переменного тока, эксплуатируемыми с 1973 г. Проведение сличений в этой области показало, что для метрологического обеспечения нового поколения разрабатываемых высокоточных СИ электрической емкости, как отечественных, так и зарубежных, которые находят широкое применение на предприятиях и в организациях Беларуси, имеющиеся эталоны недостаточно соответствуют современным требованиям как по точности, так и по техническому исполнению. Поэтому потребовалось создание эталона электрической емкости, укомплектованного высокоточным оборудованием, способным на порядок повысить уровень точности измерения электрической емкости на всех ступенях передачи размера единицы электрической емкости.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие методы воспроизведения емкости.

1. *Метод расчетного конденсатора.* В основе метода лежит теорема Томпсона–Лампарда: если поперечное сечение некоторой произвольной цилиндрической оболочки, имеющей по крайней мере одну ось симметрии, разделено на четыре части двумя взаимно перпендикулярными прямыми, лежащими в плоскостях, линия которых параллельна образующим цилиндрической оболочки, то емкости на единицу длины между противоположными сторонами будут равны. В основу такого эталона входит расчетный конденсатор, в котором изменение емкости, определяющее размер единицы, осуществляется путем электрической коммутации и механического перемещения электродов и определяется расчетным путем по геометрическим размерам электродов, скорости света и магнитной постоянной.

Передача размера единицы от расчетного конденсатора к конденсаторам вторичных эталонов осуществляется с помощью установок на базе мостов переменного тока.

Принципиальным достоинством эталона электрической емкости на основании расчетного конденсатора является возможность воспроизведения единицы емкости в абсолютной мере – через основную единицу Международной системы единиц SI – метр. В то же время эталон на расчетном конденсаторе представляет собой достаточно сложную конструкцию, изготовить которую на необходимом тех-

нологическом и метрологическом уровнях – достаточно трудная и дорогостоящая задача.

2. *Метод воспроизведения электрической емкости на основании квантового эффекта Холла.* Данный метод является самым точным методом воспроизведения единицы электрической емкости. Уникальность применения для метрологии квантового эффекта Холла и фундаментальных физических констант заключается в том, что при корректной реализации он позволяет воспроизводить значение электрического сопротивления с очень большой точностью. После того как в ходе международных сличений Международное бюро мер и весов (МБМВ) продемонстрировало точность связи на основе квантового сопротивления Холла с емкостью 10 и 100 пФ, этот метод был предложен для создания эталонов. Данная работа требует проведения измерений квантового сопротивления Холла при частоте 1,6 кГц. Метод является дорогостоящим. Реализация эффекта Холла – это сложная инфраструктура криогенной техники для получения жидкого азота и гелия, специальные холловские структуры металл-диэлектрик-полупроводник, технологией изготовления которых не владеет ни одна страна СНГ; это сильные и высокостабильные магнитные поля, специально оборудованные помещения, сложная электрическая и электронная техника.

3. При создании эталона единицы электрической емкости национальные метрологические институты используют прецизионную технику производителей ведущих фирм, имеющую в своем составе эталонные средства для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы и обеспечения функционирования эталона. Таким образом, эталон хотя и не воспроизводит автономно размер единицы, однако он способен «принять» и «хранить» единицу электрической емкости, реализованную другими способами.

Национальный эталон единицы электрической емкости: состав, основные метрологические характеристики и результаты их исследования

Анализ способов воспроизведения и хранения электрической емкости и учет того, что эталон единицы электрической емкости относится к эталонам производных единиц, а также экономического развития Республики Беларусь

на данный период времени и потребности в такого рода измерениях, показали, что самым рентабельным и целесообразным для создания эталона является использование третьего подхода.

Национальный эталон единицы электрической емкости состоит:

- из комплекса эталонного оборудования для хранения опорного значения единицы электрической емкости и тангенса угла потерь;

- комплекса эталонного оборудования для измерения электрической емкости методом замещения;

- комплекса эталонного оборудования для хранения и передачи единицы электрической емкости с номинальными значениями емкости от 1 пФ до 10 мФ и тангенса угла потерь в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до 1;

- вспомогательного оборудования, состоящего из системы кондиционирования, ПЭВМ.

Комплекс эталонного оборудования для хранения опорного значения единицы электрической емкости и тангенса угла потерь состоит из эталонных мер электрической емкости серии АН11А с номинальными значениями емкости 10 и 100 пФ.

При выборе эталонных мер электрической емкости был проведен анализ наиболее точных и стабильных мер электрической емкости в мире на сегодняшний день. В результате анализа были выбраны меры модели АН11А производства фирмы Andeen-Hagerling (США) с номинальными значениями емкости 10 и 100 пФ. В них в качестве диэлектрика используется плавный кварц; калибруются они относительно расчетного конденсатора в Национальном институте метрологии США NIST.

В состав Национального эталона входят 3 меры с номинальным значением 10 пФ и три меры с номинальным значением 100 пФ. В ходе создания Национальный эталон единицы электрической емкости активно исследовался, в частности исследовались метрологические характеристики эталонных мер емкости. Действительное значение мер определяется на частоте 1 кГц методом замещения [см. формулу (1)]. На рисунках 1 и 2 представлены данные по определению действительного значения эталонных мер в 2009–2011 гг.

Нестабильности эталонных мер за год и среднеквадратичное отклонение (СКО) не пре-

вышают значений $1,00 \cdot 10^{-6}$ – $1,00 \cdot 10^{-5}$, установленных в техническом задании на эталон (таблица). Исследование тангенса угла потерь

эталонных мер подтвердили характеристики мер, заявленные производителем: не более 0,000003 (таблица).

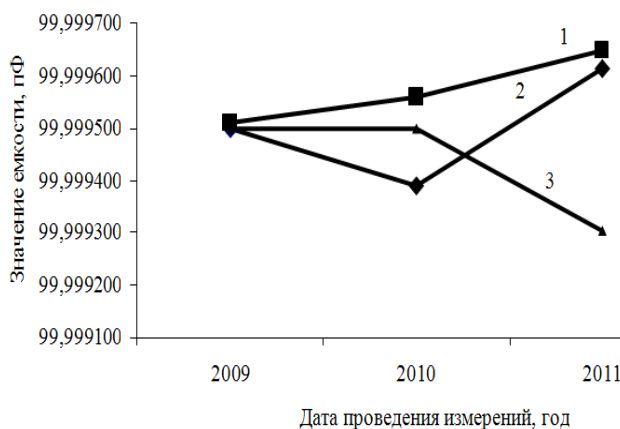
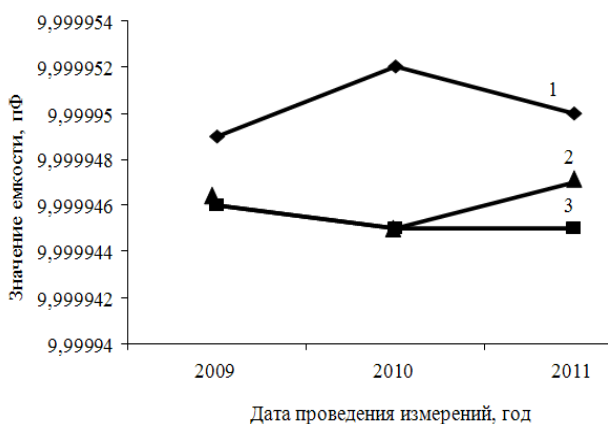


Рисунок 1 – Результаты экспериментальных исследований мер АН11А с номинальным значением емкости 10 пФ: 1 – действительное значение меры 1634; 2 – действительное значение меры 1631; 3 – действительное значение меры 1630

Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований мер АН11А с номинальным значением емкости 100 пФ: 1 – действительное значение меры 1633; 2 – действительное значение меры 1635; 3 – действительное значение меры 1632

Таблица

Метрологические характеристики, полученные при исследованиях

Номер меры	Номинальное значение, пФ	СКО, пФ	Тангенс угла потерь	Нестабильность, отн. ед.	
				полученная при исследованиях	допускаемая по документации
01630	10	$9,6 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$
01631	10	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$
01634	10	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$
01632	100	$9,9 \cdot 10^{-7}$	$9,6 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$
01633	100	$9,4 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	110^{-6} – $1 \cdot 10^{-5}$
01635	100	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-5}$

Комплекс эталонного оборудования для измерения электрической емкости методом замещения состоит из моста электрической емкости многочастотного серии АН2700А, блока коммутации БК8х2 восьмиканального для измерения емкости, пакета прикладных программ для обработки результатов измерений.

Мост электрической емкости АН2700А представляет собой многочастотный прецизионный мост с диапазоном измерения электрической емкости ($1 \cdot 10^{-12}$ – $1 \cdot 10^{-6}$) Ф и частотой (50–20) кГц, точность измерения (5–1000) ppm. Использование в конструкции моста АН2700А трансформатора отношений со специальной

конструкцией обмоток, а также термостатированного конденсатора на основе плавленного кварца является главным фактором, обеспечивающим прецизионные измерения емкости (тангенса угла потерь) в частотном диапазоне от 50 Гц до 20 кГц.

Блок коммутации БК8х2 специально разработан БелГИМ совместно с фирмой ОДО «ТКС-МиСБоС» для Национального эталона единицы электрической емкости. Структурная схема модуля управления БК8х2 представлена на рисунке 3.

Блок коммутации позволяет проводить измерение мостом АН2700А электрической емкости до восьми конденсаторов путем управляемого переключения измерительных каналов коммутатора. При измерении емкости блок коммутации обеспечивает реализацию трехпроводной схемы измерений при соединении моста АН2700А с объектами измерений.

БК8х2 разработан на базе микроконтроллера семейства PIC18. Функционально БК8х2 содержит следующие узлы: два стабилизатора напряжения, управляющий микроконтроллер, буфер управления реле, кнопки управления, преобразователь интерфейсов. Питание БК8х2 осуществляется от внешнего источника 9В 500мА. БК8х2 содержит два стабилизатора напряжения ИП 5В: один – для питания цифровой части схемы – микроконтроллера, преобразователя интерфейсов TTL\RS232, второй – для питания реле. Схема с двумя стабилизаторами напряжения выбрана для уменьшения проникновения шумов из цифровой части схемы в аналоговую. Для фильтрации по цепям питания используются ЭМС фильтры фирмы Мурата –

NFM21 и танталовые блокирующие емкости. Для дальнейшего снижения уровня шумов, печатная плата модуля управления конструктивно имеет разделенную «землю» – аналоговую и цифровую.

Управляющий микроконтроллер имеет модуль USART (асинхронный последовательный интерфейс) с уровнями транзисторно-транзисторной логики, поэтому используется преобразователь интерфейсов TTL\RS232 с гальванической развязкой по питанию. Данное решение позволяет изолировать зашумленные линии интерфейса RS232 компьютера от проникновения в чувствительную аналоговую часть схемы. Буфер для управления реле, разработан на базе MOSFET транзисторов с дополнительной фильтрацией. Фильтр буфера – П-образный. Подключение модулей коммутируемых (High и Low каналы) осуществляется экранированным проводом, с дополнительной фильтрацией П-образным фильтром для каждого реле.

Программное обеспечение для микроконтроллера разработано в среде MPLAB производства компании Microchip на языке программирования С с использованием компилятора HI-TECH PICC-18 Pro v.9.63. Программное обеспечение, разработанное для коммутатора, позволяет производить программную калибровку, учитывающую параметры (сопротивление, индуктивность, емкость, длина) измерительных кабелей. Программное обеспечение коммутатора открывает широкие возможности при обработке и анализе полученных результатов измерений. В настоящее время БелГИМ совместно с фирмой ОДО «ТКСМиСБоС» готовит документы для получения патента на блок коммутации БК8х2.

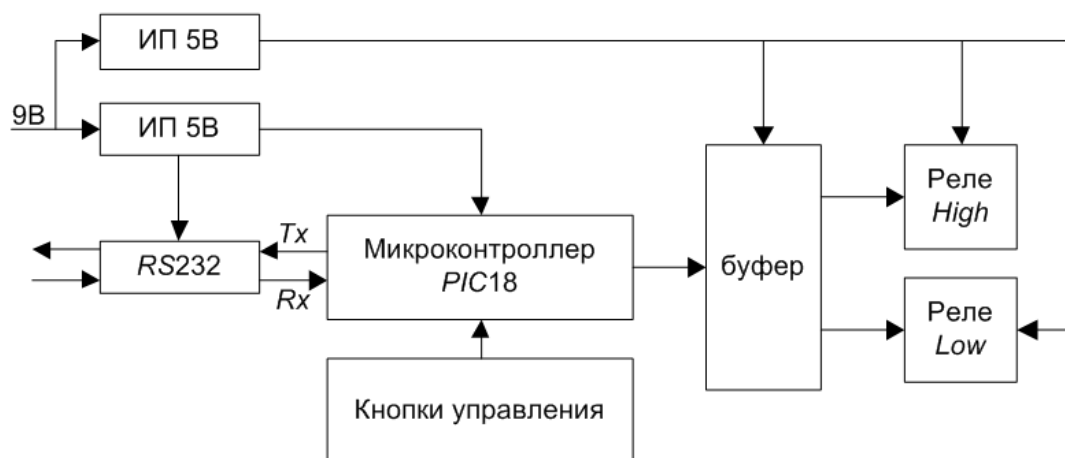


Рисунок 3 – Структурная схема модуля управления БК8х2

Схема передачи размера единицы электрической емкости осуществляется методом замещения, при котором удается исключить погрешность измерительного моста, а наиболее влияющими факторами на точность являются метрологические характеристики эталонных мер емкости. Отсчет показаний емкости эталонной меры и калибруемой меры (меры, которой передается размер единицы электрической емкости) производится поочередно на частоте 1 кГц. Действительное значение емкости калибруемой меры C_d определяется по формуле:

$$C_d = k \cdot \bar{C}_x = (C_{\text{этд}} / \bar{C}_{x \text{ эт}}) \cdot \bar{C}_x, \quad (1)$$

где $C_{\text{этд}}$ – действительное значение эталонной меры; $\bar{C}_{x \text{ эт}}$ – среднее измеренное значение эталонной меры; \bar{C}_x – среднее измеренное значение калибруемой меры.

Комплекс эталонного оборудования для хранения и передачи единицы электрической емкости с номинальными значениями емкости от 1 пФ до 10 мФ и тангенса угла потерь в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до 1 состоит:

- из однозначных эталонных мер электрической емкости серии SCA с номинальными значениями от 1 пФ до 10 мФ и пределами допускаемой основной относительной погрешности электрической емкости $\pm (1 \cdot 10^{-2} - 1,5 \cdot 10^{-1}) \%$, магазина емкости НАСЗ-А-9Е-10 рФ;

- магазина мер тангенса угла потерь с диапазоном воспроизведения тангенса угла потерь от $1 \cdot 10^{-5}$ до 1, предел абсолютной погрешности воспроизведения не более $\pm (0,001 \text{ тангенса угла потерь} + 2 \cdot 10^{-5})$.

В ходе создания эталона БелГИМ принял участие в международных сличениях национальных эталонов электрической емкости в рамках темы COOMET 345/UA/05 (COOMET.EM – K4, COOMET.EM – S4), номинальные значения емкости 10 и 100 пФ на частотах 1 и 1,6 кГц. В данных сличениях приняли участие 7 национальных метрологических институтов, входящих в состав COOMET, EURAMET, APMP. В ходе проведенных сличений БелГИМ получены следующие значения расширенной неопределенности: 2,2 ppm для значения емкости 10 пФ на частотах 1 и 1,6 кГц; 2 ppm для значения емкости 100 пФ на частотах 1 и 1,6 кГц ($k = 2$; $P = 95 \%$).

Заключение

Создан Национальный эталон единицы электрической емкости, способный хранить и передавать единицу электрической емкости с наивысшей точностью в Республике Беларусь, удовлетворяющей требованиям реальных потребителей: номинальные значения электрической емкости 10 и 100 пФ; относительная нестабильность эталона за год составляет $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ (при частоте 1 кГц); расширенная неопределенность составляет 2,2 ppm для номинального значения емкости 10 пФ на частотах 1 и 1,6 кГц; 2 ppm для номинального значения емкости 100 пФ на частотах 1 и 1,6 кГц ($k = 2$, $P = 95 \%$).

По конструктивному исполнению Национальный эталон соответствует современному международному уровню в области измерения электрической емкости и позволяет осуществлять метрологическое обеспечение всех эталонных СИ электрической емкости, которые эксплуатируются в Республике Беларусь.

В рамках расширенной неопределенности, полученной в ходе сличений, результаты БелГИМ совпадают с результатами других национальных метрологических институтов. На основании проведенных сличений БелГИМ получил возможность включить новые измерительные и калибровочные возможности в международную базу данных KCDB Международного бюро мер и весов.

Внедрение Национального эталона единицы электрической емкости обеспечивает: повышение точности измерения электрической емкости в Республике Беларусь и качества метрологического обслуживания отраслей народного хозяйства; единство измерений, улучшение и совершенствование точностных характеристик вновь разрабатываемых СИ электрической емкости и подтверждение метрологических характеристик импортных СИ электрической емкости, поступающих в Республику Беларусь; развитие приборостроения в области измерения электрических величин; подтверждение наилучших возможностей при калибровке, возможность участия в дополнительных сличениях и признания результатов калибровки на мировом уровне.

Работа выполнена (2008–2010 гг.) в рамках Государственной научно-технической программы «Эталонные и научные приборы».

Kolomiets T.A., Kazakova E.A., Sosnovskaya T.G.

Creation and research of the national standard of capacitance

In 2008–2010 the Belorussian State Institute of Metrology established the national electric capacitance standard. The basic steps for creating a national standard are presented in this manuscript. Represented by the composition of the standard, its metrological characteristics, as well as research results. (E-mail: kolomiets@belgim.by)

Key words: electric capacitance, capacitance standard, unit reproduction, unit transfer, bridge of electric capacitance.

Поступила в редакцию 03.11.2011.