

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

*В. Д. Кукуш, В. С. Жилков*

Харьков

В контрольно-измерительных лабораториях предприятий образцовой аппаратуры и, в частности образцовых измерителей мощности СВЧ, предназначенных для поверки находящихся в эксплуатации ваттметров, как известно, не имеется.

Однако до настоящего времени в измерительной практике не получили широкого распространения пондеромоторные ваттметры, которые в силу их особенностей можно использовать в поверочных целях в широком диапазоне волн (от 0,8 до 30 см). Эти особенности состоят, во-первых, в абсолютной калибровке и достижении высокой точности (погрешность  $\pm 2\%$  является реальной), во-вторых, в измерении проходящей мощности, благодаря чему процесс поверки осуществляется без переключений в тракте.

Как показывает практика, простота конструкции пондеромоторного ваттметра позволяет разработать, изготовить и провести его калибровку силами неспециализированных лабораторий предприятий.

Теория пондеромоторных ваттметров, методика абсолютной калибровки, различные варианты конструкций приборов и результаты их исследования весьма полно описаны в периодической отечественной (3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11) и зарубежной (1, 2, 5) литературе.

Настоящая работа, в которой обобщен некоторый опыт по созданию пондеромоторных ваттметров крутильного типа, ставит своей целью указать путь для разработки прибора применительно к конкретным техническим требованиям и дать инженеру необходимые сведения для этого.

### 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Технические требования к прибору должны содержать следующие данные.

а) Диапазон частот (волн)  $f_{\min}(\lambda_{\max}) - f_{\max}(\lambda_{\min})$ .

Поскольку измерительная секция ваттметра представляет собой отрезок той же линии, для которой предназначается прибор, диапазон волн соответствует диапазону этой линии. Ограничением может служить трудность согласования подвижного элемента в широком диапазоне, а также величина дополнительной погрешности из-за рассогласования.

Если по условиям работы возможно подсогласование или величина входного к. с. в. н. не имеет существенного значения (калибровка прибора не нарушается при включении на его вход трансформатора сопротивлений), то ваттметр может быть использован в диапазоне волновода. Если ограничить входной к. с. в. н. величиной  $1,05 \div 1,10$  и не допустить подсогласования, частотный диапазон прибора составит  $\pm (3 \div 5)\%$  относительно средней частоты.

Несогласованная нагрузка еще сильнее сужает его.

б) Пределы измеряемых мощностей (средние назначения):  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$ .

При импульсно-модулированных колебаниях должна быть указана максимальная мощность в импульсе  $P_{\text{имп}}$ .

Необходимо отметить, что принципиальным ограничением измеряемой мощности снизу является тепловое движение молекул системы (подвижный элемент, нить, воздух), обуславливающее постоянные колебания и дрейф подвески. В то же время измерение малых уровней связано с необходимостью использования чрезвычайно тонких и длинных нитей подвеса ( $\Phi \sim 3\mu\text{к}$ ), делающих прибор весьма чувствительным к сотрясениям, вибрациям и т. д.

Поэтому практически величина минимальной измеряемой мощности составляет 30 *мвт* (волновод 7,2 · 3,4), 100 *мвт* (волновод 23 · 10), 1 *вт* (волновод 72 · 34), 10 *вт* (волновид 180 · 85) *мм*.

Максимальная мощность (при импульсной модуляции максимальная мощность в импульсе) определяется электрической прочностью измерительной секции прибора и составляет ориентировочно 3 *квт* (волновод 7,2 · 3,4), 30 *квт* (волновод 23 · 10) и 10 *Мвт* (волновод 180 · 84). Практически пробивная мощность измерительной секции на 20 ÷ 30 % ниже пробивной мощности невозмущенного волновода. При этом электрическая прочность секции повышается, если подвижный элемент выполнен из диэлектрика (11).

в) Тип передающей линии и размеры ее поперечного сечения.

г) Входной к. с. в. н. прибора  $r_{\text{вх}}$ . Обычно при отсутствии дополнительного согласования измерительной секции с линией передачи  $r_{\text{вх}}$  прибора, в зависимости от типа линии, размера пластин и частоты, лежит в пределах 1,1 ÷ 2,5. При необходимости согласование измерительной секции с линией передачи может быть достигнуто с помощью индуктивных диафрагм, штырей и т. д.

В любом случае погрешность измерения пондеромоторным ваттметром проходящей мощности (основное применение прибора) определяется только коэффициентом отражения нагрузки и не зависит от степени согласования прибора с волноводом.

д) Основная погрешность  $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)\%$  представляет собой погрешность, приписываемую пондеромоторному ваттметру после проведения его электрической и механической калибровок. В настоящее время калибровка пондеромоторного ваттметра может быть выполнена с погрешностью, не превышающей  $\pm 2\%$ .

е) Полная погрешность прибора  $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{\Sigma}$ .

Подразумевается суммарная погрешность измерителя, включающая в себя следующие составляющие:

1. Основную погрешность  $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)\%$ ;

2. Погрешность, обусловленную рассогласованием нагрузки с линией передачи  $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{\Gamma}\%$ .

Наибольшей из них является погрешность рассогласования, максимальное значение которой при к. с. в. н. нагрузки, равном 1,2, составляет 20% для однопластинчатого ваттметра и 1,5% для двухпластинчатого (9).

Отметим, что при известном модуле и фазе коэффициента отражения нагрузки электрическая калибровка прибора может быть выполнена по специальной методике [1,2], исключающей погрешность рассогласования. Поэтому, задаваясь полной погрешностью, необходимо уяснить, предназ-

Таблица 1

Характеристики прибора	Схема прибора								
	Однопластинчатая			Двухпластинчатая			Трехпластинчатая		
К. с. в. н. нагрузки $r_H$	1,1	1,2	1,5	1,1	1,2	1,5	1,1	1,2	1,5
Частота $f = 10$ Гц	$1 \pm 0,05$			$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,05$
Погрешность рассогласования $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_r$ , %	10	20	50	0,48 2	1,6 4,5	8 15	0,48 0,7	1,6 2,1	8 9
Входной к. с. в. н. $r_{вх}$	1,05			1,05			1,05		

Примечание. Таблица составлена для случая, когда нормированная проводимость пластины равна 0,7.

начается ли прибор для работы с постоянной нагрузкой или предполагается использовать его как измеритель проходящей мощности.

ж) Характер использования прибора (стационарный или переносной).

Это требование является определяющим при разработке конструкции измерителя.

## 2. ВЫБОР СХЕМЫ И СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ

В зависимости от назначения прибора и в соответствии с требованиями технического задания производится выбор его схемы. Если ваттметр предназначается для работы с хорошо согласованной нагрузкой ( $r_n \approx 1,01$ ), либо нагрузкой, модуль и фаза коэффициента отражения которой не изменяются в рабочем диапазоне волн, предпочтение следует отдать однопластинчатой схеме [1, 2, 9]. При работе прибора на несогласованную нагрузку в диапазоне частот целесообразно использовать трехпластинчатую схему, однако, в этом случае затруднена электрическая калибровка прибора, в результате чего понижается его точность.

Оптимальной, с точки зрения достижения наивысшей точности, является двухпластинчатая схема прибора, достаточно подробно описанная в работах [9, 11].

В табл. 1 приведены значения погрешности рассогласования в 5-процентном частотном диапазоне для трех рассмотренных схем.

Здесь же приводятся значения  $z_{вх}$  при условии, что на средней частоте диапазона подвижные элементы согласованы до  $r \leq 1,01$ .

Методика измерения мощности может строиться двояко: либо измеряется угол поворота подвижного элемента, либо угол закручивания нити подвеса, необходимый для возврата пластины, отклонившейся под действием мощности в первоначальное положение. Второй способ обеспечивает более высокую точность, но требует большего времени для измерения.

## 3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРА

а) Определяем угловое смещение подвижного элемента, соответствующее минимальной измеряемой мощности из условия, что погрешность измерения  $\theta_{\min}$  должна быть в 3 раза меньше основной погрешности прибора.

$$3 \frac{\Delta \theta}{\theta_{\min}} = \frac{\Delta P}{P}, \text{ или } \theta_{\min} = 3 \frac{\Delta P}{\Delta \theta} [\text{рад}].$$

б) Вычисляем величину калибровочного коэффициента прибора

$$K = \frac{P_{\min}}{\theta_{\min}} [\text{вт/рад}]. \quad (2)$$

в) Пользуясь табл. 2, выбираем ориентировочно размеры пластин и соответствующее им значение электрического калибровочного коэффициента  $K_e$  *дин · см/вт*. Точное значение  $K_e$  определяется при калибровке.

Обычно пластины пондеромоторных измерителей малых и средних уровней мощности изготавливаются из серебряной или медной фольги толщиной 0,1 ÷ 0,2 мм. Однако, применение металлических пластин в измерителях большой мощности приводит к снижению электрической прочности секции и пробую в месте подвеса пластин. Поэтому при разработке приборов для больших уровней необходимо подвижные элементы изготавливать из диэлектриков с малыми потерями и большим  $\epsilon$ ,

Таблица 2

$\lambda$ , см	Тип линии	Размер поперечного сечения, (мм)	Размеры подвижного элемента, (мм)	$K_e$ дин · см/вт	Максимальная мощность в импульсе $P_{имп}$ , квт
0.8	волноводная ( $b \times a$ )	7.2 · 3.4	4 · 2 · 0.1	$0.36 \cdot 10^{-4}$	3
2.0		8 · 17	5 · 4 · 0.1	$0.41 \cdot 10^{-4}$	15
2.0		17 · 17	5 · 4 · 0.1	$1.05 \cdot 10^{-4}$	30
2.3		8 · 17	5 · 4 · 0.1	$0.76 \cdot 10^{-4}$	30
3.2		23 · 10	5 · 5 · 0.1	$0.20 \cdot 10^{-4}$	130
3.2		23 · 10	7 · 5 · 0.1	$1.84 \cdot 10^{-4}$	70
3.2		23 · 10	7 · 5 · 0.1	$1.19 \cdot 10^{-4}$	100
3.2		27.5 · 12.5	8 · 4 · 0.3	$1.35 \cdot 10^{-4}$	50
4.5		40 · 20	11 · 5 · 0.1	$3.28 \cdot 10^{-4}$	1000
25		коаксиальная ( $D, d$ )	180 · 85	30 · 15 · 0.4	$0.87 \cdot 10^{-4}$
20.1	16 · 4.6		Диск 5 · 0.05	$0.67 \cdot 10^{-4}$	25
20.1	40 · 16		Диск 5 · 0.05	$0.11 \cdot 10^{-4}$	20

В частности, удовлетворительные результаты были получены при эксплуатации приборов с пластинами из титаната кальция ( $P_{имп} = 1 \text{ Мвт}$ ,  $P_{ср} = 950 \text{ вт}$ ) и тикондовыми пластинами ( $P_{имп} = 3 \text{ Мвт}$ ,  $P_{ср} = 2,8 \text{ квт}$ ).

г) По номограмме рис. 1 либо по формуле  $K_M = K \cdot K_e$  определяем удельный момент кручения нити подвеса (жесткость). Отметим, что применение растяжек почти исключено ввиду трудностей, возникающих при балансировке подвижного элемента.

д) Минимальное значение измеряемой мощности должно удовлетворять неравенству

$$P_{min} > \frac{\sqrt{kTK_M}}{0,01K_e}$$

$k$  — постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/градус}$ ;  
 $T$  — абсолютная температура.  
 Вывод неравенств приведен в работе [6].

е) Вычисляем длину нити подвеса, задаваясь диаметром  $2a$  и  $10^{-4}$  материалом,

$$l = \frac{a^4 \cdot E \cdot \pi}{2 \cdot K_M} \quad (4)$$

где  $E$  — модуль сдвига, равный  $(3 \div 6) \cdot 10^{11}$  [12] для кварца и  $(1,3 \div 1,5) \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$  [12, 13] для вольфрама.

Определение размеров нити по известному  $K_M$  может быть произведено из графиков (рис. 2).

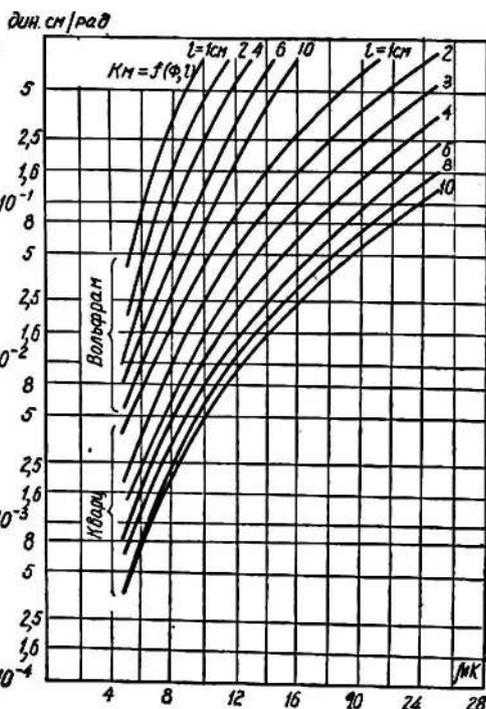


Рис. 1. Удельный момент кручения вольфрамовых и кварцевых нитей.

ж) Допустимый вес подвижной системы ваттметра может быть вычислен из формулы [13]

$$G < \frac{\sigma_F S}{50}, \quad (5)$$

где  $\sigma_F$  — временное сопротивление на разрыв (для кварца  $\sigma_F = (1,5 \div 3)10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>, для вольфрама в 3 раза выше);  
 $S$  — площадь поперечного сечения нити.

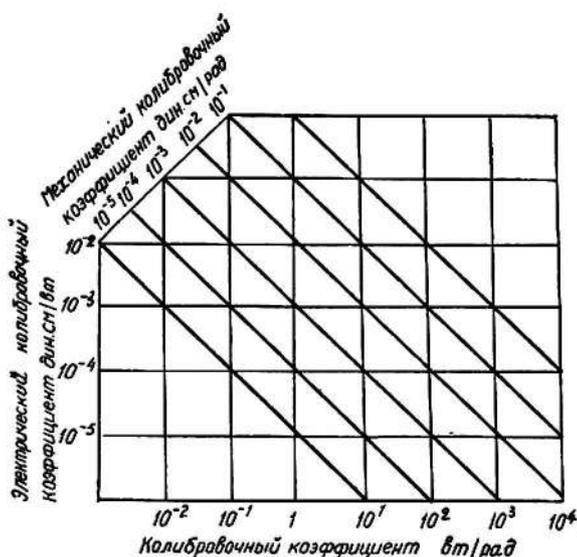


Рис. 2. Номограмма для определения удельного момента кручения при известных  $K_e$  и  $K$ .

#### 4. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРИБОРА

Конструкция пондеромоторного измерителя мощности включает в себя следующие основные элементы: волноводный блок, измерительный редуктор, индикаторную систему и арретирно-демпферное устройство.

В случае однопластинчатого прибора волноводный блок может быть выполнен из цельного отрезка волновода с прорезанной соответствующим образом щелью, через которую погружается подвижный элемент. Более удобна конструкция измерительной секции, выполненная из двух разъемных в поперечном сечении отрезков волновода, соединяющихся с помощью фланцев, в месте стыка которых просверливается отверстие для ввода подвесной системы. Диаметр отверстия должен удовлетворять двум условиям.

Первое — его размеры должны быть такими, чтобы исключалась возможность соприкосновения несущего стерженька подвесной системы со стенками измерительной секции. Так как для изготовления подвесов используются кварцевые стержни  $\varnothing = (0,3 \div 0,5)$  мм, нормальная работа прибора обеспечивается уже при диаметре отверстия  $(1,2 \div 1,5)$  мм. Второе — размеры отверстия должны быть такими, чтобы исключалась возможность излучения сквозь него мощности СВЧ и по возможности не нарушалась однородность линии передачи. Расчет и эксперимент показывают, что в волноводных линиях передачи, вплоть до сечения  $48 \cdot 24$  мм, этим

условиям удовлетворяет отверстие  $\varnothing \approx 1,2$  мм. Для волноводов большего сечения, включая волновод (180·85), отверстие  $\varnothing \approx 5$  мм.

Волноводный блок многопластинчатых приборов обычно представляет собой изогнутый в плоскости Е S-образный волновод. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах имеется возможность изготовления S-изгиба из двух составных частей, стыкующихся по линии нулевых токов для типа Н<sub>10</sub>, в результате чего значительно облегчается сборка и эксплуатация прибора [9,11].

Вопросы согласования пондеромоторных ваттметров достаточно подробно рассмотрены в работах [1,9]; там же приведены размеры диафрагм и согласующих штырей.

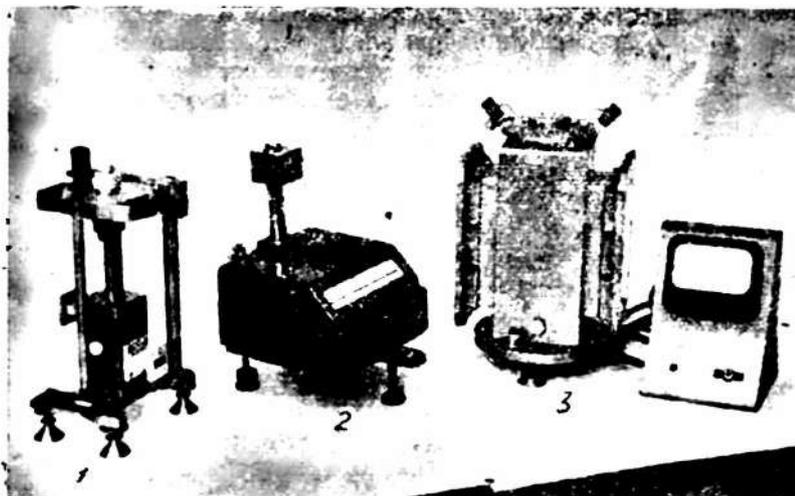


Рис. 3. Пондеромоторные ваттметры:  
1, 2 — двухпластинчатые; 3 — однопластинчатый измеритель мощности.

В качестве измерителя угловых перемещений целесообразно использовать верньерное устройство, изготовленное на базе отсчетной системы теодолита ТГ-5. Для этих же целей подходит и оптический квадрант типа КО-1, который при незначительной переделке позволяет измерять угловые смещения в диапазоне  $0 \div 360^\circ$  с погрешностью  $\pm 30''$ . Отсчетная система теодолита ТГ-5 обеспечивает ту же точность.

Для индикации начального положения подвесной системы в последнее время используется фотокомпенсационная система, основным элементом которой является фотосопротивление типа ФС-К7А (ФС-К7Б). Устройство обладает высокой разрешающей способностью  $\sim 15''$  при постоянной времени 0,01 сек; оно просто в изготовлении и надежно в эксплуатации.

Арретирно-демпферное устройство обычно выполняется в виде отдельного блока и имеет ряд рабочих положений: «арретир» — «работа». В положении «арретир» кварцевая нить освобождена от натяжения, так как подвеска поднимается и стопорится. В положении «работа» подвесная система свободна и ее крючок опускается в ванночку с жидкостью, служащей успокоителем.

На рис. изображено три различных по конструкции пондеромоторных измерителя мощности: однопластинчатый и два двухпластинчатых ваттметра. Волноводный блок однопластинчатого прибора выполнен в виде составного (2 части) волновода сечением (180·85).

Измерительный редуктор изготовлен из теодолита ТГ-5.

Волноводные блоки двухпластинчатых ваттметров представляют собой разъемные в плоскости нулевых поперечных токов S-образные волноводы. Измерение мощности в одном случае производится по измерению угла закручивания нити оптическим квадрантом КО-1, в другом — непосредственно по шкале, проградуированной в единицах мощности.

### 5. КАЛИБРОВКА ПРИБОРА И ЕГО АТТЕСТАЦИЯ

Пондеромоторные ваттметры являются абсолютными, так как их калибровка заключается в измерении массы, времени при определении удельного момента кручения нити подвеса (механическая калибровка), а также измерении длины (перемещения) при электрической калибровке.

Механическая калибровка непосредственно сводится к измерению параметров свободных колебаний эталонированного по моменту инерции  $I$  груза: периода  $t$  и декремента затухания  $\ln\theta_1/\theta_2$  и расчету

$$K_M = \frac{I}{t^2} (4\pi^2 + \ln^2\theta_1/\theta_2) \text{дин} \cdot \text{см/рад.}$$

Чтобы обеспечить высокую точность калибровки, необходимо выполнить следующие требования:

а) эталонный груз должен быть жестко связан с нитью подвеса;

б) момент инерции его инвариантен относительно оси вращения;

(если груз имеет цилиндрическую форму, условие инвариантности выполняется при  $h = 1,73 R$ , для конического груза это соотношение принимает вид  $h = 2R$ , где  $h$  — высота,  $R$  — радиус основания);

в) груз должен быть из немагнитного материала (его масса равна массе подвесной системы);

г) механическая калибровка производится в помещении, свободном от голчков и вибраций.

При электрической калибровке определяется соотношение между вращающим моментом  $T$  и мощностью  $P$ . В соответствии с работами [1,2]

$$K_e = \frac{1}{2c} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_b} \left[ \frac{dx_1}{d\theta} + \frac{dx_2}{d\theta} \right] \text{дин} \cdot \text{см/вт},$$

где  $c$  — скорость света;

$\lambda, \lambda_b$  — длины волн соответственно в свободном пространстве и волноводе;

$\frac{dx_1}{d\theta} + \frac{dx_2}{d\theta}$  — сумма градиентов, определяемая экспериментально.

Методика электрической калибровки с помощью измерительной линии описана в работах [1,2], применение для этих целей волноводного T-образного моста рассмотрено также [8].

Анализ показывает, что основным источником погрешности при электрической калибровке прибора является член

$$\left[ \frac{dx_1}{d\theta} + \frac{dx_2}{d\theta} \right].$$

В связи с этим в последнее время были проведены исследования ряда методов калибровки, позволившие значительно повысить ее точность.

а) Способ, заключающийся в сравнении фазового сдвига, возникающего при удлинении выходного плеча прибора на известное с высокой точностью расстояние  $\Delta l$ , с фазовым сдвигом, обусловленным поворотом

пластины на угол  $\Delta\theta$ ; для этого используются калиброванные отрезки линий, длина которых  $\Delta l$  может быть измерена часовыми индикаторами.

б) Способ измерения фазовых сдвигов с помощью прецизионного ртутного короткозамыкателя.

в) Способ, основанный на применении в качестве подвижного короткозамыкателя КЗ линии переменной длины с размером  $a$ , близким к критическому, в котором длина волны больше длины волны в основном волноводе. За счет трансформации фазовых сдвигов разрешающая способность системы увеличивается.

С помощью описанных методов можно измерить фазовые сдвиги, эквивалентные изменению электрической длины на 1 мк. Погрешность электрической калибровки в этом случае  $\sim 1\%$ .

В заключение отметим, что погрешности пондеромоторного ваттметра достаточно подробно рассмотрены в работе [9]. Там же приводятся расчетные формулы для определения составляющих суммарной погрешности.

Авторы благодарны проф. Валитову Р. А. за постоянный интерес к настоящей работе и полезные советы, высказанные при обсуждении результатов ее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cullen A. L. A General method for the absolute measurement of microwave power. Proc. IEE, 1952, 99, pt IV, p. 122.
2. Cullen A. L., Rogal B. and Okamura. A wideband double-vane torque-operated wattmeter for 3-cm microwaves. Trans. of IRE, MTT-6, Apr., 1958, p. 133.
3. В. Д. Кукуш. Устранение погрешности, связанной с рассогласованием пондеромоторных измерителей мощности. Труды РФФ ХГУ, т. 2, Изд-во ХГУ, 1957.
4. В. Д. Кукуш. К вопросу создания коаксиального пондеромоторного измерителя мощности. Труды РФФ ХГУ, т. 4, Изд-во ХГУ, 1959.
5. Cullen A. L. Absolute power measurement of microwaves frequencies. Proc. IEE, 1952, 99, pt IV, p. 133.
6. В. Д. Кукуш, В. Г. Орлов. О нижнем пределе мощности, измеряемой пондеромоторным ваттметром. Труды РФФ ХГУ, т. 3, Изд-во ХГУ, 1959.
7. В. Д. Кукуш. К устранению некоторых недостатков пондеромоторных измерителей мощности. Труды РФФ ХГУ, т. 4, Изд-во ХГУ, 1959.
8. В. Д. Кукуш, В. Г. Орлов. Повышение точности электрической калибровки пондеромоторных измерителей мощности на СВЧ. «Измерительная техника», 1960, № 2.
9. Р. А. Валитов, В. Д. Кукуш, В. Г. Орлов. Использование пондеромоторных эффектов электромагнитного поля для измерения мощности на СВЧ. «Вопросы радиоэлектроники», серия VI, вып. 1, 1960.
10. Р. А. Валитов, В. Д. Кукуш, В. Г. Орлов. Пондеромоторный измеритель мощности. «Измерительная техника», 1962, № 7.
11. Е. Я. Говоруя, В. Г. Орлов, В. Д. Кукуш. Пондеромоторный измеритель больших уровней мощности на СВЧ. «Вопросы радиоэлектроники», серия VI, вып. 3, 1963.
12. Д. Стронг. Техника физического эксперимента. Лениздат, 1948.
13. Э. Агерер. Техника физического эксперимента. Физматгиз, 1962.