АНДРЕЙ ЗАГОРОДНИЙ, к. т. н., andreyzag@micran.ru
АЛЕКСАНДР ЛЕОНТЬЕВ, leontev.ad@micran.ru

ВАТТМЕТРЫ СЕРИИ PLS ПРОИЗВОДСТВА АО «НПФ «МИКРАН»

Статья посвящена ваттметрам поглощаемой мощности PLS (Portable Lab Sensor) производства АО «НПФ «Микран» с частотным диапазоном 50 МГц — 50 ГГц и динамическим диапазоном –50…+20 дБм. Ключевые особенности устройств — портативность, питание и управление от USB и возможность измерения средней мощности модулированных сигналов во всем рабочем диапазоне. В 2020 году ваттметры PLS26, PLS50 внесены в Реестр средств измерений РФ. В статье представлены краткие теоретические сведения, описание внутренней структуры ваттметров PLS и их технические характеристики.

В устройствах ВЧ и СВЧ, где измерение токов и напряжений затруднительны, основным энергетическим показателем сигналов становится уровень мощности. Приборы для измерения мощности СВЧ, называемые ваттметрами СВЧ, кроме основного назначения используются также для определения потерь в четырехполюсниках, коэффициента отражения, для измерения интенсивности излучения при медико-биологических исследованиях. Ваттметры СВЧ входят в число основных приборов, используемых на всех этапах разработки генераторов, усилителей, радиолокационных и навигационных систем.

На сверхвысоких частотах выделяют ваттметры поглощаемой мощности, которые содержат собственную согласованную нагрузку, и проходящей мощности, в которых небольшая часть сигнала ответвляется и подается на преобразователь сигнала [1].

В статье представлена краткая классификация основных типов преобразователей, основные характеристики измерителей и подробное описание ваттметров серии PLS. В линейке измерительных продуктов СВЧ производства АО «НПФ «Микран» существует класс портативных приборов Portable Lab Devices®. Характерные особенности приборов — компактность, питание и управление от USB, а также высокие функциональные возможности. Помимо ваттметров в класс входят СВЧ-генераторы PLG (Portable Lab Generator), подробное описание представлено в работах [2–4].

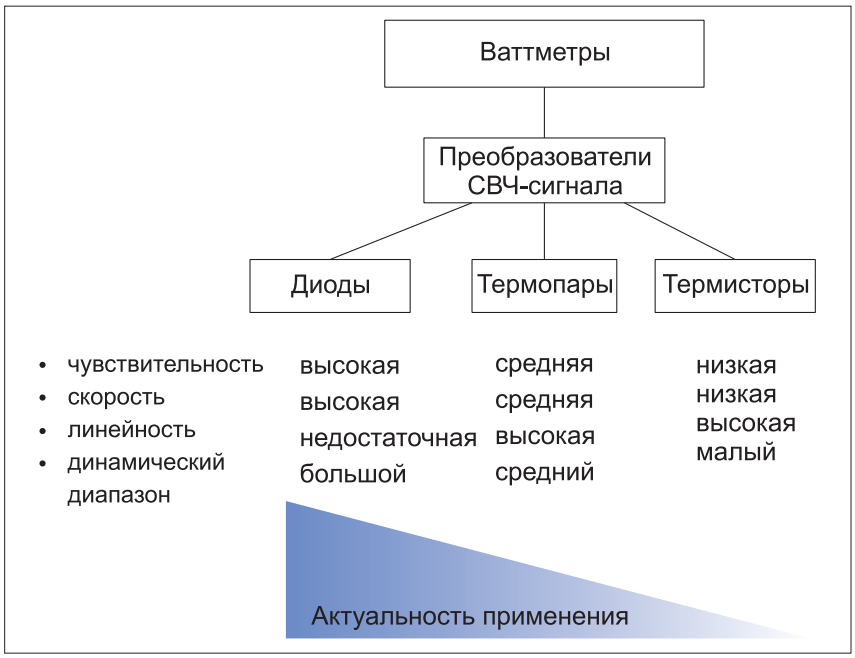

Рис. 1. Сравнение преобразователей мощности

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВЧ-СИГНАЛА

Среди преобразователей сигнала наибольшее распространение получили термисторы, термопары и диодные детекторы [5]. Термисторы стали применяться для измерения мощности задолго до остальных методов и используются в современной аппаратуре для передачи измерений государственных эталонов мощности. Применение термопар в качестве преобразователей мощности позволило добиться улучшения ряда технических характеристик, таких как чувствительность, надежность и динамический диапазон. Распространение диодных детекторов привело к еще большему увеличению чувствительности и динамического диапазона (рис. 1).

Главное преимущество диодных преобразователей — скорость измерений. Диодные ваттметры обладают временем отклика вплоть до единиц наносекунд [6]. Из недостатков диодных преобразователей можно выделить ограниченную область квадратичного детектирования. Чем же так важна область квадратичного детектирования? Тепловые преобразователи независимо от формы сигнала и его модуляции реагируют только на энергию и ее изменение во времени. При измерении модулированных сигналов показания диодных преобразователей могут отличаться от тепловых. Диодный детектор преобразует энергию высокочастотных колебаний в постоянное напряжение. Данное преобразование возможно благодаря нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода и схемы фильтрации в составе детектора.

Ток, протекающий через детекторный диод, описывается формулой:

$$i = I_S (e^{\alpha v} - 1),$$

где $\alpha = q/nKT$; i — ток, протекающий через диод; v — напряжение на диоде; I_S — ток насыщения, постоянный при данной температуре; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; q — заряд электрона; n — поправочный коэффициент.

Для анализа детектирующих свойств диода, ток i может быть представлен в виде степенного ряда:

$$i = I_S\left(\alpha v + \frac{(\alpha v)^2}{2!} + \frac{(\alpha v)^3}{3!} + \ldots\right).$$

Второй и следующие за ним четные члены этого ряда как раз и обеспечивают детектирование. Для малых сигналов существенен только член второго порядка, так что в этих условиях диод называют действующим в квадратичной зоне [7]. Для типового диодного детектора это соблюдается в диапазоне от –70 до –20 дБм. Выходное напряжение детектора в этом случае пропорционально квадрату входного напряжения, то есть линейно зависит от мощности входного сигнала. В этой области показания диодного ваттметра схожи с приборами на основе тепловых преобразователей. При повышении входной мощности более –20 дБм, детектор переходит в квазилинейный, а затем в линейный режим работы. Выходное напряжение в данном случае пропорционально входному напряжению (рис. 2). Для проведения измерений в данном диапазоне возникает потребность в коррекции. Ваттметры обычно калибруют непрерывными гармоническими сигналами. Однако измерения модулированных сигналов такими приборами нередко сопровождаются ошибками.

Расширение диапазона квадратичного детектирования достигается увеличением числа каскадов детектирования (с предварительным ослаблением сигнала перед отдельными каскадами) и включением последовательно нескольких диодов (рис. 3). Современные датчики мощности компаний Keysight Technologies, Rohde&Schwarz, Anritsu используют оба этих подхода [7–9].

На основании всего вышеперечисленного, диодные детекторы по совокупности характеристик являются наиболее востребованными преобразователями для современных ваттметров СВЧ-сигналов. Производители во всем мире используют их для измерения средней мощности, а также в составе ваттметров для определения пиковой и импульсной мощности.

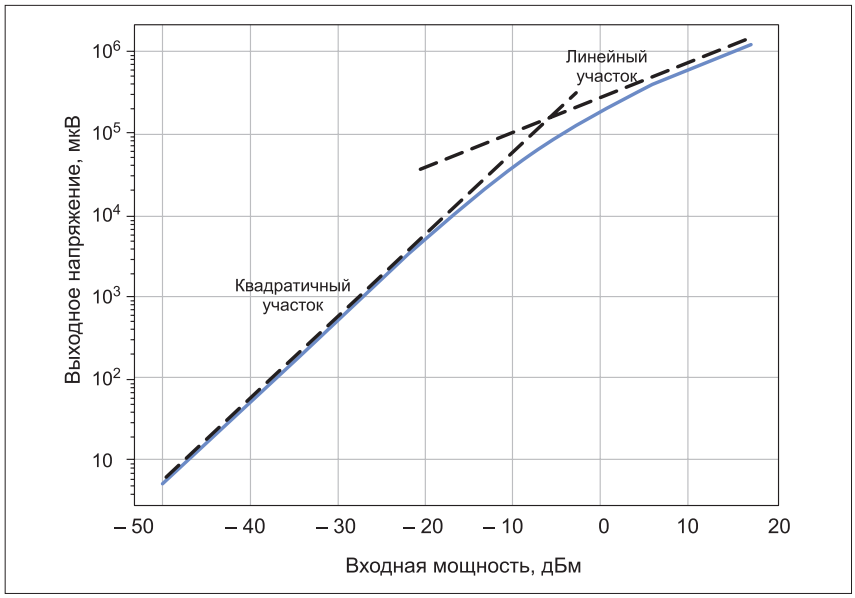

Рис. 2. Детекторная характеристика диода

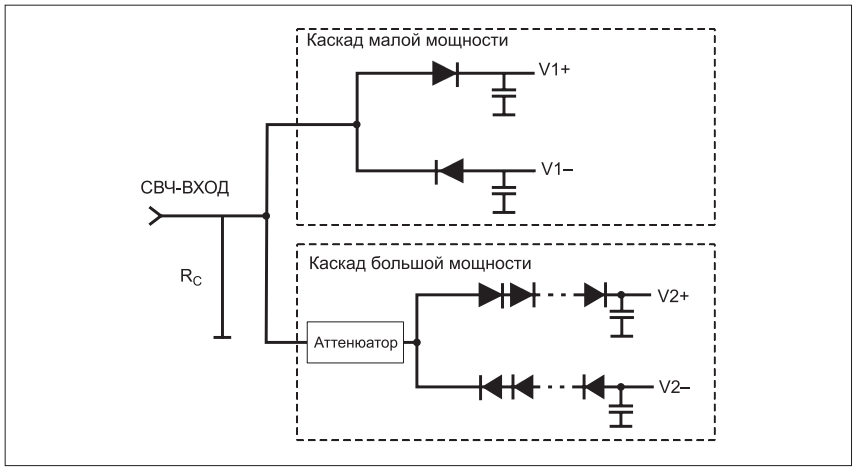

Рис. 3. Схема детектора мощности с двумя каскадами детектирования, R_C — согласующий резистор 50 Ом

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА PLS

Ваттметры серии PLS относятся к типу поглощаемой мощности с преобразователем СВЧ-сигнала на основе амплитудного диодного детектора. Линейка PLS представлена моделями PLS06/26/50, предназначенными для измерения средней мощности непрерывных и модулированных сигналов в диапазоне частот от 50 МГц до 6/26,5/50 ГГц. Ваттметры PLS26 и PLS50 внесены в Госреестр средств измерений РФ, свидетельство об утверждении типа средств измерений № 79042–20 [10]. Первичный преобразователь приборов представляет собой модуль СВЧ, содержащий монолитную интегральную схему (МИС) детектора собственной разработки. Детектор включает низкобарьерные диоды ZB-28 на основе планарно-легированных структур на подложке из арсенида галлия, также разработанные и произведенные в АО «НПФ «Микран» [11, 12]. Бескорпусные МИС детекторов поглощаемой и проходящей мощности также доступны для заказа [13–15].

Ваттметры PLS06 с частотным диапазоном 50 МГц — 6 ГГц выполнены на основе зарубежных микросхем детекторов и способны отображать форму огибающей радиоимпульсов с собственным временем нарастания и спада на уровне 15 мкс. По состоянию на 2021 год приборы не внесены в Реестр средств измерений РФ.

Ваттметры PLS реализованы в соответствии с концепцией «виртуальных» измерительных приборов и имеют аппаратную и программную части. Аппаратная часть выполняет набор функций, связанных с аналоговыми преобразованиями сигнала, подачей питания, обеспечения гальванической развязки и др. Программная часть позволяет выбирать режимы работы и служит средством цифровой обработки и отображения результатов измерений. Структурная схема ваттметров PLS приведена на рис. 4.

После поступления СВЧ-сигнала на вход ваттметра происходит разделение сигнала на два каскада детектирования с помощью несимметричного делителя мощности. Данная особенность позволяет расширить динамический диапазон квадратичного детектирования ваттметра: один из каскадов предназначен для измерения сигналов низкого уровня, другой, сигнал на который поступает через аттенюатор, для измерений сигналов высокого уровня (рис. 5). Таким образом, ваттметр поглощаемой мощности PLS может применяться для измерений средней мощности модулированных сигналов во всем рабочем диапазоне мощностей.

Сигналы с детекторов после усиления поступают на аналого-цифровые преобразователи (АЦП). В микроконтроллере в зависимости от значений детектируе-

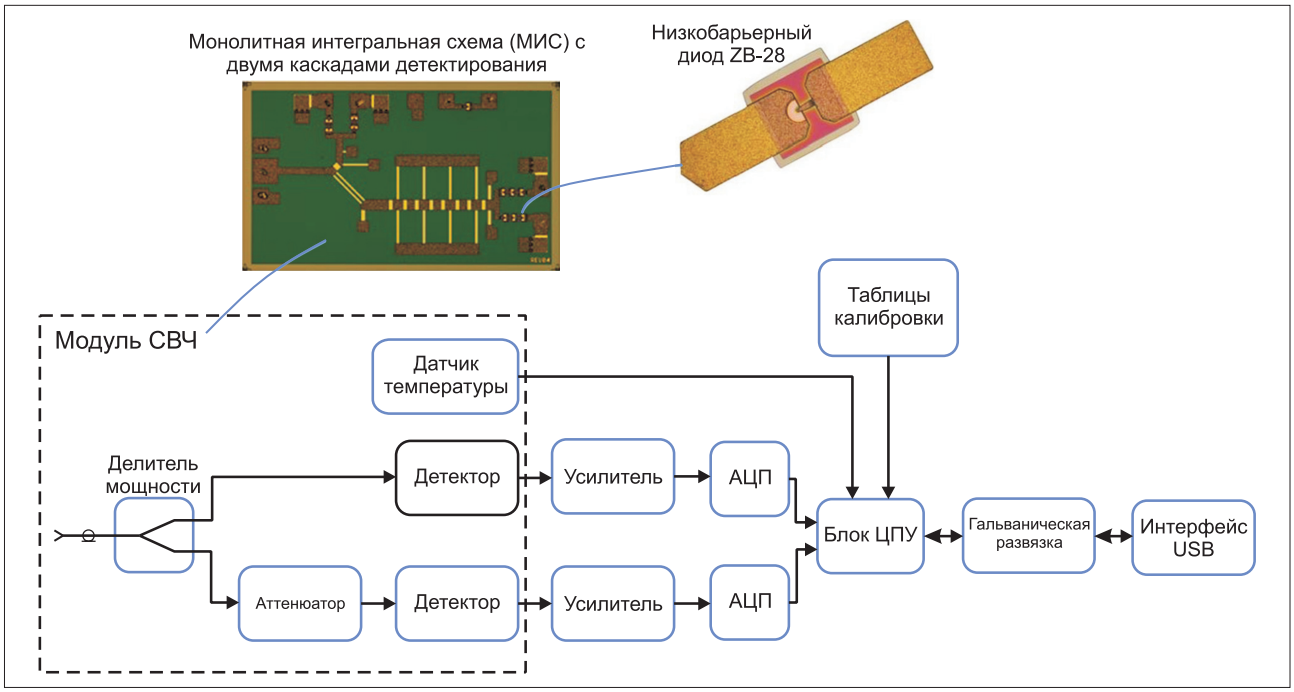

Рис. 4. Структурная схема ваттметров поглощаемой мощности PLS

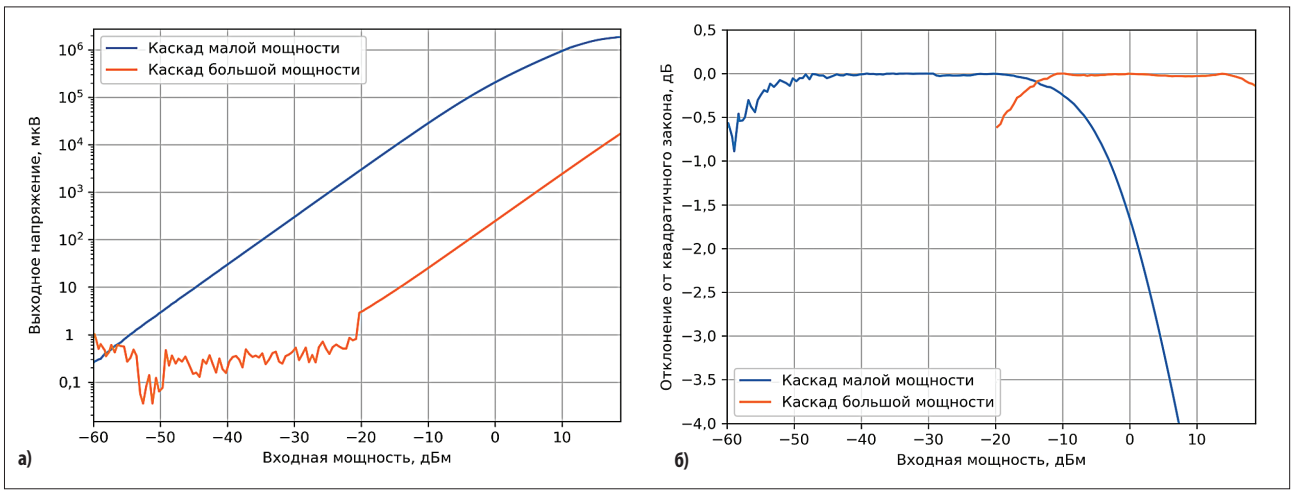

Рис. 5. а) Зависимости детектируемого напряжения от уровня мощности на частоте 50 ГГц; б) графики отклонения от квадратичного закона детектирования

Рис. 6. Внешний вид ваттметров поглощаемой мощности PLS

мых напряжений осуществляется выбор рабочего каскада. Далее происходит преобразование цифровых отсчетов АЦП в уровень мощности и коррекция частотных изменений в соответствии с калибровочными таблицами.

Одновременно с измерением сигнала выполняется считывание показаний с датчика температуры, расположенного непосредственно в модуле СВЧ. После преобразования в цифровой формат, выходное напряжение с термодатчика, пропорциональное изменению температуры, поступает на вход ЦПУ, где корректируются результаты измерений.

Особенностью ваттметров PLS является наличие гальванической развязки по цепям питания и управления, которая позволяет подключать прибор к ПК или ноутбуку, не имеющих цепи заземления. Для цепи питания применен изолирующий преобразователь, рассчитанный на напряжение изоляции до 1 кВ. В линиях передачи данных используется компонент, изготовленный по технологии iCoupler [16]. Разница потенциалов общей шины измерительного контура и общей шины ПК не приводит к дополнительным погрешностям измерений.

Конструктивно ваттметры поглощаемой мощности PLS выполнены в малогабаритном металлическом корпусе и оснащены входным разъемом СВЧ, разъемами внешней синхронизации и интерфейсом USB для питания и управления прибором (рис. 6).

СРАВНЕНИЕ ВАТТМЕТРОВ PLS С АНАЛОГАМИ

В таблице представлены основные технические характеристики ваттметров поглощаемой мощности PLS в сравнении с российскими аналогами.

Таблица. Сравнение характеристик ваттметров PLS с аналогами

Наименование характеристики	PLS26 / PLS50 (Микран)			М3М-18 (Микран)		М3-51/5 (ПрофКиП)		М3-116 (ДСП-СОФТ)		М2-МВМ-18 (MWMLab, БГУИР)	
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,05–26,50 / 0,05–50			0,01–18		0,02–17,85		0,02–17,85		0,01–18,00	
Диапазон измерений мощности, дБм	–50…20			–40…10		–30…10		–33…19		–30…10	
Коэффициент стоячей волны, не более	1,2 (0,05–18 ГГц)			1,4 (0,01 – 12 ГГц) 1,5 (12 – 18 ГГц)		1,3 (0,02–12 ГГц) 1,4 (12–17,85 ГГц)		1,4 (0,02–17,85 ГГц)		1,4 (0,01–18 ГГц)	
	1,3 (18–26,5 ГГц)										
	1,5 (26,5–40 ГГц)										
	2 (40–45 ГГц)										
	2,3 (45–50 ГГц)										
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, %	0,05–3 ГГц	± 15 (–50…–40 дБм)		0,01 – 18 ГГц	± 20	0,02–12 ГГц	± [4 + 0,1 (P_K/ P_X – 1)]	0,02–17,85 ГГц	± [6 + 0,1 (P_K/ P_X-1)]	0,01–12 ГГц	± [4 + 0,1 (P_K/ P_X – 1)]
		± 7 (–40…–10 дБм)									
		± 5 (–10…20 дБм)									
	3–5 ГГц	± 15 (–50…–40 дБм)									
		± 7 (–40…–10 дБм)									
		± 7 (–10… 20 дБм)				12–17,85 ГГц	± [6 + 0,1 (P_K/ P_X– 1)]			12–18 ГГц	± [6 + 0,1 (P_K/ P_X – 1)]
	5–18 ГГц	± 15 (–50...–40 дБм)									
		± 7 (–40...–10 дБм)									
		± 5 (–10...20 дБм)									
	18–26,5 ГГц	± 15 (–50...–40 дБм)		—	—	—	—	—	—	—	—
		± 10 (–40...–10 дБм)									
		± 7 (–10...20 дБм)									
	26,5–40 ГГц	± 15 (–50...–40 дБм)									
		± 10 (–40...–10 дБм)									
		± 10 (–10...20 дБм)									
	40–50 ГГц	± 20 (–50...–40 дБм)									
		± 15 (–40...–10 дБм)									
		± 15 (–10...20 дБм)									
Рабочие условия применения:											
Температура окружающего воздуха, °С	от +5 до +50			от +5 до +40		от +10 до +40		от +5 до +40		от +5 до +40	

где дБм – дБ относительно 1 мВт
P_K – верхний предел измерений мощности (зависит от поддиапазона измерений), Вт;
P_X – значение измеряемой мощности, Вт

Ваттметры PLS могут замещать большинство отечественных приборов с коаксиальным соединителем. По сравнению с современными зарубежными аналогами от компаний Keysight Technologies и Rohde&Schwarz, серия PLS уступает по КСВН и, как следствие, по допустимой погрешности.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПРИБОРОМ

Один из способов управления ваттметрами PLS — использование программного обеспечения (ПО) PLS-Client, поставляемого в комплекте с прибором (рис. 7). PLS-Client представляет графический интерфейс для управления ваттметрами PLS и отображения результатов измерений мощности. Полезные особенности ПО:

- коррекции результатов измерений с учетом коэффициента передачи внешних устройств по Touchstone® S2P-файлам;
- режимы абсолютного и относительного измерения;
- временные маркеры для контроля изменения мощности сигнала;
- возможность сохранения/загрузки профилей для измерительных схем;
- запись результатов измерений в файл.

Нередко в процессе разработки, испытаний и тестирования радиоэлектронного оборудования возникают ситуации, когда от ваттметра требуется не только измерение мощности, но и взаимодействие с различными приборами в составе измерительных комплексов. В этом случае имеется возможность управления ваттметром PLS посредством системы команд SCPI (Standard Commands for Programming Instruments — стандартные команды для программируемых приборов). Совместно с прибором поставляются краткие примеры управления на разных языках программирования.

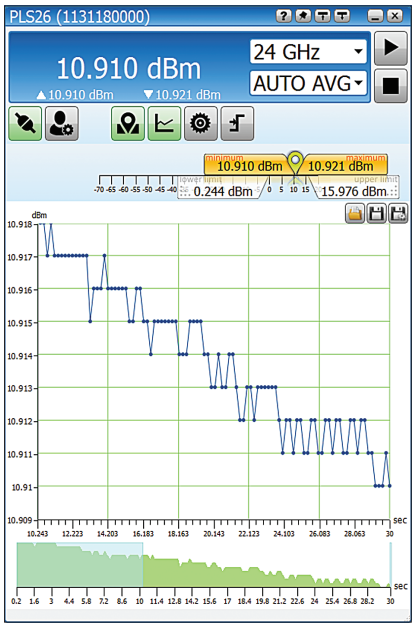

Рис. 7. Окно ПО PLS-Client

Рис. 8. Ваттметр для измерений мощности до 10 Вт

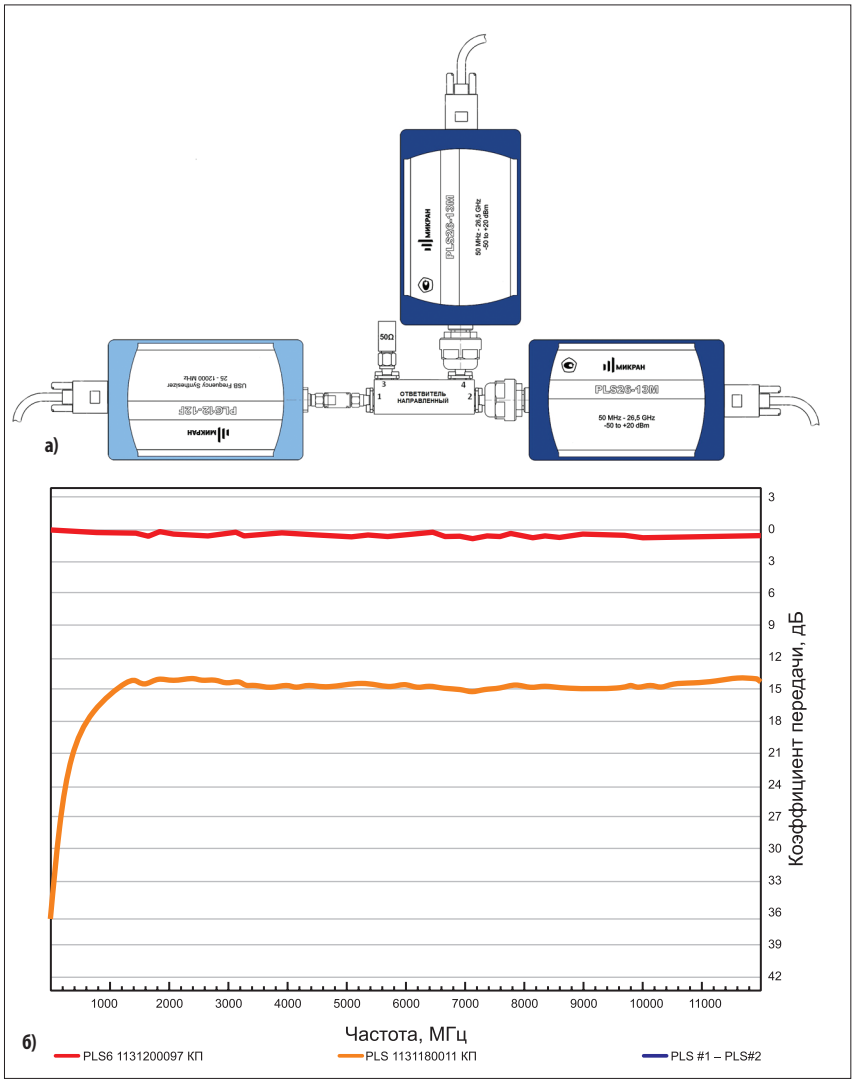

Рис. 9. а) Схема для измерения потерь на проход и ответвление направленного ответвителя; б) графическое окно ПО Multitest

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

В настоящее время инженерами АО «НПФ «Микран» разрабатывается ряд решений, которые позволят расширить функционал и области применения ваттметров PLS.

Одним из перспективных направлений разработки является модификация ваттметра поглощаемой мощности, которая позволит измерять среднюю мощность сигналов в диапазоне –30…+40 дБм. Это будет достигаться калибровкой ваттметра совместно с несъемным внешним аттенюатором (рис. 8). Планируется подготовка образцов с соединителями N-типа и максимальной мощностью до 30 Вт.

Помимо этого, инженерами АО «НПФ «Микран» разработано ПО Multitest [17], которое позволяет объединить управление несколькими портативными измерительными устройствами серии PLD в одном приложении. ПО создано специально для решения типовых измерительных задач при разработке, настройке и испытании устройств ВЧ и СВЧ. Объединение нескольких генераторов и ваттметров упростит измерение характеристик усилителей, делителей мощности, фильтров, направленных ответвителей и других устройств и элементов СВЧ-тракта (рис. 9).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mazda F. Electronic instruments and measurement techniques. Cambridge iuniversity press, Cambridge, 1987.*
2. *Горевой А. В. Генераторы сигналов PLG06/12/20. Часть 1//Компоненты и технологии. 2019. № 9.*
3. *Горевой А. В. Генераторы сигналов PLG06/12/20. Часть 2//Компоненты и технологии. 2019. № 10.*
4. *Горевой А. В. Генераторы сигналов PLG06/12/20. Часть 3//Компоненты и технологии. 2019. № 11.*
5. *Bryant G. H. Principles of Microwave Measurements. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1993.*
6. *Загородний А. С., Черепанов А. В. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран»//СВЧ-электроника. 2016. № 1.*
7. *Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 2). Application Note 1449–2.*
8. *R&S®NRP33S Three-Path Diode Power Sensor. www.rohde-schwarz.com/hk/product/nrp33s-productstartpage_63493–99588.html*
9. *Accurate Power Measurements on Modern Communication Systems. Anritsu Application Note.*
10. *Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. www.fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1381792*
11. *ZB-28 низкобарьерный детекторный диод. www.micran.ru/upload/iblock/4c5/ZB-28_V01.0002.pdf*
12. *Юнусов И. В., Ющенко А. Ю., Плотникова А. М., Арыков В. С., Загородний А. С. Сверхвысокочастотные низкобарьерные детекторные диоды на основе p-n-перехода//Физика. 2012. № 9/2.*
13. *MD901 детектор поглощаемой мощности 0,01–50 ГГц. www.micran.ru/upload/iblock/293/MD901_V01.0006.pdf*
14. *MD902 детектор поглощаемой мощности 0,1–40 ГГц. www.micran.ru/upload/iblock/bb6/MD902_V01.0004.pdf*
15. *MD903 детектор поглощаемой мощности 0,01–50 ГГц. www.micran.ru/upload/iblock/190/MD903_V01.0004.pdf*
16. *Baoxing Chen. iCoupler® Products with isoPower™ Technology: Signal and Power Transfer Across Isolation Barrier Using Microtransformers. www.analog.com/en/technical-articles/icoupler-products-with-isopower-technology.html#*
17. *Программное обеспечение Multitest. www.micran.ru/productions/IIS/kia/usb/multitest/*