

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Матвеева Алексея Игоревича
«Разработка методов уменьшения погрешности передачи единицы
мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-
диапазона и средств их реализации»

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 — Метрология и метрологическое обеспечение

Измерения мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах являются ключевым элементом обеспечения точности в радиолокации, спутниковой связи, радиоастрономии и СВЧ-микроэлектронике. Современные требования к погрешности передачи единицы мощности, особенно в верхней части диапазона 16,7–37,5 ГГц, ужесточаются, и доминирующий вклад в суммарную погрешность дает составляющая рассогласования между оконечными и проходными измерительными преобразователями. Работа А.И. Матвеева направлена на решение именно этой прикладной и одновременно фундаментально значимой задачи — снижение погрешности передачи единицы мощности за счет уменьшения $|Г_{вх}|$ ваттметров оконечного типа и повышения точности измерений $|Г_{э}|$ ваттметров проходного типа, с построением законченной технологической и метрологической цепочки от методов до средств и их внедрения в эталонную базу.

К числу наиболее существенных научно-технических результатов диссертации следует отнести:

- Разработку метода СВЧ-измерений S-параметров термисторов в сниженных по узкой стенке волноводных трактах ($a \times 1$ мм) с TRL-калибровкой и переходами «стандартный волновод — произвольный волновод», что позволило количественно связать S_{11} , S_{21} с установленным сопротивлением R_t в диапазоне 5,64–37,50 ГГц и задать критерии пригодности термисторов.
- Создание многозондового преобразователя мощности оконечного типа с многопозиционной системой термисторов и синтезом расстояний по полиному Чебышева 2-го порядка. Экспериментально достигнут модуль коэффициента отражения входа $|Г_{вх}(f)| \leq 0,03$ на произвольных частотах рабочих диапазонов стандартных волноводов, с доверительными границами суммарной относительной

погрешности КК не хуже $\pm 0,8 \%$ ($P=0,95$), что соответствует требованиям к вторичным эталонам и вдвое улучшает практику ранее эксплуатируемых решений.

- Предложение и реализацию рассогласованного датчика мощности (ДМР) для измерений $|\Gamma_{\text{э}}|$ без нарушения целостности конструкции проходных ваттметров. Показано снижение погрешности измерений $|\Gamma_{\text{э}}|$ с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006 \dots \pm 0,008$ за счет повышения калибровочного коэффициента при перемещении чувствительного элемента и управления фазой отражения.
- Комплексное применение разработанных средств в составе комбинированного ваттметра и измерительной системы К6-19, подтвержденное на базе ГЭТ 26-2010: обеспечена передача единицы мощности в волноводных трактах 5,64–37,50 ГГц с погрешностью не более $\pm 0,8 \%$ и снижение погрешности рассогласования до $\sim 0,4 \%$.

Сильные стороны работы:

- Методическая завершенность: от анализа источников погрешности (включая вклад измерительной неопределенности $|\Gamma_{\text{вх}}|$ и $|\Gamma_{\text{э}}|$ по уточненному выражению ΘP) до разработки алгоритмов настройки (координатный спуск, подбор R_t для каждого зонда) и созданию аппаратуры и мер ТRL-калибровки.
- Высокая степень внедрения: включение многозондовых преобразователей в компарирующую установку ГЭТ 26-2010; использование ДМР при аттестации эталонов 1-го разряда; разработка измерительной системы К6-19 и серийных приборов (МЗ-122, М1-37).
- Научная новизна подтверждена сопоставлением теории, электродинамического моделирования и эксперимента; результаты защищены патентами и программами для ЭВМ.

Особо хотелось бы отметить главу 3 с синтезом многозондового преобразователя и практической процедурой настройки $|\Gamma_{\text{вх}}(f)| \leq 0,03$ на сетке частот. Продемонстрированные траектории координатного спуска и приведенные рабочие наборы сопротивлений на частотах 16,7–25,86 ГГц показывают не только достижимость цели, но и воспроизводимость методики в производственных условиях. Это имеет непосредственную ценность для эталонных и производственных лабораторий, где требуется оперативная и надежная доводка преобразователей под конкретные диапазоны.

Автореферат изложен ясным техническим языком, логично структурирован, корректно отражает постановку задачи, научную новизну, методики и результаты, содержит необходимые справочные данные о внедрении и публикационной активности.

Замечания носят частный характер и не влияют на общую высокую оценку работы:

1. В тексте пояснения к формулам (5) и (6) значится, что Z является импедансом термистора. Однако, из формул (5) и (6) следует, что Z – это нормированный импеданс на импеданс свободного пространства $Z_0=377 \text{ Ом}$.
2. На странице 11 указаны диэлектрическая проницаемость и габаритные размеры используемого в диссертации термистора. Логично в этом месте привести конкретную марку используемого термистора.
3. В автореферате не очень явно обозначена главная «изюминка» диссертации, что путем *регулировки* сопротивлений R_{t1} , R_{t2} , R_{t3} , R_{t4} достигается значение модуля коэффициента отражения для каждого поддиапазона, что обеспечивает работу во всем диапазоне частот волноводного тракта. То есть то, что входной тракт ваттметра *перестраиваемый*.
4. Для разработанного ваттметра оконечного типа в автореферате не описана методика/процедура измерения самой мощности излучения. Автор ограничивается общими словами, что «многозондовая система термисторов выполняет функцию чувствительного элемента».

Перечисленные замечания не умаляют ценности работы. Насколько можно судить по автореферату, диссертация удовлетворяет всем критериям, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а её автор, Алексей Игоревич Матвеев, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 — Метрология и метрологическое обеспечение.

Кукушкин Игорь Владимирович

«27» октября 2025 года

Академик РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07. — физика твердого тела, главный научный сотрудник Лаборатории неравновесных электронных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН).

Подпись Кукушкина И.В. заверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН

к.ф.-м.н.



Терещенко Алексей Николаевич

Контактная информация:

Почтовый адрес: 142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна 2

Телефон: +7 (49652) 2-44-31

E-mail: kukush@issp.ac.ru