

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 621.317

В. Г. ЧУИКО, канд. техн. наук

СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ СВЧ, ЗАДАЧИ И ПУТИ ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Электромагнитное излучение для передачи и обработки информации или обработки материалов и веществ применяется все шире. Постоянное расширение рабочего диапазона длин волн приводит к увеличению количества источников излучения (генераторов), что, в свою очередь, порождает потребность в средствах измерения их интенсивности излучения. В диапазонах волн, где количество источников (как в СВЧ-диапазоне) составляет десятки или сотни тысяч, число измерителей также исчисляется десятками тысяч. В диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн основным параметром, характеризующим интенсивность излучения, является мощность. Для обеспечения положения, когда результаты всех выполняемых в стране измерений сопоставимы и выражаются в одних гостированных единицах, создается система метрологического обеспечения (СМО). Эта система состоит из набора взаимосвязанных элементов: исходных средств измерений высшей точности — государственных эталонов или установок высшей точности (УВТ); вторичных эталонов и образцовых средств измерений (ОСИ); нормативно-технической документации, регламентирующей методы и средства поверки и испытаний средств измерений (СИ); поверочных лабораторий и кадров, выполняющих работу по МО. Постоянное и объективно необходимое совершенствование СМО имеет характер проблемы, состоящей в том, что с развитием техники одновременно увеличивается количество и точность средств измерений. Повышение точности рабочих средств измерений требует «приближения» их к эталонам, в то время как увеличение количества рабочих средств измерения (РСИ) при иерархических централизованных способах воспроизведения и передачи размера единицы «отдаляет» РСИ от эталонов.

Имеется большое количество работ, содержащих достаточно полную информацию как по состоянию техники измерений СВЧ-мощности ограниченной точности, так и о методах и средствах измерений высшей точности [1; 2; 3]. Однако в этих работах по существу нет ответов на вопросы, возникающие при рассмотрении СМО в целом. Например, необходимо определить следующее: в каких случаях и почему необходимо централизованное воспроизведение и возможно ли децентрализованное воспроизведение единицы мощности СВЧ; что такое воспроизведение размера единицы и на чем оно должно быть основано; каким способом и средствами гарантируются погрешности рабочих и исходных СИ на любой произвольной частоте и в динамическом диапазоне нескольких десятков дБ; какие пути следует выбирать при развитии работ по совершенствованию СМО.

Таким образом, необходим анализ новых возможностей и технических решений по созданию измерителей мощности с точки зрения целесообразности их применения в СМО, влияния на развитие СМО и выбор путей дальнейшего совершенствования СМО.

Централизованное воспроизведение единиц. Такой порядок воспроизведения накладывает на гибкость СМО ограничения в виде достаточно жесткой иерархии эталонов и ОСИ. Пункт 1.2 любого стандарта на эталон и поверочную схему часто толкуется как обязательность сличения любого прибора «по цепочке» в конечном счете с государственным эталоном или УВТ. Такое толкование вызывает иногда возражения вплоть до требований децентрализованного воспроизведения. Накопленный автором опыт руководства работами по созданию эталонной базы в радиоизмерениях позволяет определить ряд факторов, которые следует учитывать при решении вопроса о целесообразности централизованного или децентрализованного воспроизведения единиц. Эти факторы можно разбить на три группы: технические, экономические, дополнительные. К техническим относятся: возможность технической реализации исходного СИ требуемой точности; возможность реализации СИ для централизованного воспроизведения единицы и для сличений этих СИ между собой с малой погрешностью, сравнимой с погрешностью воспроизведения; количество факторов (источников погрешностей), влияющих на погрешность воспроизведения, возможности и техническую реализуемость их изучения и учета значения коэффициентов влияния; достижимая точность градуировки ОСИ и РСИ при различных вариантах построения СМО: иерархической с одним исходным СИ высшей точности либо иерархической с локально децентрализованным воспроизведением единицы; количество РСИ в стране; техническое быстроедействие приборов и установок при проведении сличений; вероятность ухудшения технических и метрологических характеристик при их перемещении (перевозке) для градуировки и поверки. К экономическим факторам следует отнести: стоимость поверочного оборудования при различных способах построения СМО; стоимость всего парка РСИ; ущерб от изымания РСИ на период поверки из эксплуатации, рассчитываемый как стоимость СИ, необходимых для замены выбывших в поверку; материальные затраты по перевозке СИ и командированию работников; требуемая квалификация персонала, заработная плата, наличие подготовленных кадров и т. п. Следует учитывать также дополнительные факторы: наличие подобных эталонов в других развитых странах и необходимость участия в международных сличениях; необходимость создания единой службы в СЭВ; устойчивость функционирования при выходе из строя отдельных звеньев и элементов СМО; обязательность государственной поверки некоторых групп СИ, например таких, как измерители плотности потока мощности.

Детальный анализ и учет перечисленных факторов приводит к необходимости создания в СССР исходных СИ мощности СВЧ на уровне государственных эталонов.

Воспроизведение единицы СВЧ-мощности. Сначала необходимо определить величину, которую должен воспроизводить эталон. Сигналы,

интенсивность которых приходится измерять в радиотехнике СВЧ, бесконечно разнообразны и различаются диапазоном частот, спектральным составом, соотношением амплитуд различных спектральных составляющих, видом и характером модуляции, распределением интенсивности в пространстве.

Наивысшая точность может быть достигнута только при строго определенных условиях, причем таких, когда реальные условия максимально приближаются к некоторой идеальной модели. Поэтому модель должна быть простейшей. Исходя из этого требования, эталон создают для мощности монохроматического электромагнитного излучения, распространяющегося от неотражающего генератора в бесконечном однородном волноводе (односвязном или двухсвязном) со стандартным размером поперечного сечения. Определение понятия «воспроизведение» имеет исключительно важное значение, так как от его содержания зависят погрешности воспроизведения, т.е. погрешности эталона. Единица мощности СВЧ должна воспроизводиться эталоном в виде материальной меры. Такой мерой может быть генератор либо измеритель. Выбор определяется возможностями привязки к эталонам основных единиц, обеспечения сохраняемости, стабильности и возможностями контроля стабильности во времени. Контроль стабильности уровня мощности любого генератора осуществляется с наименьшей погрешностью только измерителем мощности, осуществляющим прямые измерения, а сохраняемость (срок службы) измерителей намного больше. Поэтому измеритель приходится применять в качестве вещественной меры, т. е. эталона. Контроль стабильности во времени эталонного измерителя должен осуществляться методом косвенных измерений на основе привязки к эталонам основных единиц. Итак, воспроизведении единицы мощности СВЧ будем называть измерение мощности, излучаемой идеально стабильным неотражающим генератором в бесконечный однородный волновод без потерь, измерителем мощности, принятым за эталон. Соответственно погрешностью воспроизведения будет погрешность измерения мощности идеально согласованного, монохроматического и стабильного генератора при помощи измерителя мощности, принятого за эталон.

Выбор теплового принципа измерения. Измерение мощности СВЧ-излучения неизбежно связано с преобразованием энергии излучения в одну из физических величин, для которой в системе СИ введены основные механические или электрические единицы. Для эталона допустимо применение только такого измерителя, который поглощает и преобразует в другой вид энергии все излучение либо не поглощает и не преобразует его вовсе. Если в эталонном измерителе излучение поглощается или преобразуется в какой-то другой вид энергии только частично, то необходимо определить долю энергии излучения поглощенной или преобразованной в каждый из других видов, что является неразрешимой задачей. Очевидно, что измеритель, поглощающий полностью всю энергию излучения, поступающего на его вход, технически легче реализуется, чем измеритель вовсе не поглощающий энергии, так как невозможно создать систему без потерь, реагирующую на энергию излучения. Именно учет потерь является наиболее трудной научно-

теоретической задачей при создании и исследовании систематических погрешностей пондеромоторного эталонного измерителя и ограничивает точность такого измерителя, хотя он является одним из двух возможных приборов, привязывающих измерение мощности излучения к эталонам основных единиц СИ. Другой принцип построения эталонного измерителя с привязкой к основным электрическим единицам системы СИ — тепловой, основанный на полном преобразовании энергии излучения в теплоту. Если постулируется, что поглощенная измерителем энергия излучения преобразована только в количество теплоты, причем полностью, то на основе закона сохранения энергии можно сравнивать ее с действием энергии постоянного электрического тока, которая также преобразуется в тепловую энергию полностью. На законе сохранения энергии и постулате о полном преобразовании энергии излучения только в теплоту основан тепловой эталонный измеритель с замещением мощности излучения известной мощностью постоянного тока. Оказалось, что все другие методы уступают тепловому по точности привязки к эталонам основных единиц СИ. И он, по-видимому, останется на ближайшие 10 — 15 лет основным методом построения эталонных измерителей мощности СВЧ. Попытки построить эталонные измерители мощности СВЧ на других принципах, как отмечено в работе [3], пока не приводят к успеху.

Измерение выделившейся энергии обычно основано на измерении тем или иным способом приращения температуры поглотителя. В идеальном измерителе измерения приращения температуры ΔT_{κ} и $\Delta T_{\text{—}}$ при выделении равных мощностей измеряемого излучения и мощности постоянного тока должны быть одинаковы. Однако имеется ряд физических явлений, нарушающих это идеальное равенство, которые и являются источниками методических, систематических погрешностей тепловых эталонных измерителей. Основные составляющие погрешности — потери в подводящем тракте, отражения и погрешность эквивалентности замещения. Последняя является, как правило, доминирующей и наиболее трудно учитываемой. Несмотря на наличие многочисленных публикаций, приведенных в работе [4], содержащих исследования этой погрешности для конкретных конструкций, теории и общих методов, оценка этой погрешности до сих пор не создана. Поэтому все эталонные измерители реализуют уравнение измерения $P_{\kappa} = P_{\text{—}} K_{\kappa} | \Delta T_{\kappa} = \Delta T_{\text{—}} |$, где P_{κ} , $P_{\text{—}}$ — мощности измеряемая и замещения, K_{κ} — безразмерный калибровочный коэффициент, зависящий от конструкции и частоты излучения и равный единице только для идеального измерителя. Основной предмет исследований метрологов — калибровочный коэффициент эталонных измерителей: его погрешность, стабильность во времени, зависимость от частоты, уровня измеряемой мощности, влияющих внешних условий и т. д. Состав аппаратуры эталонов мощности СВЧ в значительной мере определяется потребностями в специальных устройствах для определения K_{κ} и оценки его погрешности, контроля стабильности K_{κ} во времени и изучения зависимости его от P_{κ} , частоты. Сложность, трудоемкость и точность экспериментов по определению K_{κ} являются одной из причин целесообразности централизованного воспроизведения единицы мощности СВЧ.

Передача размера единицы от эталона к рабочим приборам, работающим на принципе замещения, состоит по существу в передаче правильных значений безразмерных калибровочных коэффициентов, в то время как единица мощности постоянного тока или тока низкой частоты воспроизводится легко с требуемой на практике точностью любой метрологической лабораторией.

Получение значений единицы для произвольной частоты. Метрологическое экспериментальное исследование любого средства измерений, в том числе и эталонного измерителя мощности, может быть выполнено только для ограниченного числа фиксированных частот. Вместе с тем потребитель РСИ заинтересован в гарантированном значении погрешности ваттметра для измерений при любой произвольной частоте. Вопрос, откуда берется размер единицы на произвольной частоте, является одним из наименее ясных при построении СМО практически для любого вида радиоизмерений, в том числе и для измерений мощности СВЧ. Ясность отсутствует прежде всего потому, что ни один из нормативных документов, распространяющихся на радиоизмерительные приборы (РИП), их методы поверки, радиоэталоны и поверочные схемы, не требует однозначной формулировки и научно-технического обоснования способа, которым частотные коэффициенты интерполируются для измерителей мощности, находящихся на различных уровнях иерархии. Введение в состав эталонов специальных «мер частотного хода», т. е. приборов, у которых изменение (но не обязательно абсолютное значение) частотных коэффициентов может быть изучено косвенными методами, не зависящими от метода воспроизведения, позволяет решить проблему; иногда возможно изучить экспериментально или предсказать теоретически изменение частотных коэффициентов и у эталонных измерителей. Но зачастую технически легче разделить функции «меры частотного хода» и эталонного измерителя для фиксированных частот между различными устройствами в комплексе средств измерений эталона. В любом случае необходимо выполнять исследования явлений, приводящих к различным резонансным явлениям в преобразователях, и устранять причины, вызывающие такие явления.

Расширение динамического диапазона ОСИ. Погрешности в широком диапазоне значений воспроизводимой единицы эталонных измерителей, если они работают в достаточно широком диапазоне мощностей, должны изучаться независимыми косвенными методами. Но любой экспериментальный способ определения постоянства частотного коэффициента в диапазоне мощностей основан на применении меры отношения амплитуд (меры ослабления). Расширение диапазона образцовых СИ при помощи делителей также требует мер ослаблений. Поэтому расширение динамического диапазона ОСИ требует обязательного создания независимых от эталонов мощности, напряжения или тока мер ослабления. Поэтому в поверочных схемах для любых измерителей интенсивности, в том числе и для измерителей СВЧ-мощности, должны обязательно присутствовать заимствованные меры ослаблений, при помощи которых расширяется динамический диапазон эталонов и ОСИ. Калориметрические измерители большого уровня

мощности, аналогичные приборам МЗ-45—МЗ-48, привязываются к эталону, работающему на малом уровне мощности, только при государственных или периодических испытаниях. При этом предполагается, что воспроизводимость частотных коэффициентов от экземпляра к экземпляру обеспечивается соответствием чертежам высокочастотной поглощающей нагрузки. Для приборов МЗ-45—МЗ-48 с погрешностью 4—6 % это предположение оказывается верным. Для создания на базе этих ваттметров образцовых средств измерения необходимы метрологические исследования индивидуально каждого ваттметра; обычно удается достигнуть погрешностей аттестации 2—2,5 % [5].

Передача размера единицы импульсным ваттметром. Развитие техники измерений СВЧ-мощности в последние 20 лет подтвердило высказанное еще в начале 70-х гг. предположение о том, что метрология измерений импульсной мощности должна быть основана на компарировании мощностей или энергий импульсных сигналов с мощностью непрерывного излучения на основе одного из возможных вариантов метода выборки [6; 7]. Несколько вариантов таких компараторов разработано и описано А. В. Мыльниковым [8—10]. Основными направлениями и задачами исследований является изучение физических явлений, вызывающих непостоянство коэффициента преобразования или калибровочного коэффициента преобразователя, выделяющего огибающую в диапазоне измеряемых импульсных сигналов; зависимость калибровочного коэффициента от уровня средней мощности.

В ряде работ В. С. Недопекина [11—13] отмечено, что у многих типов измерителей средней мощности импульсно-модулированных сигналов существует дополнительная погрешность, часто значительно превосходящая основную. Эта погрешность появляется у ваттметров с малоинерционными преобразователями, у которых коэффициент преобразования изменяется в течение действия импульса, т. е. имеется нелинейность. Сочетание нелинейности и высокого быстродействия преобразователя с линейным интегрированием в измерительном блоке выходного сигнала преобразователя приводит к дополнительной погрешности. Особенно это явление может проявляться у преобразователей на пленочных термopарах, у которых время установления температуры чувствительного элемента — термopары сравнимо с характерными длительностями импульсов. Главная проблема состоит в том, что в ГОСТ 13605—80 и в технических описаниях не указывается на наличие таких погрешностей. Для тепловых ваттметров считается, что погрешности измерений средней мощности импульсно-модулированных и непрерывных колебаний одинаковы, хотя это справедливо только для приборов, у которых время установления температуры поглотителя на 2—3 порядка больше максимальной допустимой длительности импульсов.

Методы устранения основных погрешностей передачи размера единицы. При передаче единицы от эталона к образцовым и рабочим средствам измерений основные источники погрешностей — погрешность рассогласования и случайные погрешности. Все методы исключения погрешности рассогласования при сличениях рабочих и образ-

цовых СИ с более точными сводятся к созданию максимально согласованных измерителей оконечного типа и компараторов проходного типа либо к измерению и учету тем или иным способом фактических значений комплексных коэффициентов отражений и введению поправок на погрешность рассогласования. К первой группе относятся настраиваемые рефлектометры, настраиваемые калибраторы мощности, т. е. направленные ответвители, ориентированные на падающую мощность с элементами настройки, обеспечивающими минимальную зависимость показаний ваттметра в боковом плече от фазы нагрузки на выходе основного канала ответвителя, настраиваемые эталоны сравнения поглощаемой мощности. По этому пути шло большинство метрологических лабораторий с середины 50-х до начала 80-х гг. Но в последние годы исследуются и все шире внедряются в практику методы, основанные на различных способах учета фактических значений комплексных коэффициентов отражений. К этим методам относится, во-первых, исключение погрешности рассогласования за счет того, что в формулу, описывающую элементарное сличение проходного и оконечного измерителя,

$$P_{\text{полг}} = \frac{(1 - \Gamma_{\text{н}})^2}{(1 - \Gamma_{\text{н}}\Gamma_{\text{г}})^2} P_{\text{пад}}$$

подставляют фактические значения комплексных коэффициентов отражения эквивалентного генератора и сличаемого измерителя $\Gamma_{\text{г}}$, $\Gamma_{\text{н}}$ [1; 14], предварительно измеренные при помощи СИ комплексных коэффициентов отражения. Второй способ — это применение в качестве компараторов 12-полюсников, составленных из направленных ответвителей или тройников. Теоретические основы и первые практические реализации этих компараторов созданы в НБС (США) Г. Энгеном после 1973 г. Компараторы на основе 12-полюсников работают только с применением микроЭВМ, обрабатывающих сигналы четырех измерителей мощности в реальном масштабе времени, и позволяют исключить погрешность рассогласования, по нашим оценкам, до 0,1 %. К сожалению, как за рубежом, так и в СССР отсутствуют теория и убедительные результаты метрологических исследований остаточных погрешностей рассогласования.

Одним из вариантов 12-полюсника является многофункциональный компаратор на основе сосредоточенных поглощающих элементов, распределенных вдоль волноводного тракта; теория синтеза этих компараторов разрабатывается В. А. Перепелкиным и С. А. Колотыгиным [15; 16]. Для диапазона частот 1—26 ГГц эти компараторы, по-видимому, наиболее перспективны. И наконец, убедительной альтернативой 12-полюсникам для миллиметрового диапазона волн при частотах выше 26 ГГц являются компараторы на основе длинных однородных отрезков волноводов длиной $30 \div 50 \lambda_{\text{д}}$ и режима измерения с качанием частоты в таком диапазоне, чтобы в результате изменения длины волны и электрической длины тракта можно было снять всю интерференционную картину, связанную с переотражениями между сличаемыми измерителями и генераторами. Эти методы, разрабатываемые Ш. Х. Исхаковым [17], реализуются только в комплексно-автомат-

тизированных установках. В этих установках все операции управления частотой, включения сигнала, измерения и обработка результатов полностью автоматизированы.

Случайные погрешности измерений и систематические инструментальные погрешности, связанные с измерениями мощности и напряжения постоянного тока, анализу которых традиционно уделяется довольно большое место в метрологических исследованиях, по нашему мнению, не являются теперь существенными в силу высокой точности средств измерений постоянного тока; обычно эти погрешности укладываются в пределы $\pm 0,05\%$ с применением общедоступных прецизионных СИ напряжения и сопротивления постоянного тока. Существенного прогресса в уменьшении случайных погрешностей результатов удаётся добиться в автоматизированных установках, где количество измерений можно устанавливать автоматически таким, чтобы случайная погрешность результата при заданной доверительной вероятности была менее заданной, например менее $0,01\%$. Недостаточное внимание пока ещё уделяется погрешностям из-за потерь и отражений в коаксиальных и волноводных соединителях. Отсутствуют и убедительно обоснованные методы учета этих погрешностей, на что обратили внимание в своих работах Г. Энген в США и А. К. Томашевский в СССР.

Влияние новых методов передачи на поверочные схемы. Наиболее перспективными средствами передачи размера единицы мощности СВЧ малых уровней являются автоматизированные рабочие места поверителя [18] и возимые меры или эталоны сравнения [19]. Первые итоги опытной эксплуатации и тех и других средств проверки показывают их высокую эффективность как в плане достоверности результатов проверки, так и в плане повышения производительности труда поверителя. Эти технические достижения будут сильно воздействовать на организацию поверочных работ и на способы построения поверочной иерархии. Наиболее вероятным следствием внедрения автоматизации и возимых средств будет сокращение ступеней передачи в поверочных схемах и, следовательно, «приближение» РСИ к эталонам. Поэтому именно автоматизация проверки и возимые меры являются основными средствами, позволяющими разрешить отмеченное противоречие.

Список литературы: 1. Билько М. И., Томашевский А. К. Измерение мощности на СВЧ. М., 1986. 168 с. 2. Румфельт, Ивэлл. Методы измерения мощности на ВЧ и СВЧ // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1967. 55. № 6. С. 116 — 129. 3. Фэнтом А. Э. Национальные эталоны мощности и энергии // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1986. 74. № 1. С. 106 — 114. 4. Пантелеева Т. Р., Чуйко В. Г. Прецизионные компараторы энергии и мощности в эталонах интенсивности электромагнитного излучения // Обзорная информация. Сер. Образцовые и высокоточные средства измерений. М., 1983. С. 126 — 130. 5. Колегов В. Г., Олешко В. Г., Чуйко В. Г. Образцовые ваттметры СВЧ большого уровня мощности // Образцовые средства измерений в радиотехнике СВЧ: Сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. М., 1980. С. 80 — 85. 6. Проненко В. И., Чуйко В. Г. Измерения мощности СВЧ в импульсе в волноводных трактах // Тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. 1972. Вып. 6 (36). С. 74 — 80. 7. Чуйко В. Г. Методы калибровки импульсных ваттметров // Докл. науч.-техн. семинара «Метрология в радиоэлектронике», М., 1970. С. 105 — 107. 8. Механиков А. И., Мильников А. В.,

Петрова Т. И. Образцовая мера импульсной мощности в волноводных трактах // Тр. Всесоюз. н.-и. ин-та физ.-техн. и радиоизмерений. 1972. Вып. 6(36). С. 200 — 203. 9. *Лозовик Е. А., Мыльников А. В., Хоменко И. Л.* Образцовые средства измерения импульсной мощности СВЧ // Измер. техника. 1977. № 4. С. 70 — 73. 10. *Мыльников А. В.* Прецизионный ваттметр импульсной мощности СВЧ // Измер. техника. 1982. № 8. С. 64 — 66. 11. *Недопекин В. С., Чуйко В. Г.* Погрешность измерения средней мощности периодических импульсов СВЧ ваттметрами // Исследования в области радиотехнических измерений: Тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. 1979. Вып. 40(70). С. 12 — 20. 12. *Недопекин В. С.* Погрешность измерения сигнала тепловым приемником излучения // Метрология в радиоэлектронике: Тез. докл. У Всесоюз. конф. М., 1981. С. 248 — 251. 13. *Недопекин В. С., Чуйко В. Г.* Влияние нелинейного теплообмена на измерение энергетических характеристик тепловых приемников излучения // Исслед. метрологич. характеристик эталонов и образц. приборов в обл. радиоизмерений СВЧ: Тр. Всесоюз. НИИ ин-та физ.-техн. и радиоизмерений. М., 1983. С. 50 — 53. 14. *Билько М. И., Томашевский А. К.* Измерение модуля и фазового угла эффективного коэффициента отражения ваттметра проходящей мощности на базе направленного ответвителя // Техника средств связи. Сер. Радиоизмер. техника. 1984. Вып. 6. С. 95 — 98. 15. *Механиков А. И.* Синтез волноводных приемных преобразователей проходящей мощности // Метрология. 1973. № 4. С. 20 — 23. 16. *Колотыгин С. А., Чуйко В. Г.* Измерение падающих и отраженных волн многозондовыми преобразователями с неидеальными зондами // Томограф. методы в физ.-техн. измерениях: Сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. М., 1985. С. 143 — 146. 17. *Исхаков Ш. Х., Мыльников А. В., Чуйко В. Г.* Исключение погрешности рассогласования при градуировке СВЧ-ваттметров // Измер. техника. 1986. № 9. С. 50 — 52. 18. *Исхаков Ш. Х.* Комплексно-автоматизированные установки для поверки СВЧ-ваттметров // Исслед. метрологич. характеристик эталонов, образц. приборов в обл. радиоизмерений СВЧ: Сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. М., 1983. С. 122 — 140. 19. *Гончаров А. К., Фрумкин В. Д., Чуйко В. Г.* Возимые меры сравнения для аттестации волноводных калибраторов мощности // Исследования эталонов сравнения в области радиотехнических измерений: Сб. науч. тр. Всесоюз. НИИ физ.-техн. и радиоизмерений. М., 1982. С. 14 — 18.

Поступила в редколлегию 20.04.87

УДК 621.317

В. Н. ЖЕНДУБАЕВ, канд. техн. наук, *Э. Р. ГАЛЕЕВ*

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ПЕРЕМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТНО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ СИГНАЛОВ

При создании и эксплуатации различных радиоэлектронных устройств измерение проходящей мощности в линиях передачи СВЧ в условиях рассогласованной нагрузки представляет одну из важнейших задач. В разрабатываемых ваттметрах проходящей мощности используются различные методы измерения, среди которых одним из основных является метод перемножения сигналов, пропорциональных поперечным компонентам электромагнитного поля в линии передачи. В коаксиальных линиях в связи с трудностями создания множительных устройств в рабочем диапазоне частот обычно применяют предварительное понижающее преобразование частоты сигналов. В работах [1; 2] рассмотрены особенности ваттметров, в которых таким образом перемножаются сигналы электрического и магнитного зондов, поме-