

IV. Этапы создания эталонов. Исторический ракурс

УДК 006.91:621.317

**ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ В ОБЛАСТИ
МЕТРОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

(к 110-летию со дня рождения В.С. Бузинова)

В.А. Тищенко

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
otd200@vniiftri.ru*

Вячеслав Сергеевич Бузинов — талантливый экспериментатор и организатор был первопроходцем в области отечественной метрологии электромагнитных полей в свободном пространстве. В статье рассмотрены проблемы, стоявшие при создании первых эталонов параметров электромагнитного поля и способы их решения, изложенные в его научных трудах.

Vyacheslav Sergeevich Buzinov, a talented experimenter and organizer, was a pioneer in the field of domestic metrology of electromagnetic fields in free space. The article deals with the problems that arose during the development of the first standards of the parameters of the electromagnetic field and the methods for their solution, which are set forth in his scientific works.

*Ключевые слова: метрология, электромагнитные поля, свободное пространство, эталон.
Key words: metrology, electromagnetic fields, free space, standard.*

Метрологическая научно-исследовательская лаборатория «Напряжённости поля и радиопомех» была создана в системе Комитета стандартов и измерительных приборов при Совете министров СССР в 1954 г. в Центральном научно-исследовательском институте радиоизмерений, который явился предтечей Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), организованного 18 февраля 1955 г.

В задачу лаборатории входила разработка средств и методов эталонирования параметров электромагнитного поля в свободном пространстве.

Первым начальником лаборатории 10 апреля 1954 г. был назначен Вячеслав Сергеевич Бузинов, руководивший лабораторией до 1970 г.

Вячеслав Сергеевич был незаурядной личностью — талантливый лидер, организатор и экспериментатор, великолепный наставник и учитель, общественно активный человек, заложивший в стране основы обеспечения единства измерений в области метрологии электромагнитных полей в свободном пространстве. Исторические вехи становления этого направления отражены в трудах В.С. Бузинова, опубликованных за 35 лет работы во ВНИИФТРИ. Рассматривая перечень научных трудов В.С. Бузинова, условно можно выделить 4 направления его деятельности по исследованию и созданию средств и методов эталонирования:

– напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 10 кГц – 50 МГц;

- напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 30 МГц – 1000 МГц;
- напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 150 кГц – 30 МГц;
- плотности потока энергии (мощности) в диапазоне частот выше 1 ГГц.

Среди научных трудов В.С. Бузинова особое место занимают обзорные статьи по состоянию метрологического обеспечения средств измерения радиочастотного электромагнитного поля в свободном пространстве.

Эталон напряжённости магнитного поля

Напомним, что радиосвязь в начале своего развития использовала низкочастотную часть радиочастотного спектра и начиная с 30 кГц постепенно осваивала более высокие частоты. Тем не менее первый в мире эталон напряжённости электрического поля появился в НБС (США) в 1950 г. на более высоких частотах, начиная с 30 МГц.

Такой выбор нижней частоты при эталонировании параметров электромагнитного поля был обусловлен тем, что с самого начала проведение измерений параметров электромагнитного поля при длинах волн больше 10 м, соответствующих частотам ниже 30 МГц, оказалось непростой задачей.

Оказалось невозможным заимствовать и совершенствовать преобразователи напряжённости электрического поля, предназначенные для создания электромагнитных волн, применяемые в радиосвязи, как это было сделано на частотах выше 30 МГц. Поэтому, используя то, что для сформированной электромагнитной волны в свободном пространстве существует соотношение, связывающее модули векторов напряжённости электрического (E) и магнитного (H) полей через волновое сопротивление среды Z , в которой она распространяется $E = ZH$, вместо «неудобной» для измерения напряжённости электрического поля на частотах ниже 30 МГц пришли к выводу о необходимости измерять другую величину — напряжённость магнитного поля.

Появился парк приборов для измерения напряжённости магнитного поля электромагнитной волны, и соответственно возникла потребность в обеспечении единства измерений в этой области. Поскольку всё начинается с вопроса об определении измеряемой величины, сразу возникла некоторая неоднозначность, связанная с терминологией. Оказалось, что к этому времени специалисты в области радиосвязи наработали собственную терминологию, в которой отсутствовали физические термины «напряжённость электрического поля» и «напряжённость магнитного поля», принятые для описания электромагнитных полей в электродинамике. Вместо этого был принят термин «напряжённость поля», который требует дополнительного уточнения.

Естественно, что на первых порах «связистский» термин использовался В.С. Бузиновым в своих публикациях. Поэтому-то к слову «напряжённость»

надо добавлять «электрического» или «магнитного» поля в зависимости от контекста.

Небрежность в терминологии привела к тому, что в диапазоне частот до 30 МГц нивелировалась разница между электрическими и магнитными антеннами. Магнитным антеннам пришлось приписывать калибровочный коэффициент в м^{-1} по эквивалентному электрическому полю $E^{\text{экв}}$, которое равно произведению напряжённости магнитного поля H и волнового сопротивления среды Z . Так как почти всегда значок «экв» опускают, то возникает путаница, которая осложняется тем, что измеряемые величины записываются в дБ, которые обожают связисты. Мы вынуждены остановиться на этом, так как путаница существует до сих пор. Такова могучая сила традиции.

Решение задачи создания эталона для поверки измерителей напряжённости магнитного поля явилось первой пробой научно-технического потенциала лаборатории В.С. Бузинова. Результаты разработки методики и образцовой аппаратуры для поверки измерителей напряжённости поля в диапазоне от 12 кГц до 25 МГц изложены в [1–3].

При создании эталонов параметров электромагнитного поля возможно использование двух методов: эталонного поля и эталонной антенны. В первом случае необходимо знание параметров электромагнитного поля, генерирующего источником в некоторой области пространства с высокой точностью. Во втором — должны быть известны электрические характеристики антенны, с помощью которой с высокой точностью измеряется необходимый параметр поля. Оценка погрешности методов образцовой (эталонной) антенны и образцового (эталонного) поля приведённая в [1] показала, что существенно меньшую погрешность может обеспечить эталон, базирующийся на методе эталонного поля, создаваемого рамочной антенной, размеры которой меньше длины волны, работающей в режиме генерации.

Поле, создаваемое таким источником, разделяют на зоны в зависимости от соотношения расстояния до точки наблюдения r и рабочей длины волны λ . Ближнюю — $r \ll \lambda$; дальнюю — $r \gg \lambda$ и промежуточную. В ближней зоне (зоне индукции) магнитное поле квазистационарно и по мере увеличения длины волны (уменьшения частоты) переходит в постоянное. В дальней зоне источника поле превращается в сферическую волну, в которой напряжённость электрического поля связана с напряжённостью магнитного поля уже упоминавшимся соотношением $E = ZH$.

В принципе градуировку и поверку средств измерения напряжённости магнитного поля можно проводить как в ближней, так и в дальней зоне источника магнитного поля. Последний вариант представляется даже более предпочтительным, так как даёт законные основания для выражения результатов в единицах напряжённости электрического поля. Однако, чтобы создать на больших расстояниях от источника $r \gg \lambda$ достаточный уровень

напряжённости магнитного поля, требуется создать в генераторной рамочной антенне значительный ток. И возникают две проблемы: где взять мощные генераторы и как измерить высокочастотный ток в антенне. Кроме того, с увеличением расстояния возрастает влияние помех, вызванных окружающей электромагнитной обстановкой. Поэтому, исходя из существующих реалий, выбор был сделан в пользу использования ближней зоны эталонного источника магнитного поля.

На основании принятых принципиальных решений была создана образцовая установка для поверки измерителей напряжённости магнитного поля УОП-0.012-50 в диапазоне частот от 10 кГц до 50 МГц с оценкой пределов погрешности для диапазона частот 10 кГц – 19 МГц $\pm 2,5\%$ и на частотах 10–50 МГц $\pm 4\%$ [2].

При разработке УОП-0.012-50 (рис. 1) для поверки измерителей напряжённости поля в качестве преобразователя эталонного поля использовалась одновитковая симметричная рамочная антенна, в которой ток измерялся с помощью вакуумного бесконтактного термопреобразователя типа ТВБ (рис. 2). Особенностью этого преобразователя является то, что цепь, в которой возникает термоэлектрическая э.д.с., не имеет гальванического контакта с цепью подогревателя, по которой протекает высокочастотный ток и тем самым не нарушает исходную симметрию рамочной антенны. Выбор такого типа преобразователя для измерения высокочастотного тока оказался весьма удачным. Термопреобразователь стал применяться и в последующих разработках, связанных с созданием средств эталонирования параметров электромагнитного поля.



Рис. 1. Излучающая рамочная антенна из состава УОП-0.012-50

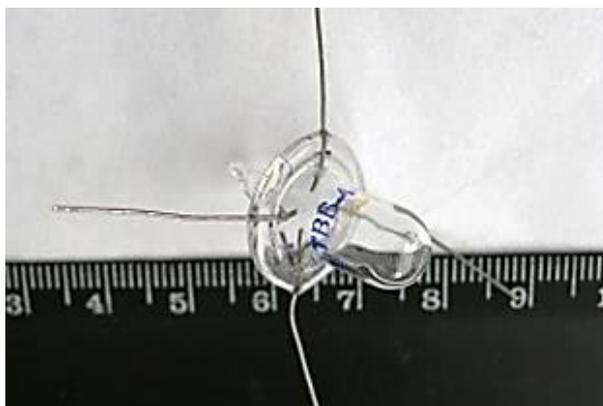


Рис. 2. Термопреобразователь бесконтактный вакуумный ТВБ

Важным элементом установки являлось симметрирующее устройство, которое обеспечивало симметричное возбуждение тока в рамке, что позволяло в зависимости от степени симметрии уменьшить синфазный ток, протекающий по внешней стороне оплётки высокочастотного кабеля, идущего от генератора напряжения к установке, и соответственно уменьшить создаваемое им электрическое поле, паразитное по отношению к магнитному полю рамки.

В методе образцового поля обеспечение соответствия поля, создаваемого реальной конструкцией установки, и поля физической модели излучателя является большой проблемой. Вопрос, как уменьшить и оценить вклад паразитных полей по отношению к эталонному полю, решается разными способами в зависимости от типа установки. Для эталонной установки УОП-0.012-50 оценивалась погрешность:

- из-за побочных излучений генератора сигналов и несовершенной экранировки высокочастотных трактов;
- влияния окружающих предметов в лабораторном помещении;
- несимметрии диаграммы направленности поля рамки.

В данном случае представляют интерес не столько сами конкретные значения величин, сколько количество оцениваемых факторов в качестве источников погрешности. Всего в [1] проанализировано 10 (десять!) источников погрешности. Тем не менее появляется работа [3], в которой проверяется эквивалентность результатов градуировки средств измерения магнитного поля в зоне индукции источника эталонного магнитного поля и в зоне излучения, в поле сформировавшейся электромагнитной волны, в которой оцениваются ещё четыре составляющих погрешности.

Такой подход характерен для работ первых создателей эталонов параметров электромагнитного поля и задаёт высокую планку требовательности к достоверности получаемых результатов, которую необходимо преодолевать их последователям.

Таким образом, основное направление в области развития метрологии переменного магнитного поля до 50 МГц было определено. Основные технические решения и элементы первой исходной эталонной установки УОП-0.012-50 были использованы в разработках образцовых средств измерения, в том числе и серийных (образцовая установка магнитного поля П1-4), при построении поверочных схем системы обеспечения единства измерений [4–6] и создании Государственного специального эталона напряжённости магнитного поля [7].

На повестке дня возникли другие задачи.

Отметим, что вновь возникший интерес к созданию эталонов напряжённости магнитного поля возник в 90-е годы. Толчком послужило изобретение источника электромагнитного поля на базе 4-проводной линии передачи [8], в реализации которого В.С. Бузинов принял живейшее, если не решающее участие [9, 10].

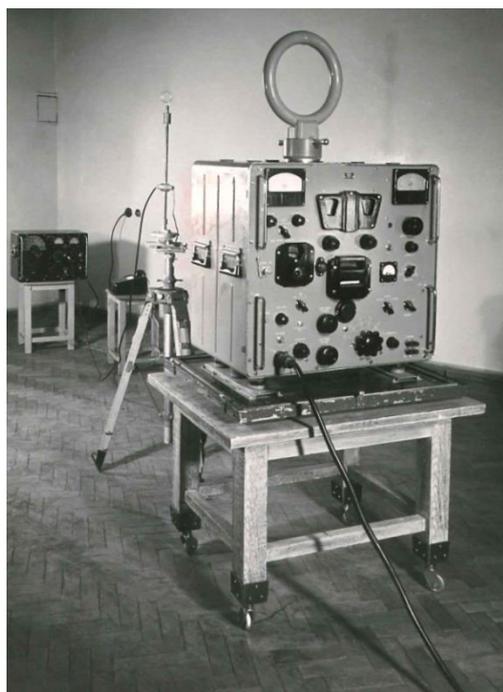


Рис. 3. Калибровка измерителя напряжённости магнитного поля с рамочной антенной

Электрическое поле в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц

Публикация, посвящённая созданию эталонов напряжённости электрического поля в диапазоне частот выше 30 МГц, появилась в трудах Национального бюро стандартов (НБС) США [11]. В этой работе было рассмотрено два метода эталонирования. Метод эталонного поля и метод эталонной антенны. Путём сличений 2-х методов оценка погрешности эталона составила 1 дБ в диапазоне частот от 30 до 300 МГц.

Измеренная величина среднеквадратического значения напряжённости электрического поля E определялась выражением:

$$E = \frac{\varepsilon}{l_0}, \quad (1)$$

где l_0 — модуль действующей длины антенны, определяемый из теоретических работ по электродинамическому расчёту дипольных антенн с тонкими электродами;

ε — э.д.с., наведённая в антенне, под воздействием электрического поля, измеренная с помощью высокоомного кристаллического детектора.

Первая работа во ВНИИФТРИ, посвящённая исследованиям по этому направлению, опубликована Бузиновым В.С. в 1961 г. [12].

Пройти по американскому пути в создании эталонов напряжённости электрического поля выше 30 МГц не получилось. Несмотря на разницу во времени первых публикаций в 11 лет, не удалось воспользоваться техническими решениями, применёнными в эталоне НБС. Связано это с тем, что в СССР не выпускались высокоомные кристаллические детекторные преобразователи напряжения, которые использовались в эталонах НБС. Имеющиеся детекторы были нестабильны, имели сильную температурную зависимость.

От выбора преобразователя существенно зависят характеристики создаваемого эталона, в первую очередь повторяемость результатов измерений, а следовательно, стабильность при воспроизведении единицы напряжённости В/м. Поэтому надо было найти доступный тип преобразователя и провести весь цикл исследований по определению его характеристик для применения в эталоне напряжённости электрического поля. Фактически пришлось начинать с чистого листа.

Выбор преобразователей высокочастотного напряжения невелик. Кроме кристаллического детектора, все остальные преобразователи основаны на тепловом эффекте. Это болометр, термистор и термопреобразователь (ТВБ). Все преобразователи такого типа являются относительно низкоомными. Их сопротивление (модуль импеданса) находится в диапазоне от 40 до 600 Ом и сравнимо с импедансом антенны. В этом случае усложняется соотношение, связывающее напряжённость электрического поля с высокочастотным напряжением (током) в преобразователе напряжённости электрического поля.

Выражение для э.д.с будет иметь вид:

$$\varepsilon = I \sqrt{(\operatorname{Re} Z_a + \operatorname{Re} Z)^2 + (\operatorname{Im} Z_a + \operatorname{Im} Z)^2}, \quad (2)$$

где I — среднеквадратическое значение тока, измеренное преобразователем в антенне; $\operatorname{Re} Z_a$, $\operatorname{Im} Z_a$, $\operatorname{Re} Z$, $\operatorname{Im} Z$ — действительные и мнимые части сопротивления антенны и преобразователя.

В случае использования высокоомного преобразователя, когда справедливо $|Z| \gg |Z_a|$, с учётом того, что $U = I/Z$, где U — измеренное среднеквадратическое значение напряжения на выходе антенны, получается формула (1) для напряжённости электрического поля, используемая в эталоне НБС.

Согласно (2), если считать измеряемой величиной среднеквадратический ток в антенне, то потребуются дополнительно знать 4 величины. Такова плата за усложнение формулы измерений.

По существу значительная часть дальнейших исследований, проводимых в лаборатории В.С. Бузинова по созданию эталона напряжённости электрического поля, аналогичного эталону НБС, связана с определением этих величин.

По результатам сравнительного исследования применения термопреобразователей ТВБ и термисторов для измерения тока в измерительной антенне

в диапазоне частот от 50 до 400 МГц в [12] был сделан вывод в пользу применения термопреобразователей, несмотря на то, что в рассматриваемом диапазоне частот реактивностью термисторов (мнимой частью Z) можно пренебречь, а у ТВБ с ростом частоты она становится заметной и её требовалось определять.

Такое, на первый взгляд, нелогичное решение, как показало время, было правильным. С использованием преобразователей ТВБ было создано несколько поколений эталонных средств измерений.

В [13] приведены результаты работы по созданию образцовой установки ОИМП 50-400 для поверки измерителей напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 50 до 400 МГц.

Воспроизведение напряжённости электрического поля осуществлялось методом эталонной антенны. Поверка рабочих измерителей напряжённости проводилась в стабильном поле, создаваемом излучающими антеннами с индикатором ВЧ тока на базе ТВБ, методом непосредственных сличений с эталонным измерителем напряжённости электрического поля.

Эталонный измеритель представлял настроенную в резонанс антенну с ТВБ на фиксированную частоту.

Э.д.с. в эталонной антенне определялась выражением

$$\varepsilon = \alpha I(R_{\Sigma} + R_T), \quad (3)$$

где α — коэффициент, учитывающий частотные свойства ТВБ;

$R_{\Sigma} = \operatorname{Re} Z_a$ — сопротивление излучения антенны;

$R_T = \operatorname{Re} Z$ — сопротивление термопреобразователя на постоянном токе.

Упрощение формулы измерения по сравнению с (2) произошло за счёт настройки антенны в резонанс.

В теории антенн для бесконечно тонкого полуволнового диполя принимается значение сопротивления излучения $R_{\Sigma} = 73,1$ Ом. Однако для реального конструктивно реализуемого диполя, у которого диаметр цилиндрических электродов конечен, требуется введение поправок, которые пропорциональны логарифму отношения длины волны к диаметру. У корифеев электродинамики в зависимости от способа решения задачи величины этих поправок различаются. Как следствие, невозможно достоверно оценить погрешность результата после их внесения.

Поэтому в [13] использовался экспериментальный метод настройки диполей в резонанс путём вариации сопротивлений, позволяющий определить сопротивление излучения. В нём использовались преобразователи с пренебрежимо малой реактивностью — болометр и термистор.

В результате пределы погрешности измерения напряжённости электрического поля за счёт погрешностей величин, входящих в формулу измерений оценивалась в $\pm 2,5$ %.

Только после изучения частотных свойств преобразователя удалось перейти собственно к определению погрешностей, связанных со спецификой измерения электромагнитных полей, результаты которых связаны с условиями измерений, которые должны в идеале соответствовать условиям свободного пространства.

Как правило, работы, связанные с измерением напряжённости электрического поля, производятся на антенной площадке, на некоторой высоте относительно поверхности земли, свойства которой могут оказывать влияние на результат измерений и являются источником погрешности. В [13] проведены оценки составляющих погрешности, связанные с измерениями в условиях антенной площадки: влияние земли, изменение температуры, точность установки антенн. Пределы суммарной погрешности ОИИП 50-400 оценивались в $\pm 4\%$.

В [14] показано, что идеология, заложенная при создании образцовых измерителей напряжённости электрического поля в диапазоне частот до 400 МГц, позволяет расширить частотный диапазон измерений до 1000 МГц.

Основанием для этого явились результаты работ по определению частотных свойств ТВБ [15, 16] и настройки антенн в резонанс [17] в расширенном диапазоне частот.

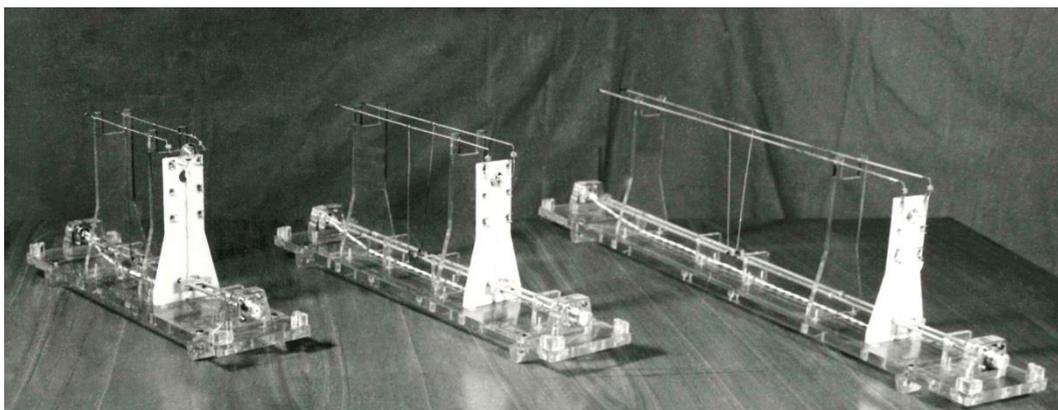


Рис. 4. Устройства для определения частотных характеристик ТВБ на частотах 300, 600 и 1000 МГц

В диапазоне частот до 1000 МГц пределы погрешности образцового измерителя напряжённости электрического поля оценены в $\pm 5\%$.

Возрастающие потребности в поверке и калибровке измерителей напряжённости электрического и магнитного полей и наработанный опыт создания образцовых средств в этой области привели к созданию серийных образцовых установок [5] для поверки и градуировки измерителей с рамочными (П1-4) и дипольными антеннами (П1-5). В метрологической иерархии

они получили статус 2-го разряда. Вначале эти установки выпускались на опытном заводе ВНИИФТРИ, потом — на заводе «Эталон», г. Минск.

Несмотря на то, что их выпуск был прекращён в 1994 г., установки П1-4 и П1-5 до сих пор верой и правдой служат отечественной метрологии.

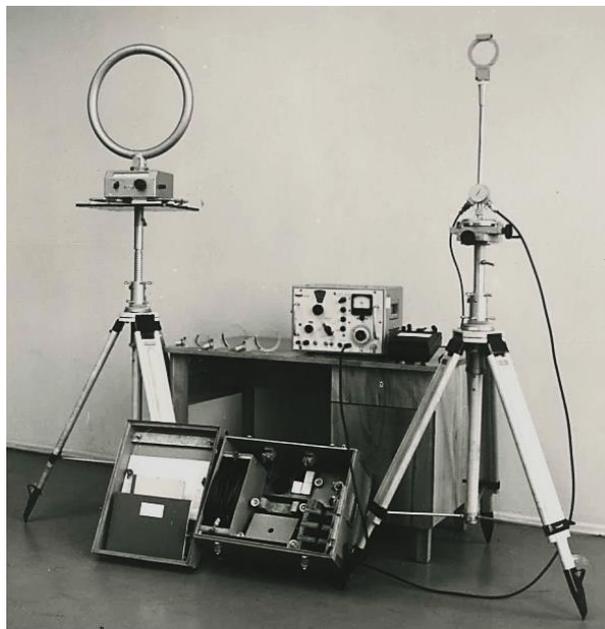


Рис. 5. Образцовая установка П1-4

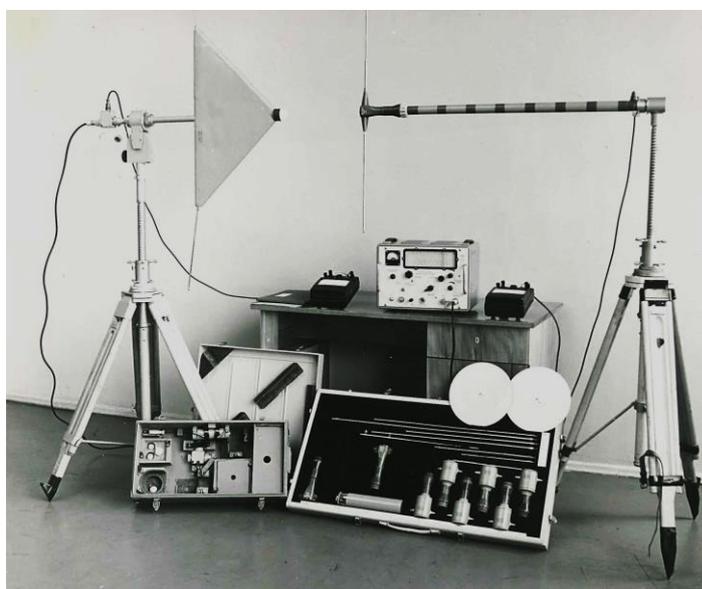


Рис. 6. Установка П1-5

В 70-е гг. существовало требование, согласно которому организация, разрабатывающая средство измерений, должна была позаботиться о возможности его первичной и периодической поверки при серийном выпуске и эксплуатации. В случае отсутствия средств поверки они подлежали разработке и выпуску для оснащения государственных поверочных органов.

Поэтому параллельно с внедрением в серийное производство образцовых установок П1-5 была разработана образцовая установка для её поверки [18].

Образцовую установку ОИМП 50-400 заменила установка УНЭП-1 в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц [18]. Следует отметить одну особенность образцовых установок П1-5 и УНЭП-1. В диапазоне частот 30–70 МГц в них используются преобразователи с одинаковой длиной вибраторов, принудительно настроенные в резонанс с помощью индуктивности. Длина вибраторов соответствует требованию стандарта «Приборы для измерения промышленных радиопомех, технические требования и методы испытаний», согласно которому на полосу от 30 до 80 МГц должен применяться «линейный симметричный вибратор, размер которого равен длине полуволнового симметричного вибратора на частоте 80 МГц».

Другими словами, вместо резонансных длин, достигающих до 5 м на частоте 30 МГц, максимальная длина поверяемой антенны составит 1,87 м.

Таким образом, линейные размеры поверяемых антенн близки по длине с образцовыми антеннами, что позволяет ослабить требования к условиям измерений, в частности, даёт возможность проводить поверку в относительно небольшом помещении 6×8×3,5 м, оборудованном щитами с радиопоглощающим материалом. Пределы допускаемой погрешности установки УНЭП-1 оценивались в пределах $\pm 5\%$. Соотношение между пределами погрешности П1-5 и УНЭП-1 составило 1,2.

Цикл исследований и разработок в области измерений напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц был завершён в 1975 г. созданием Государственного специального эталона единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 30–1000 МГц [19].

Воспроизведение напряжённости электрического поля эталоном осуществлялось в соответствии с формулами (1, 3). Поверочная схема состояла из эталона, образцовых средств 1-го и 2-го разрядов и рабочих средств измерений. Передача размера единицы осуществлялась методом непосредственных сличений.

Таким образом, завершился этап создания действующей метрологической службы, обеспечивающей воспроизведение и передачу размера единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц.

Но интерес к проведению исследований по этому направлению не пропал. Связано это с формулой измерений, точнее, с тем, с какой точностью определены параметры эталонной антенны. По общему мнению, максимальная

точность достигается для настроенных в резонанс антенн. Однако ни один из существующих на то время электродинамических методов расчёта параметров физически реализуемой модели антенны с цилиндрическими электродами не имел оценки точности. Поэтому хотелось определить эти параметры экспериментальными методами для уменьшения погрешности измерения напряжённости электрического поля. К работам в этом направлении относятся:

- экспериментальное определение действующей длины и сопротивления излучения полуволнового вибратора [20];
- методы определения резонансной длины антенны [21–23];
- сличение двух методов измерения напряжённости на частотах 300–1000 МГц [24];
- повышение точности метода образцового поля при использовании дипольных антенн [25].

Характерен вывод, сделанный в [24]: «Результаты сличений показали, что при аттестации рассмотренных ИНП (эталонных преобразователей) не допущены значительные систематические погрешности, основными из которых являются погрешности определения $h_d(l_d)$ и R_Σ вибраторных антенн».

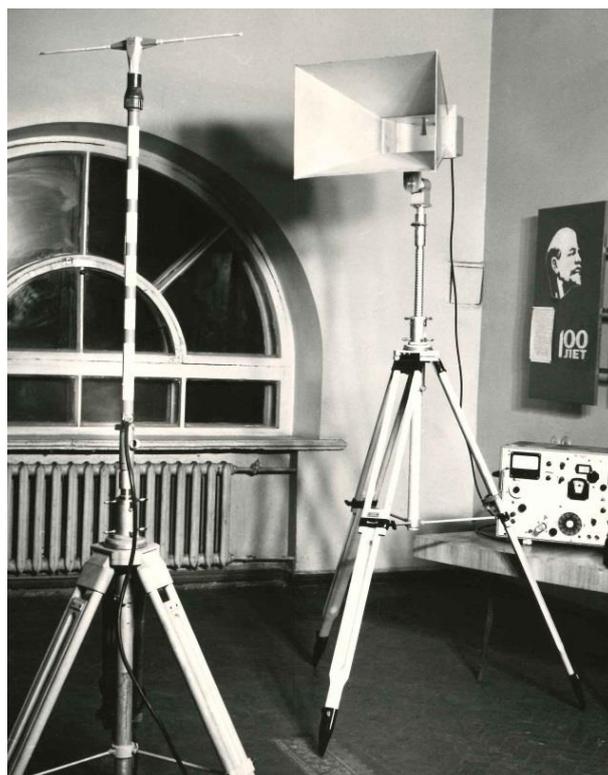


Рис. 7. Сличение дипольной и рупорной антенн

К концу 80-х гг. для дальнейшего кардинального повышения точности исходного для страны эталона единицы напряжённости электрического поля ресурсы были исчерпаны. Нужны были новые технические решения, позволяющие двигаться дальше. В результате поиска новой модели эталонных преобразователей оказалось, что математическая модель в виде биконической антенны с нагрузкой между конусами, помещённая в поле плоской волны, допускает расчёт с гарантированной точностью действительной и мнимой части сопротивления антенны и действующей длины в зависимости от частоты.

Вячеслав Сергеевич Бузинов с энтузиазмом подключился к созданию нового типа эталонных преобразователей на этапе конструирования и создания технологии изготовления [26]. Центральным вопросом стала экспериментальная проверка соответствия реальной биконической антенны и расчётной модели. Для этого был использован опыт работы и методы, применяемые при создании эталонных антенн с цилиндрическими преобразователями при определении резонансной частоты и сопротивления излучения. Из полученных результатов измерений с биконической антенной следовало, что расхождение вычисленных и экспериментально полученных значений совпало в пределах точности эксперимента, что безусловно вселило уверенность в правильности избранного направления исследований по созданию эталона нового поколения [27].

Немаловажным являлся вопрос, связанный с количеством эталонных преобразователей, требуемых для перекрытия частотного диапазона от 30 до 1000 МГц с необходимым диапазоном измерений. Ранее для этого использовались 21 резонансная эталонная антенна. Диапазон измерений составлял от 0,2 до 10 В/м в зависимости от частоты. Этот диапазон обеспечивается семью широкополосными преобразователями, имеющими резонансные частоты 80, 150, 200, 300, 450, 600 и 800 МГц. Широкополосность позволяет проводить сличения между соседними по частоте преобразователями, что увеличивает метрологическую надёжность эталона нового поколения [28].

Электрическое поле в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц

Необходимость в эталонах напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц появилась не в радиосвязи, а в Управлении ядерных боеприпасов Министерства обороны США. По заказу этого ведомства в НБС были разработаны измерители напряжённости электрического поля с диапазоном измерений от 0,1 до 1000 В/м, предназначенные для измерения сложных электрических полей, возникающих в ближней зоне источника электромагнитного поля. Эти измерители предназначались для оценки устойчивости бесконтактных взрывателей снарядов к воздействию

сильных электромагнитных полей, то есть решения более общей задачи электромагнитной совместимости технических средств, не относящейся прямо к радиосвязи. Для калибровки разработанных измерителей в НБС были созданы временные эталоны единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц.

В лаборатории В.С. Бузинова также проводились исследования в области создания эталонов напряжённости электрического поля на частотах от 0,15 до 30 МГц. Правда, с несколько иным прицелом. В СССР появились приборы, предназначенные для контроля санитарных норм по напряжённости электрического поля в указанном диапазоне частот с целью обеспечения электромагнитной безопасности человека в производственных и бытовых условиях.

Первая публикация по теме, посвящённой калибровке малых дипольных антенн, появилась в 1966 г. [29]. В ней была показана возможность использования полеобразующей системы в виде конденсатора из двух пластин, между которыми при наличии разности потенциалов возникает известное электрическое поле, в которое помещается электрически малая антенна для калибровки. Получены результаты, позволяющие при заданном размере антенны определить расстояние между пластинами, при котором взаимодействием в системе антенна – конденсатор можно пренебречь.

Следующая работа [30] содержит подробное описание образцовой установки для поверки и калибровки малых дипольных антенн с достаточно полным анализом составляющих погрешности при воспроизведении напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,15 до 50 МГц.

Полученный результат показал, что до 10 МГц выполняется условие квазистатического приближения для поля при размерах пластин конденсатора 1×1 м и расстоянии между ними 0,5 м. Пределы погрешности воспроизведения напряжённости электрического поля оценивались в ± 2 %. На более высоких частотах проявляется волновой характер поля, который изучался экспериментально.

На основании полученных данных в диапазоне частот выше 10 МГц было предложено использовать конденсатор с пластинами $0,6 \times 0,6$ м. Пределы погрешности воспроизведения напряжённости электрического поля оценивались в $\pm(3-5)$ %.

На высоких частотах распределение тока и напряжения анализировалось на основе модели ненагруженной длинной линии передачи. Интересно, что в последующем на основе четырёхпроводной линии передачи была создана образцовая установка на частоты выше 10 МГц [10, 31], на которую было получено авторское свидетельство [8].

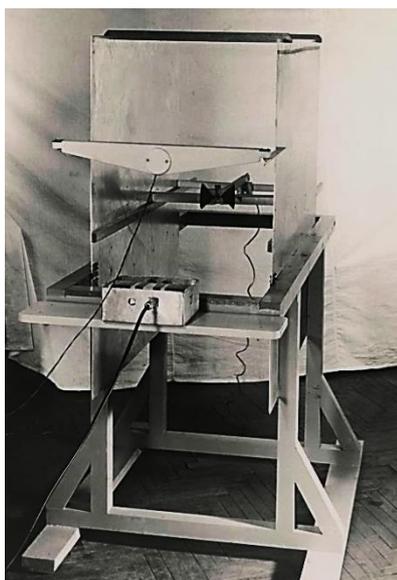


Рис. 8. Макет конденсатора с квадратными пластинами. На переднем плане — термовольтметр. Между пластинами установлена малая биконическая антенна измерителя напряжённости электрического поля

В работах по созданию эталонов напряжённости электрического поля на частотах до 30 МГц экспериментальное мастерство и интуиция В.С. Бузинова просто удивляют. Например, как выяснилось в результате дальнейших исследований, выбранное им соотношение размеров пластин конденсатора и расстояния между ними при размерах калибруемой антенны менее 10 см является наилучшим с точки зрения наименьшего отличия напряжённости электрического поля, создаваемого в рабочей зоне при калибровке, от поля пустого конденсатора с бесконечными пластинами. Из-за конечных размеров пластин поле в центре уменьшается, а за счёт взаимодействия с антенной — увеличивается. Для конденсатора с круглыми пластинами при размерах радиуса пластины и расстояния между ними равными 0,5 м эти поля компенсируют друг друга с точностью 0,1 %.

Эталон плотности потока энергии (мощности) в диапазоне частот выше 1 ГГц

В связи с увеличением объёма работ и развитием новых направлений исследований из лаборатории измерения напряжённости поля и помех выделилась группа сотрудников, образовавших новую лабораторию антенных измерений. Лаборатории разделились по «частотному» признаку. За лабораторией В.С. Бузинова были закреплены работы, ограниченные диапазоном частот до 1 ГГц, в котором измерялись напряжённость электрического и

магнитного поля. За новой лабораторией были закреплены работы, связанные с измерениями параметров электромагнитных полей в частотном диапазоне выше 1 ГГц. Поэтому три статьи [32–34], вышедшие в 1996 г., явились своеобразным отчётом, подводившим черту в исследованиях и разработках от 1 до 1,6 ГГц, при передаче направления в новую лабораторию.

На частотах выше 1 ГГц в качестве параметра, характеризующего электромагнитное поле в свободном пространстве, принято использовать величину, размерность которой Вт/м^2 . Эта величина именуется плотностью потока энергии. Вектор этой величины в электродинамике носит название «вектора Пойнтинга» и является векторным произведением напряжённостей электрического (В/м) и магнитного полей (А/м).

В рассматриваемых работах вместо «плотности потока энергии» используется термин «плотность потока мощности», что неверно, т.к. размерность упомянутой величины $\text{Вт/м}^2\cdot\text{с}$. Появление термина, скорее всего, связано с дословным переводом с английского сочетания: «power flux density» — «плотность + потока + мощности», который бытовал в научно-технической литературе и жив до настоящего времени. Поэтому при анализе сохранена терминология оригиналов.

Создание эталонных средств измерений плотности потока мощности была связана с необходимостью обеспечения поверки и калибровки выпускаемого промышленностью прибора ПО-1, предназначенного для контроля санитарных норм в целях охраны труда в диапазоне частот от 150 до 16600 МГц.

В состав ПО-1 входят измерители плотности потока мощности с двумя логарифмическими антеннами в диапазоне частот от 150 до 300 МГц (П6-22) и от 300 до 1800 МГц (П6-21), а также измеритель плотности потока мощности с рупорными антеннами на частотах от 1800 до 16600 МГц.

Для поверки части комплекта ПО-1, в который входят логарифмические антенны, были разработаны образцовые измерители плотности потока мощности АЛТ-1 и АЛТ-2 [32]. Измерение плотности потока мощности сводится к измерению тока в антенне с помощью ТВБ и дальнейшему расчёту. АЛТ-1 и АЛТ-2 характеризуются коэффициентом K , устанавливаемым после аттестации.

Аттестацию в диапазоне частот до 1000 МГц предлагается проводить с помощью полуволновых диполей, на более высоких частотах — с помощью рупорных антенн. Погрешность измерения АЛТ-1 и АЛТ-2 оценивается от 5,5 до 7,5 % в зависимости от частоты. В [33] для аттестации АЛТ-1 и АЛТ-2 в диапазоне до 1800 МГц предложено использовать в качестве исходных антенны АЛ-1 и АЛ-2, которые характеризуются «эффективной поверхностью», определяемой методом двух антенн. Отмечается, что с помощью исходных измерителей плотности потока мощности возможна аттестация АЛТ-1 и АЛТ-2 с погрешностью 9 %.

Таким образом, возникает иерархическая цепочка: средства аттестации АЛ → приборы АЛТ → антенны П6 из состава ПО-1.

Возникает законный вопрос, зачем строить такую сложную цепочку для обеспечения поверки измерителей плотности потока мощности с антеннами ПЗ-21 и ПЗ-22 из состава ПО-1. Антенны АЛТ представляются лишними.

Обычно уменьшение количества звеньев даёт выигрыш в точности при передаче размера единицы. Однако в данном случае действовали другие требования.

Существовавший порядок метрологического обеспечения производства и серийного выпуска средств измерений предписывал, что приборы, относящиеся к измерениям, обеспечивающим контроль санитарных норм, к которым относился прибор ПО-1, подлежат госповерке, т.е. их поверка должна была выполняться только территориальными органами ГМС. В обязанности органа ГМС, на территории которого находилось предприятие, входили первичная поверка и контроль метрологических правил и норм при выпуске средств измерений. При этом он обладал нешуточными полномочиями. В правах органа ГМС входила возможность разрешения и приостановки выпуска средств измерений в случае выявленных нарушений. Для выполнения своих полномочий орган ГМС должен быть оснащён требуемыми образцовыми средствами. Поэтому с этой точки зрения комплект АЛТ был необходим, хотя и требовал условий, максимально приближенных к условиям свободного пространства [34]. С другой стороны, сами образцовые средства должны были быть поверены на вышестоящих исходных образцовых средствах, роль которых играли антенны АЛ-1 и АЛ-2, которые аттестовывались методом двух антенн по эффективной площади в составе измерителя плотности потока мощности [32].

Время показало, что принятые решения были дальновидными и заложили основу обеспечения единства измерений плотности потока электромагнитной энергии.

Обзоры

В.С. Бузинов является автором двух обзорных статей, которые были опубликованы с интервалом в 20 лет [4, 35]. Первая, опубликованная в 1969 г., называлась «Современное состояние техники калибровки и поверки измерителей напряжённости поля и измерительных антенн». В ней на основе проведённого анализа приведена единая система соподчинения существующих образцовых средств для калибровки и поверки рабочих средств измерений по точности в виде поверочных схем в области измерений «магнитной и электрической составляющих электромагнитного поля», а также «плотности потока мощности». Поверочные схемы возглавляются рабочими эталонами, от которых единицы воспроизводимых величин последовательно передаются

образцовым средствам 1-го и 2-го разрядов и через них рабочим приборам с указанием погрешности каждого звена.

Поскольку единицы электромагнитных величин, воспроизводимые рабочими эталонами, являются производными в СИ, то интересно, что в приведённом составе рабочего эталона прослеживается связь со средствами измерений основных физических единиц СИ.

Типовая погрешность рабочих средств измерения указывается в виде $\delta \geq A$, где A — величина погрешности в процентах, составляющая у приборов:

- для измерения магнитного поля — 12–15 %;
- измерителей электрического поля и дипольных антенн — 12 %;
- логарифмических антенн — 20 %;
- рупорных антенн и измерителей плотности мощности — 12 %.

Таким образом, впервые были созданы поверочные схемы для средств измерения параметров электромагнитного поля в свободном пространстве, которые явились прообразом для современных поверочных схем. Это было свидетельством зрелости обеспечения единства измерений в направлениях, сформированных лабораторией В.С. Бузинова.

Вторая публикация обзорного характера [35] называется «Пути развития образцовых средств измерения напряжённости поля и помех». Я бы в название добавил слово «пройденные», т.к. в статье описаны основные вехи создания методов и эталонной аппаратуры в лаборатории и конечный результат, обеспечивающий функционирование поверочных схем, которые к тому времени возглавлялись государственными специальными эталонами, утверждёнными Госстандартом СССР.

Ценность публикаций В.С. Бузинова состоит в том, что они не являются «проходными», а каждая из них является вкладом в формирование рассматриваемого направления, и за ней стоят серьёзные исследования и материальное практическое воплощение результатов. Работы выполнялись в рамках многочисленных НИР и ОКР, ведущихся в лаборатории, руководителем и ответственным исполнителем которых он был. По результатам лаборатория выпускала образцовые средства измерений. Перечень установок, выпущенных в период с 1960 по 1965 г., приведён в таблице.

Таблица

№ п/п	Наименование	По заказу Комитета стандартов	По заказу промышленности
1	УОП-0,012-50	3	1
2	ОИНП-50-400	4	1
3	ОИНП-50-1000	1	1
4	Комплект образцовых антенн для поверки ПО-1	6	8

Разработанные позже установки П1-4 и П1-5 были внедрены в серийное производство на заводе «Эталон», г. Минск.

Не могу не упомянуть ОКР «Полесье», поставленную в 1968 г., которая была в определённом смысле обобщающей накопленный опыт создания образцовых средств измерений в области параметров электромагнитного поля в свободном пространстве. Целью разработки, изготовления и аттестации образцовых установок 1-го и 2-го разрядов для поверки измерителей напряжённости поля, измерительных антенн и измерителей радиопомех было оснащение лабораторий Белорусского и Украинского республиканского центров метрологии и стандартизации Госстандарта СССР.

Какова же нынешняя ситуация с метрологией параметров электромагнитных полей в свободном пространстве, в развитие которых вложено много сил и труда В.С. Бузинова?

Лаборатория, созданная В.С. Бузиновым, существует с несколько изменённым названием «Измерения напряжённости электрического и магнитного поля». В лаборатории содержатся три государственных первичных эталона:

- Государственный первичный эталон единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 0,01 до 30 МГц (ГЭТ 44-2010);
- Государственный первичный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0,0003 до 1000 МГц (ГЭТ 45-2011);
- Государственный специальный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0 до 20 кГц (ГЭТ 158-96).

Вернулось во ВНИИФТРИ направление, связанное с измерениями электромагнитных полей в свободном пространстве выше 1 ГГц. В лаборатории «Измерения плотности потока энергии» хранится и эксплуатируется Государственный первичный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот от 0,3 до 178 ГГц (ГЭТ 160-2006).

Таким образом, наследие В.С. Бузинова сохранено. Каким образом оно создавалось, можно узнать из его публикаций, приведённых в разделе «Литература».

Литература

1. Бузинов В.С. Исследование погрешности метода поверки измерителей напряжённости (магнитного) поля в диапазоне частот от 12 кГц до 25 МГц. Исследования в области радиотехнических измерений / Труды институтов Комитета. Вып. 48 (108). М.: Стандартгиз, 1960. С. 139–151.
2. Бузинов В.С. Сличение методов поверки рамочных измерителей напряжённости (магнитного) поля в поле индукции и в поле излучения. Исследования в области радиотехнических измерений / Труды институтов Комитета. Вып. 53 (113). М.-Л.: Стандартгиз, 1961. С. 103–105.

3. Бузинов В.С. Установка для поверки рамочных ИНП по образцовому полю индукции // Измерительная техника. 1961. № 6. С. 46–48.
4. Бузинов В.С. Современное состояние техники калибровки и поверки измерителей напряжённости поля и измерительных антенн // Измерительная техника. 1969. № 12. С. 41–45.
5. Бузинов В.С., Белякова Г.М., Мелехов М.Е., Филонов А.Н. Образцовые установки для поверки и градуировки измерителей напряжённости поля с рамочными и дипольными антеннами // Измерительная техника. 1972. № 5. С. 55–56.
6. Бузинов В.С. Образцовая установка для поверки приборов П1-4 и ИНП с рамочными антеннами // Измерительная техника. 1973. № 8. С. 74–75.
7. Бузинов В.С., Белякова Г.М., Мелехов М.Е. Государственный специальный эталон единицы напряжённости магнитного поля в диапазоне частот 0,01–30 МГц // Измерительная техника. 1974. № 4. С. 5–7.
8. Бузинов В.С., Тищенко В.А., Токатлы В.И. А.С. № 1385100 СССР. Устройство для градуировки измерителя напряжённости поля с дипольной или рамочной антенной / Открытия, изобретения: бюл. 1988. № 12.
9. Бузинов В.С., Васенков Л.В., Токатлы В.И. Источник образцового магнитного поля на базе четырёхпроводной линии // Измерительная техника. 1990. № 5. С. 51–52.
10. Бузинов В.С. Четырёхпроводная линия градуировки измерителей напряжённости поля с малыми рамочными и дипольными антеннами // Измерительная техника. 1991. № 3. С. 66–67.
11. Green F.M., Solow V.J. Development of Very-High-Frequency Field-Intensity Standards // J. Res. NBS. May 1950. № 44. P. 527–554.
12. Бузинов В.С. Применение термопреобразователей и термисторов для измерения тока в измерительной антенне // Измерительная техника. 1961. № 12. С. 46–48.
13. Бузинов В.С. Образцовая установка для поверки измерителей напряжённости (электрического) поля в диапазоне 50–400 МГц // Измерительная техника. 1962. № 11. С. 45–48.
14. Бузинов В.С. Образцовый измеритель напряжённости поля // Измерительная техника. 1964. № 8. С. 54–55.
15. Бузинов В.С., Белякова Г.М. Определение частотной погрешности термопреобразователей типа ТВБ // Измерительная техника. 1965. № 11. С. 36–38.
16. Бузинов В.С., Белякова Г.М., Тищенко В.А. Определение частотной погрешности термопреобразователей ТВБ // Измерительная техника. 1977. № 4. С. 61–62.
17. Бузинов В.С. Измерение сопротивления излучения настроенной дипольной антенны методом вариации сопротивлений // Труды институтов Комитета. М.: Изд-во стандартов, 1966. С. 54–57.

18. Бузинов В.С., Белякова Г.М., Мелехов М.Е., Филонов А.Н. Образцовая установка для поверки приборов П1-5 и ИНП с дипольными антеннами // Измерительная техника. 1974. № 7. С. 39–40.
19. Белякова Г.М., Бузинов В.С., Мелехов М.Е., Тищенко В.А., Филонов А.Н. Государственный специальный эталон единицы напряжённости электрического поля в диапазоне частот 30–1000 МГц // Измерительная техника. 1976. № 3. С. 46–47.
20. Бузинов В.С., Мелехов М.Е. Экспериментальное определение действующей длины и сопротивления излучения полуволнового вибратора // Метрология. 1978. № 6. С. 73.
21. Антонова Т.Н., Бузинов В.С. Резонансная длина измерительных полуволновых антенн // Измерительная техника. 1979. № 6. С. 50.
22. Бузинов В.С., Тищенко В.А. Настройка дипольной антенны в резонанс // Исследования эталонов сравнения в области радиотехнических измерений. Сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1982. С. 48.
23. Бузинов В.С., Тищенко В.А. Определение резонансной частоты полуволновой дипольной антенны // Исследования в области радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1985. С. 91.
24. Бузинов В.С. Повышение точности метода образцового поля при использовании дипольных антенн // Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1987. С. 104.
25. Бузинов В.С., Иванов П.Е., Исакова Н.Н. Исследование точности конструкции конусов для образцовых биконических антенн // Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1987. С. 150.
26. Бузинов В.С. Измерение резонансной частоты и сопротивления излучения полуволновых биконических антенн // Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1988. С. 4–8.
27. Бузинов В.С., Исакова Н.Н., Тищенко В.А. Исходный образцовый широкополосный измеритель напряжённости электрического поля // Измерительная техника. 1990. № 10. С. 44–45.
28. Бузинов В.С., Кинбер Б.Е., Цейтлин В.Б. Калибровка малых дипольных антенн в поле плоского конденсатора, Всесоюзный научно исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений. Исследования в области радиотехнических измерений // Труды институтов Комитета. М.: Изд-во стандартов. Вып. 81(141).
29. Бузинов В.С. Образцовая установка для поверки и калибровки малых дипольных антенн // Измерительная техника. 1967. № 6. С. 50–53.
30. Бузинов В.С., Тищенко В.А. Источник образцового электрического поля для градуировки измерителей напряжённости поля (ИНП) // Исследования

- ния в области прецизионных радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1988. С. 16–20.
31. Бузинов В.С. Образцовый измеритель плотности потока СВЧ мощности // Измерительная техника. 1966. № 1. С. 79–80.
 32. Бузинов В.С., Корнышов Н.И. Аттестация образцового измерителя плотности потока мощности для диапазона 150–1800 МГц // Труды институтов Комитета. М.: Изд-во стандартов, 1966. С. 57.
 33. Бузинов В.С., Мелехов М.Е. Поверка антенн П6-21 и П6-22 в помещении // Труды институтов Комитета. М.: Изд-во стандартов, 1966. С. 63.
 34. Бузинов В.С. Пути развития образцовых средств измерения напряжённости поля и помех // Исследования в области прецизионных радиотехнических измерений: сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М., 1989. С. 4.