

III. Радиоэлектронные измерения

УДК 621.372.8

**ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

И.М. Малай

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
malay@vniiftri.ru

Статья посвящена решению задач обеспечения единства измерений в приоритетных направлениях экономики. Главное внимание уделяется дальнейшему совершенствованию эталонной базы в области радиоэлектронных измерений, повышению точности государственных эталонов, соответствующей международному уровню.

Ключевые слова: радиоэлектронные измерения, метрологическое обеспечение, государственные эталоны, повышение точности.

**STAGES OF CREATION AND PERSPECTIVE
DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF METROLOGICAL
SUPPORT IN THE FIELD OF RADIO-
ELECTRONIC MEASUREMENTS**

I.M. Malay

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
malay@vniiftri.ru

The article is devoted to solving the problems of ensuring the uniformity of measurements in the priority areas of the economics. The main attention is paid to the further improvement of the reference base in the field of radio electronic measurements, increasing the accuracy of state standards corresponding to the international level.

Key words: radio electronic measurements, metrological support, state standards, accuracy increase.

Радиоэлектронные измерения являются одним из наиболее массовых видов измерений. Период бурного развития радиоизмерений в нашей стране начался в середине прошлого века и был связан с ростом парка радиоизмерительных приборов, а также острой необходимостью разработки высокоточных средств и методов измерений. К середине 50-х гг. направление радиоизмерений было сформировано во вновь созданном Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), где были начаты работы по созданию установок для проверки частотно-измерительной аппаратуры, измерителей радиопомех, тока на высоких частотах, свойств диэлектриков.

Первый этап по созданию комплекса радиотехнических эталонов, обеспечивавших единство и достоверность радиоэлектронных измерений в стране, был завершён в 1976 г.

Следующим важнейшим этапом в развитии этого направления стало создание комплекса военных эталонов для основных физических величин в радиоизмерениях, работы по которому были завершены к началу 80-х гг.

В период существования СССР его эталонная база на уровне государственных первичных эталонов (ГЭТ) была сконцентрирована в 10 государственных научных метрологических институтах, три из которых после 1991 года оказались за пределами Российской Федерации. При этом в НПО «Метрология» (Украина) и ВНИИРИ (Армения) было сосредоточено значительное количество радиотехнических и антенных эталонов.

Однако проведённые за последние полтора десятилетия работы по модернизации и совершенствованию государственных эталонов в области радиоэлектронных, электрических и магнитных измерений позволили создать новый комплекс государственных первичных эталонов и практически полностью восполнить этот пробел.

Учитывая постоянно возрастающие метрологические потребности радиоприборостроения, были продолжены работы по дальнейшему совершенствованию государственных эталонов, повышению их точности, освоению новых частотных и динамических диапазонов.

В настоящее время актуальной проблемой в области радиоэлектронных измерений является повышение эффективности метрологического обеспечения приоритетных, перспективных направлений экономики и социального развития Российской Федерации. В частности, предстоит решить задачу обеспечения единства измерений в приоритетных направлениях и критических технологиях, «Перечни» которых утверждены Президентом Российской Федерации. Это такие приоритетные направления развития науки, технологии, техники, как «Информационно-телекоммуникационные системы», «Транспортные, авиационные и космические системы», «Перспективные вооружения, военная и специальная техника», а также критические технологии: технологии создания и управления новыми видами транспортных систем; технологии создания новых поколений ракетно-космической, авиационной, морской техники; обработки, хранения, передачи и защиты информации; технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления; распределённых вычислений и систем; обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений.

Основным качественным показателем развития радиоизмерений в каждой стране является участие в международных сличениях ведущих стран в области радиоэлектронных измерений. Таких лидеров в области электромагнитной метрологии в целом пять — США, ФРГ, Великобритания, Франция,

Россия. Они имеют приблизительно одинаковое количество позиций СМС (калибровочных возможностей) национальных метрологических институтов, содержащихся в базе данных KCDB.

Участие в проводимых за последнее время международных сличениях первичных эталонов отражено в таблице 1.

Таблица 1

Эталон	Код	Область	Величина	Контроль
ГЭТ 160	CCEM.RF-K23.F	Electricity and Magnetism, Radio frequencies	Antenna gain	CCEM
ГЭТ 160	COOMET.EM.RF-S1	Electricity and Magnetism, Radio frequencies	Comparison of power flux density	COOMET
ГЭТ 160	CCEM.RF-K24.F	Electricity and Magnetism, Radio frequencies	Correction factor for E-field measurements	CCEM
ГЭТ 167	CCEM.RF-K25.W	Electricity and Magnetism, Radio frequencies	RF power from 33 GHz to 50 GHz in waveguide	CCEM
ГЭТ-180	COOMET 468/RU/09	Electricity and Magnetism, Radio frequencies, Signal and pulse characteristics, Modulation AM	Supplementary comparisons of amplitude modulation depth HF oscillations	COOMET

Решающими в развитии направления электромагнитных измерений радиочастотного диапазона стали конец XX и начало XXI века, когда очень остро встал вопрос создания эталонной базы, соответствующей международному уровню, удовлетворяющей всё возрастающим требованиям к точности измерений отечественных предприятий приборостроения, связи, радиоэлектроники, навигации, а также медицины, биологии, экологии, других областей, связанных с воздействием электромагнитных полей на человека. Были созданы новые эталоны:

- в 1996 г. — Государственный специальный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 0–20 кГц;
- в 2000 г. — Государственный первичный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот 0,3–78 ГГц;

- в 2004 г. — Государственный специальный эталон девиации частоты;
- в 2005 г. — Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–53,57 ГГц;
- в 2010 г. — Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний; Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне (0,001... 100) % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот (10... 200 000) Гц; Государственный первичный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 178 ГГц; в области импульсных напряжений — Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-5} с; Государственный первичный специальный эталон единицы комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 до 78,33 ГГц;
- в 2012 г. — Государственный первичный эталон единиц объёмов передаваемой цифровой информации по каналам Интернет и телефонии, который предназначен для хранения и воспроизведения единиц объёмов (количества) цифровой информации (данных) и передачи размера единиц рабочим эталонам методами непосредственного сличения и прямых измерений, а также рабочим средствам измерения дистанционно по каналам связи стандартов UMTS, GPRS, Ethernet, LTE, WiMAX, EDGE, HSPA, ADSL, IMT-MC-450. Данный эталон обеспечивает выполнение требований ст. 1, п. 3, п. 9 Федерального закона № 102-ФЗ от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений» при учёте оказанных услуг электросвязи операторами связи.

С 2005 г. начался плановый процесс совершенствования существующих эталонов. Был модернизирован ряд наиболее востребованных эталонов:

- в 2006 г. — Государственный первичный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля (ППЭ) в диапазоне частот 0,3–178,0 ГГц. В результате расширился диапазон частот эталона с 78 до 178 ГГц. По своим метрологическим характеристикам созданный эталон соответствует мировому уровню, что подтверждается результатами проводимых международных сличений;
- в 2010 г. — Государственный первичный эталон единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот 0,01–30 МГц. Технические и метрологические характеристики модернизированного эталона удовлетворяют текущим и перспективным требованиям к единству измерений напряжённости магнитного поля в области обеспечения электромагнитной безопасности окружающей среды для человека, информационно-телекоммуникационных систем и технологий, электромагнитной совместимости технических средств. Расширен диапазон применения поверочной схемы;

- в 2010 г. — Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот 0,03–37,5 ГГц. Эталон принял участие в международных сличениях. По данным калибровочных возможностей он соответствует международному уровню в указанных трактах и диапазонах частот. Эталон укомплектован современным вспомогательным оборудованием, позволяющим использовать его в автоматизированных установках и обеспечивать поверку основных СИ мощности СВЧ;
 - в 2011 г. — Государственный первичный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 0,0003–1000 МГц. В результате проведена его гармонизация с национальными эталонами зарубежных стран путём расширения диапазона воспроизведения единиц напряжённости электрического поля (НЭП). Вместе с поверочной схемой он обеспечивает единство измерений находящимися в сфере государственного регулирования рабочими средствами измерений, выпускаемыми серийно как отечественными, так и зарубежными производителями и применяемыми в области информационно-телекоммуникационных технологий, электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности в диапазоне частот от 0,0003 до 2500 МГц;
 - в 2011 г. был усовершенствован один из базовых радиотехнических эталонов — эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц. Модернизация эталона СПМШ была вызвана необходимостью обеспечения на уровне современных требований создания, сертификации и эксплуатации чувствительных приёмно-усилительных устройств и их активных компонентов.
- Приведённая ниже таблица 2 иллюстрирует востребованность электромагнитных эталонов.

Таблица 2

Обозначение и наименование	Год создания (совершенствования)	Количество подчинённых СИ			Количество передач раз- мера единицы в год
		ВЭТ	РЭ	РСИ	
ГЭТ 45-2011 Государственный первичный эталон единицы напряжённости электриче- ского поля в диапазоне ча- стот от 0,0003 до 1000 МГц	2011	2	100	50000	230
ГЭТ 44-2010 Государственный первичный эталон единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 0,01 до 30 МГц	2010	1	30	20000	190

Продолжение таблицы 2

Обозначение и наименование	Год создания (совершенствования)	Количество подчинённых СИ			Количество передач раз- мера единицы в год
		ВЭТ	РЭ	РСИ	
ГЭТ 26-2010 Государственный первич- ный эталон единицы мощ- ности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот от 0,03 до 37,5 ГГц	2010	6	120	25000	1540
ГЭТ 180-2010 Государственный первич- ный эталон единицы коэф- фициента амплитудной модуляции высокочастот- ных колебаний	2010	1	100	150000	870
ГЭТ 160-2006 Государственный первич- ный эталон плотности по- тока энергии электромаг- нитного поля в диапазоне частот от 0,3 до 178 ГГц	2000	0	12	11000	284
ГЭТ 167-2017 Государственный первич- ный эталон единицы мощ- ности электромагнитных колебаний в диапазоне ча- стот от 37,5 до 78,33 ГГц	2017	10	1000	200000	230
ГЭТ 166-2004 Государственный специ- альный эталон единицы девиации частоты	2004	1	100	100000	910
ГЭТ 158-96 Государственный специ- альный эталон единицы напряжённости электриче- ского поля в диапазоне частот 0–20 кГц	1996	1	28	30000	360
ГЭТ 21-2011 Государственный первич- ный эталон единицы спек- тральной плотности мощ- ности шумового радиоиз- лучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц	2011	1	1500	50000	240

Продолжение таблицы 2

Обозначение и наименование	Год создания (совершенствования)	Количество подчинённых СИ			Количество передач раз- мера единицы в год
		ВЭТ	РЭ	РСИ	
ГЭТ 182-2010 Государственный специ- альный эталон единицы импульсного электриче- ского напряжения с дли- тельностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с	2010	1	250	50000	180
ГЭТ 188-2010 Государственный первич- ный эталон единицы коэф- фициента гармоник в диа- пазоне (0,001...100) % для сигналов с основной гармо- никой в диапазоне частот (10...200000) Гц	2010	1	70	4000	60
ГЭТ 193-2011 Государственный первич- ный эталон единицы ослабления электромагнит- ных колебаний в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц	2011	1	220	40000	150
ГЭТ 200-2012 Государственный первич- ный эталон единиц измере- ния объёмов передаваемой цифровой информации по каналам Интернет и телефонии	2012	–	15	30000	10

Одновременно с введением в действие эталонов разрабатывается и утверждается необходимая нормативная документация на средства поверки, разрабатывается и внедряется в метрологическую практику комплекс рабочих эталонов.

Совершенствование и создание новых радиотехнических эталонов проводились с учётом приоритетных и критических технологий. Созданные эталоны позволяют на качественно новом уровне проводить испытания, метрологические исследования и поверку вновь разрабатываемых и ввозимых из-за рубежа средств измерений.

Важной вехой в 2013 г. явилось завершение строительства и ввод в эксплуатацию во ВНИИФТРИ измерительной радиобезэховой экранированной камеры (ИРБК), которая представляет собой уникальный многоцелевой ком-

плекс, предназначенный для проведения электромагнитных измерений в условиях, максимально приближенных к условиям свободного пространства.

В настоящее время в Российской Федерации в области радиотехнических измерений имеется более 20 государственных первичных эталонов, 18 из которых эксплуатируются во ФГУП «ВНИИФТРИ». Кроме того, в ЦСМ и ряде других организаций, включая предприятия малого бизнеса, эксплуатируется огромный парк вторичных эталонов, которые обеспечивают прослеживаемость измерений к государственным первичным эталонам [1].

Условно весь комплекс первичных эталонов единиц радиотехнических величин можно разделить на группы по видам измерений. Это измерения энергетических характеристик электромагнитных колебаний (ЭМК) и параметров согласования в трактах, измерения параметров спектральных и временных характеристик сигналов, антенные и полевые измерения, измерения радиофизических свойств материалов, измерения параметров телекоммуникационных сетей, частотно-временные измерения.

В настоящее время измерение мощности электромагнитных колебаний, наряду с измерениями частоты, без преувеличения можно считать ключевыми измерениями в современной радиоэлектронике. Разработка, испытания и эксплуатация приёмо-передающих средств, радиоэлектронных систем и устройств различного назначения, современной элементной компонентной базы требуют контроля абсолютных значений энергетических характеристик микроволнового излучения.

Начало формирования научных школ ВНИИФТРИ связано с развитием наиболее важных тематик. Одно из таких направлений — основы системы метрологического обеспечения измерений мощности электромагнитных колебаний — было заложено во ВНИИФТРИ ещё в конце 50-х годов прошлого столетия. Оно связано с измерениями мощности СВЧ, спектральной плотности мощности шумового излучения, а впоследствии и измерениями коэффициентов отражения в волноводных трактах. За это время во ВНИИФТРИ были созданы три первичных эталона, 8 государственных эталонов, разработаны образцовые средства измерений, включая измерители мощности: калибраторы мощности, образцовые нагрузки.

В области измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (далее — СПМШ) проведены работы по расширению динамического диапазона измерений вниз до эквивалентной шумовой температуры 77,4 К на частотах от 0,002 до 37,5 ГГц, а также проведены исследования по расширению диапазона частот первичного эталона ГЭТ 21-2010 до 220 ГГц с целью оценки возможности метрологического обеспечения производства перспективных изделий радиоэлектронной промышленности в этом диапазоне частот.

Своевременно проведённые работы по совершенствованию электромагнитных первичных эталонов мощности ГЭТ 26-2010 (период 2007–2010 гг.)

и ГЭТ 167-2017 (период 2013–2016 гг.) позволили принять участие в трёх международных ключевых сличениях и на достойном уровне продемонстрировать калибровочные возможности в этом виде измерений в диапазоне частот от 50 МГц до 50 ГГц. Более того, в 2019 году начались международные ключевые сличения в диапазоне частот от 50 до 75 ГГц с участием ВНИИФТРИ, NIST (США), PTB (Германия), NPL (Великобритания), LNE (Франция), KRISS (Корея), NIM (Китай — пилот лаборатория). А в 2020 году запланировано проведение двусторонних сличений ВНИИФТРИ — PTB в диапазоне частот от 75 до 110 ГГц.

Современные подходы к оценке точности измерений в СВЧ-диапазоне частот не позволяют пренебрегать комплексными коэффициентами отражения и передачей применяемых средств измерений. Сложившаяся в стране система измерений коэффициентов отражения с применением измерительных линий, установок, реализующих алгоритмическое исключение рассогласования, или средств измерений, обеспечивающих измерения только модуля коэффициента отражения, морально устарела и не соответствует современным требованиям как единства, так и точности измерений. Решение данной научно-технической проблемы неразрывно связано с необходимостью разработки первичного эталона комплексных коэффициентов отражения и передачи, а также средств и методов передачи единицы рабочим средствам измерений.

Следует отметить, что при разработке первичных эталонов как мощности СВЧ, так и СПМШ большое внимание уделяется выбору методов передачи единицы вторичным и рабочим эталонам, большая часть из которых выпускается импортными производителями. С целью снижения критической зависимости от зарубежных технологий и реализации научно-технического задания, полученного при выполнении более чем 20 НИОКР, показана возможность разработки отечественных средств измерений мощности СВЧ, которые по своим метрологическим характеристикам удовлетворяют предъявляемые к эталонам мощности требования в диапазоне частот от 5,64 до 118,1 ГГц в волноводных трактах.

Положительный опыт ФГУП «ВНИИФТРИ» внедрения технологических решений по изготовлению преобразователей мощности СВЧ и волноводных нагрузок предполагает расширение номенклатуры государственных эталонов, внедрение которых в систему обеспечения единства измерений позволит сформировать надёжный базис для формирования парка государственных метрологических служб: калибраторов мощности в волноводных и коаксиальных трактах, наборов мер коэффициентов отражения и передачи в волноводных трактах, компараторов единицы эквивалентной шумовой температуры, а также автоматизированных комплексов по поверке средств измерений на их основе.

Более того, представляется возможной разработка следующих отечественных средств измерений: генераторов сигналов на основе умножителей частоты в диапазоне частот от 18 до 178,4 ГГц; измерителей коэффициента шума в диапазоне частот от 26,5 до 110 ГГц; ваттметров волноводных в диапазоне частот от 18 до 178 ГГц; ваттметров коаксиальных в диапазоне частот от 0,03 до 50 ГГц. Разработку современных высокоточных средств измерений предполагается осуществлять одновременно с внедрением моделирования СВЧ-узлов в технологические процессы производства СВЧ-диодов и микроэлектромеханических систем.

Развитие отечественного приборостроения невозможно без метрологического обеспечения измерений параметров радиосигналов. Можно выделить два основных фактора развития — это увеличение несущих частот вплоть до терагерцового диапазона частот и увеличение полосы пропускания в современных и перспективных системах связи. Данные факторы обуславливают необходимость совершенствования системы обеспечения единства измерений как амплитудно-временных параметров сигналов, так и параметров модуляции радиосигналов, которая базируется на четырёх первичных государственных эталонах — единицы электрического импульсного напряжения ГЭТ 182-2010, единицы коэффициента амплитудной модуляции ГЭТ 180-2010, единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 и коэффициента гармоник ГЭТ 188-2010.

В 2017–2019 гг. в рамках КООМЕТ были проведены международные дополнительные сличения ГЭТ 182-2010 и ГЭТ 188-2010 с национальными эталонами импульсного электрического напряжения и коэффициента гармоник БелГИМ (проекты КООМЕТ №709/RU-a/16 и №710/RU/16), в которых в качестве пилота выступал ФГУП «ВНИИФТРИ». Результаты сличений установили эквивалентность национальных эталонов России и Белоруссии, подтвердили правильность оценок калибровочных и измерительных возможностей.

Характеристики существующего первичного эталона единицы электрического импульсного напряжения ГЭТ 182-2010, с одной стороны, достаточны для поверки большинства известных и вновь разрабатываемых средств измерения импульсных напряжений, с другой стороны, ГЭТ 182-2010 в полной мере не может удовлетворять требования по быстродействию и полосе частот, которые ограничены методом, применяемым для воспроизведения единицы. К примеру, методика поверки цифровых осциллографов по ГОСТ Р 8.964-2019 распространяется на осциллографы со временем нарастания переходной характеристики не менее 35 пс, при этом полоса пропускания не превышает 10 ГГц.

В свою очередь, для разработки и производства высокопроизводительных и высокоскоростных устройств и элементов электронной компонентной базы уже необходимы осциллографы с полосой пропускания до 110 ГГц. Существуют серийно выпускаемые зарубежные осциллографы с удовлетворя-

ющей полосой пропускания, но фактически их временные параметры на территории РФ подтвердить не представляется возможным.

Кроме того, нормирование характеристик импульсных сигналов в виде ограниченного набора параметров не позволяет решить задачу оценки параметров сигналов с цифровой модуляцией. Основным отличием этой модуляции от амплитудной и частотной модуляций является передача цифровых данных путём одновременного дискретного изменения двух параметров сигнала — амплитуды и фазы. Это увеличивает число возможных состояний передаваемого сигнала и таким образом позволяет увеличить скорость передачи данных при той же выделенной полосе пропускания канала. Необходимо не только расширение метрологических характеристик ГЭТ 182, но и пересмотр способов нормирования параметров импульсных и модулированных сигналов. Высокая актуальность данного вопроса подтверждается ещё и тем, что Консультативный комитет по электричеству и магнетизму ВРМ (ССЕМ) в рамках своей стратегии развития впервые планирует проведение международных сличений по форме сигнала.

Для решения данной задачи необходимо применение новых методов воспроизведения и передачи единицы импульсного электрического напряжения на основе генерации сверхкоротких импульсных электрических сигналов с использованием фемтосекундных лазеров и фотодиодных формирователей ультракоротких электрических импульсов.

Для устойчивой работы и обеспечения необходимой скорости и точности передачи информации необходимо минимизировать фазовый шум в источниках сигналов и аддитивный фазовый шум в усилителях мощности радиопередающих и радиоприёмных устройств. Для его контроля необходимы средства измерений с пониженным уровнем фазовых шумов.

В настоящее время ведутся разработки отечественных генераторов сигналов с пониженным уровнем фазового шума и анализаторов фазовых шумов. Необходимо обеспечение метрологической прослеживаемости измерений уровня фазовых шумов на всех этапах разработки и эксплуатации таких средств измерений. Данная единица измерений является косвенной величиной, и ранее система обеспечения единства её измерений не была сформирована.

Во ВНИИФТРИ ведутся исследования по созданию исходного эталона единицы относительного уровня фазового шума, который обеспечит прослеживаемость измерений к первичным эталонам. Одна из задач, которая стоит перед ВНИИФТРИ, — это разработка синтезатора частот со сверхнизким фазовым шумом на основе оптического стандарта частоты и фемтосекундного делителя оптических частот. Исследования в данном направлении также ведутся в зарубежных метрологических институтах, например в NIST (США). Такой подход позволяет обеспечить выигрыш по уровню фазового шума при малых отстройках по частоте в сравнении с электронными мето-

дами генерации до 20 дБ и более. Подобный запас нужен как для оценки чувствительности анализаторов фазовых шумов, так и для воспроизведения нормированного уровня фазового шума в необходимом динамическом диапазоне.

Перспективные задачи в области измерений магнитной индукции обусловлены развитием производства магнитотвёрдых и сверхпроводящих материалов. Такие материалы выпускаются отечественной промышленностью и применяются в рамках проекта международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЕР), при производстве медицинских магниторезонансных томографов и мощных электродвигателей.

Принципиальным отличием требований к средствам измерений магнитной индукции, которые необходимы для контроля характеристик при производстве современных материалов, является более широкий динамический диапазон измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля с расширением верхней границы до 14 Тл. Кроме того, при намагничивании магнитотвёрдых материалов необходим контроль амплитуды магнитной индукции однократных импульсов сильного магнитного поля.

При этом существующая система обеспечения единства измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля, базирующаяся на ГЭТ 82-85 и ГЭТ 12-2011, обеспечивает диапазон измерений только до 10 Тл и не позволяет осуществлять передачу единицы магнитной индукции средствами измерений в диапазоне до 14 Тл. Поверка средства измерений магнитной индукции однократных импульсов осуществляется по переменному магнитному полю, что приводит к низкой достоверности результатов измерений.

Исходя из этого, необходимо совершенствование Государственного специального эталона единицы магнитной индукции ГЭТ 82 с целью расширения его метрологических и функциональных характеристик.

В настоящее время в России эксплуатируется более ста единиц современных измерительных комплексов, обеспечивающих инструментальную оценку радиотехнических характеристик антенн, начиная с небольших антенных излучателей и заканчивая антенными решётками площадью в десятки квадратных метров. Около двух третей этих комплексов реализуют амплифазометрический метод измерений на плоскости, иногда комбинируемый с измерениями на цилиндрической или сферической поверхности, остальные — комплексы для измерений в дальней зоне антенн или в поле радиоколлиматора.

Развитие техники и методов антенных измерений обуславливалось постоянным усложнением измерительных задач, заключающимся в расширении диапазонов измерений и ужесточении требований к их погрешности. Поэтому важную роль в развитии антенных измерений играет система их метрологического обеспечения, основу которой представляет эталонная база.

Несмотря на активное внедрение современных средств измерений параметров антенн, совершенствованию соответствующей эталонной базы уделялось недостаточное внимание. В настоящее время в РФ отсутствуют национальные эталоны пространственных и энергетических характеристик антенн. Обеспечение единства и точности антенных измерений выполняется с помощью исходного эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 300 МГц до 178 ГГц ГЭТ 160-2006, а также эталонов других физических величин — единицы частоты, единиц ослабления, мощности, коэффициента отражения, спектральной плотности мощности шума электромагнитного поля в коаксиальных и волноводных трактах, единиц длины, плоского угла, импульсного напряжения. Перечисленные эталоны позволяют косвенно обеспечить эталонирование единиц таких величин, как коэффициент усиления антенн, форма амплитудной (фазовой) диаграммы направленности антенны, форма и угол наклона эллипса поляризации антенны, эффективная изотропно излучаемая мощность, шумовая добротность. Отсутствие эталонов указанных параметров антенн вынудило использовать поэлементный подход к оценке погрешностей измерений. Данный подход, в отличие от комплектного, характеризуется большей универсальностью, но при этом обладает существенным недостатком: сложность реализации. В некоторых случаях это может проявляться как в завышении точностных характеристик из-за неучёта тех или иных источников погрешности, так и в их занижении из-за сложности оценки взаимокорреляционных свойств источников погрешности, следствием чего может быть «двойной» учёт источников погрешности.

Ситуация с отсутствием эталонов характеристик антенн усугубляется практически полным отсутствием нормативно-технической документации в области антенных измерений. В частности, основу действующих стандартов в области измерений характеристик антенн СВЧ составляют ГОСТ 8.309-78 и ГОСТ 8.463-82, которые не отвечают современному уровню развития антенных измерений.

Таким образом, нынешнее состояние системы метрологического обеспечения в области измерений характеристик антенн СВЧ-диапазона не обеспечивает возможности контроля с требуемой точностью всей номенклатуры нормируемых параметров при испытаниях перспективных многофункциональных антенных систем с использованием традиционных методов измерений. Во-первых, отсутствует эталонная база, необходимая для подтверждения достигаемых на современном уровне диапазонов измерений характеристик антенн и погрешностей получаемых результатов. Во-вторых, отсутствует или устарела нормативно-техническая база в области антенных измерений. Невозможность контроля с требуемой точностью всей номенклатуры нормируемых параметров антенн неизбежно ведёт к снижению качества их испытаний и сдерживает развитие радиоэлектронных систем в целом.

В сложившихся условиях очевидной является необходимость совершенствования в равной степени и эталонной, и нормативно-методической баз. При этом существующий подход, заключающийся в непосредственном эталонировании каждой из измеряемых характеристик с использованием так называемых «золотых стандартов» — первичных (исходных) эталонов, применительно к антеннам, является неэффективным. Это объясняется сложностью оценки точностных параметров выполняемых измерений из-за большой вариативности свойств измеряемых антенн, условий измерений, обеспечиваемых используемыми компараторами, методических погрешностей обработки результатов измерений. Результатом влияния указанных факторов является возможность точной оценки погрешностей при аттестации измерительного комплекса в двух случаях:

- применении комплектного метода с использованием эталона-переносчика в случае дальнейших измерений антенн, максимально близких к нему по характеристикам;
- применении поэлементного метода при учёте априорной информации о характеристиках объекта измерений, условий измерений и методе математической обработки результатов измерений.

В обоих случаях достоверная оценка погрешности может быть получена для фиксированных условий (частоты, размера апертуры измеряемой антенны, амплитудно-фазового распределения на апертуре), тогда как современные антенные измерительные комплексы в подавляющем большинстве случаев рассматриваются как универсальные широкодиапазонные средства измерений. Отсутствие необходимой номенклатуры эталонов и сложность учёта взаимодействия средства измерений с объектом измерений зачастую приводят к необоснованному завышению погрешностей.

Оптимальным решением данной проблемы может являться создание многоуровневой системы эталонирования. Верхнее звено данной системы должен представлять эталон коэффициента усиления (КУ) антенн, обеспечивающий измерения КУ в полном поляризационном базисе. На текущий момент подтверждённые по результатам международных сличений возможности ВНИИФТРИ по измерениям КУ в СВЧ-диапазоне составляют $\pm(0,2...0,3)$ дБ в зависимости от частоты при коэффициенте охвата $k = 2$ при полученных значениях отклонений от опорных значений и ведущих лабораторий (NIST, NPL) в пределах $\pm 0,1$ дБ. В свою очередь, ведущие мировые лаборатории декларируют погрешность измерений порядка $\pm(0,05...0,1)$ дБ. В ближайшей перспективе целесообразно доведение возможностей ВНИИФТРИ по измерениям КУ до уровня мировых лидеров и в диапазоне частот до 110 ГГц. В случае создания государственного эталона единицы коэффициента усиления основным методом воспроизведения будет являться обобщённый метод трёх антенн с экстраполяцией, опирающийся, в свою очередь, на эталоны единиц частоты, длины и мощности СВЧ.

Второе звено системы предполагается реализовать на базе двух компонент:

- специальных эталонов-переносчиков КУ, ЭИИМ (эффективная изотропно излучаемая мощность), шумовой добротности, формы диаграммы направленности антенн с большими размерами апертур (предположительно, до двух метров) на базе зеркальных антенн;
- эталонном компараторе.

Эталонный компаратор должен решать следующие задачи:

- обеспечивать передачу единицы КУ от эталона КУ специальным эталонам-переносчикам;
- обеспечивать высокоточные измерения диаграмм направленности специальных эталонов-переносчиков и других антенн;
- обеспечивать эталонирование единиц величин в области радиолокационных измерений.

Основываясь на схожести схем реализации антенных и радиолокационных измерений, для создания эталонного компаратора предполагается использование общей полеобразующей системы на базе микроволнового коллиматора, расположенной в безэховой экранированной камере. В составе компаратора также предполагается использовать один комплект радиочастотного измерительного оборудования, оптические средства для отслеживания точного положения объектов, специализированные устройства позиционирования объектов, планарный сканер для контроля характеристик поля коллиматора и измерений характеристик антенн в ближней зоне. При выборе зеркала радиоколлиматора планируется обеспечить возможность путём поэтапной доработки облучающей системы и использования необходимого комплекта радиочастотного измерительного оборудования реализации диапазона частот от 1 до 110 ГГц.

В работе эталонного компаратора предполагается реализовать большинство применяемых на практике методов измерений характеристик антенн:

- в поле коллиматора/дальней зоне;
- в промежуточной зоне;
- в ближней зоне при плоском, цилиндрическом и сферическом сканировании.

Основным методом измерений энергетических характеристик антенн (КУ, ЭИИМ, шумовая добротность) будет являться метод сравнения с мерой, аттестованной на эталонах КУ и мощности СВЧ. Для воспроизведения пространственных характеристик наибольший интерес представляют измерения в дальней зоне/поле радиоколлиматора и амплифазометрические измерения на сферической поверхности в ближней и промежуточной зонах излучения.

Ожидаемые технические и метрологические характеристики эталонного компаратора следующие:

- диапазон рабочих частот: от 1 до 50 ГГц (с поэтапным расширением до 110 ГГц);
- рабочая зона в поле коллиматора $\varnothing 2$ м, в планарном сканере 5×5 м;
- динамический диапазон измерений амплитудных диаграмм направленности, поляризационных диаграмм, диаграмм обратного рассеяния, модуля коэффициента отражения в свободном пространстве до 50 дБ;
- пределы допускаемой погрешности измерений амплитудных диаграмм направленности $\pm(0,03 \dots 0,06)D$, где D — измеряемый уровень, дБ;
- пределы допускаемой погрешности измерений поляризационных диаграмм: $\pm(0,05 \dots 0,08)P$, где P — измеряемый уровень, дБ;
- пределы допускаемой погрешности измерений КУ антенн $\pm 0,3 \dots 0,5$ дБ;
- пределы допускаемой погрешности измерений ЭИИМ и шумовой добротности $\pm 0,5 \dots 1,0$ дБ;
- пределы допускаемой погрешности измерений диаграмм обратного рассеяния $\pm(0,05 \dots 0,08)D$, где D — измеряемый уровень, дБ;
- размер элемента разрешения на радиолокационном изображении от 50 до 5 мм.

Третий уровень системы могут представлять эталонные антенны из состава антенных измерительных комплексов, аттестованные в зависимости от предназначения и характеристик, на средствах первого или второго уровней. В качестве таких антенн целесообразно использовать не только классические эталоны типа пирамидальных рупорных антенн, но и «сложные» антенны, схожие по конструктивному исполнению с измеряемыми на эксплуатируемых комплексах, в том числе активные антенны и антенны с цифровым входом/выходом.

Создание описанной системы эталонирования позволит повысить точность выполняемых на антенных измерительных комплексах измерений благодаря следующим возможностям. Во-первых, за счёт получения точечных оценок погрешности в пределах диапазонов измерений с последующей верификацией и уточнением моделей погрешностей измерений. Во-вторых, за счёт проведения калибровки на эталонном компараторе антенн, близких по конструкции к измеряемым на конкретном измерительном комплексе, возможности сравнения получаемых результатов и устранения источников или учёте выявляемых погрешностей.

Таким образом, выполнение современных и перспективных требований к точности измерений радиотехнических характеристик антенных устройств и систем невозможно без совершенствования эталонной базы и системы нормативно-технической документации. Эффективное метрологическое обеспечение разработки, производства и эксплуатации антенных систем требует выполнения работ по созданию многоуровневой системы эталонирования нормируемых радиотехнических характеристик антенн, включающей в себя первичный эталон коэффициента усиления антенн, специальные эталоны-

переносчики коэффициента усиления, ЭИИМ, шумовой добротности и формы диаграммы направленности, а также эталонный компаратор.

В настоящее время в стране принят и действует Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств». В соответствии с регламентом, выпускаемые в обращение на единой территории Таможенного союза технические средства, способные создавать электромагнитные помехи, и (или) качество функционирования которых зависит от воздействия внешних электромагнитных помех, подлежат испытаниям на ЭМС. При оценке параметров ЭМС используют средства измерений, включающие в свой состав измерительные антенны. Точностные показатели (погрешность измерений нормируемых характеристик) этих антенн в значительной степени определяют корректность проводимых испытаний и достоверность их результатов.

Требования к методам испытаний технических средств на ЭМС установлены системой ГОСТ Р, включающей более 30 стандартов, большая часть которых аутентична европейским, таким как CISPR, IEC. При испытаниях на помехоэмиссию и помехоустойчивость в части излучаемых радиопомех действующие нормативные документы предписывают проводить измерения на измерительных площадках — открытых или альтернативных, представляющих собой антенные полигоны с металлической пластиной заземления. Те же стандарты предписывают использование измерительных антенн, коэффициенты калибровки которых были измерены на аналогичных площадках, но «эталонного» класса, обладающих требуемой неравномерностью формируемого электромагнитного поля.

Одновременно с этим существуют разные подходы в оценке характеристик измерительных антенн. В нашей стране это осуществляется в рамках действующих поверочных схем косвенным методом на эталонах напряжённости и плотности потока энергии электромагнитного поля в условиях свободного пространства. За рубежом, помимо указанного метода, приняты методы измерений, реализуемые в условиях реальных испытаний на измерительной площадке с металлической пластиной заземления. Отличия в характеристиках антенн, измеренных в разных условиях, приводят к противоречиям в принятии решений о соответствии или несоответствии испытанной продукции требованиям действующих стандартов в области ЭМС. На текущий момент аппаратура государственного эталона ГЭТ-45 не позволяет реализовывать подобные измерения с пластиной заземления.

В целях обеспечения достоверной инструментальной оценки нормируемых характеристик измерительных антенн, применяемых в составе комплексов аппаратуры для проведения испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию при контроле параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств, а также в целях гармонизации отечественной и международной систем стандартов и гарантированного признания результа-

тов испытаний технических средств на ЭМС, целесообразно создание государственного вторичного эталона амплитудных характеристик измерительных антенн в диапазоне частот от 30 МГц до 18 ГГц, представляющего собой полеобразующую систему на основе полубезэховой экранированной камеры с пластиной заземления. В полубезэховой экранированной камере должна быть реализована измерительная площадка по ГОСТ СИСПр 16-1-4-2013, позволяющая выполнять измерения характеристик антенн в соответствии с международным стандартом CISPR 16-1-5.

Также по тематике эталонов напряжённости электрического и магнитного полей важно отметить необходимость работ по совершенствованию:

- Государственного первичного специального эталона единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 0 Гц и от 20 Гц до 20 кГц ГЭТ 158-96 с целью расширения нижней границы частотного диапазона переменного электрического поля до 5 Гц и расширения динамического диапазона измерений;
- Государственного первичного эталона единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот 0,01–30 МГц ГЭТ 44-2010. На период 2020–2022 гг. запланированы работы по увеличению верхней рабочей частоты эталона с 30 до 50 МГц за счёт введения в состав эталонных измерительных антенн, реализующих метод образцовой антенны в дополнение к используемому в эталоне методу образцового поля. Также в состав единиц, воспроизводимых эталоном, будет добавлена единица дипольного магнитного момента $A \cdot m^2$.

Литература

1. Альманах современной метрологии // 2019. № 1 (17). С. 7–43, 137–158.
2. Гаврилов А.Б. Состояние и перспективы развития эталонной базы радиотехнических измерений ФГУП «СНИИМ» // Материалы научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». Т. 1. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. С. 32–40.
3. Малай И.М., Титаренко А.В., Шкуркин М.С. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы в области антенных измерений СВЧ-диапазона // Материалы научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». Т. 1. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. С. 111–116.