

Приведены результаты исследования и отработки методики учета неэквивалентности замещения оптического сигнала электрическим при калибровке калориметрических первичных измерительных преобразователей.

УДК 536.62.088.6

К.И. Мунтян,
Е.П. Тимофеев, канд. техн. наук.
*Национальный научный центр
 "Институт метрологии"*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЗАМЕЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИ КАЛИБРОВКЕ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Введение. Контроль энергетических параметров различных источников оптического излучения является одним из самых востребованных видов измерений в области оптической метрологии и светотехники. Основную долю парка средств измерений составляют калориметры, обеспечивающие наивысшую достижимую в настоящее время точность абсолютных измерений в диапазоне мощностей порядка ватта. Калориметрические первичные измерительные преобразователи (ПИП), входящие в состав аппаратуры государственных эталонов, являются основным элементом, определяющим точность воспроизведения и хранения единицы мощности лазерного излучения [1, 2]. Калибровка калориметрического ПИП методом электрического замещения позволяет гармонизировать эталон единицы мощности лазерного излучения с существующими Государственными эталонами единицы напряжения - Вольта и единицы сопротивления - Ома.

Один из доминирующих вкладов в погрешность абсолютной калибровки калориметрического ПИП вносит неэквивалентность замещения лазерного излучения калибровочным тепловым потоком. Неэквивалентность замещения обуславливают следующие источники погрешности:

- несимметричность конструкции ПИП для процессов измерения и калибровки;
- разнесенность в пространстве приемной площадки и калибровочной нагревательной обмотки ПИП;
- неравенство облучаемой и обогреваемой площадей;
- неравенство объемов поглощения излучения и нагревательной обмотки;
- отличие механизмов теплоотдачи с облучаемой и обогреваемой поверхностями приемного элемента;
- отличие условий теплообмена для облучаемой и обогреваемой поверхностей;
- отличие временных характеристик тепловыделения при облучении и обогреве;
- зависимость теплофизических характеристик материала приемного элемента от температуры;
- неодинаковость теплофизических характеристик материалов приемного элемента и нагревательной обмотки;
- необходимость электроизоляции нагревательной обмотки;
- неопределенность расположения точки измерения эффективной температуры приемного элемента.

Апробированные методики учета неэквивалентности замещения в настоящее время в литературе отсутствуют.

Целью настоящего исследования является изучение путей совершенствования методики учета неэквивалентности замещения при электрической калибровке калориметрических ПИП, входящих в состав Государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения средних уровней, модернизация которого предусмотрена Программой развития эталонной базы Украины на 2006 - 2010 гг.

Постановка задачи. Задача исследования состоит в отработке методики оценки степени неэквивалентности воздействия на приемный элемент калориметра измеряемого лазерного излучения и замещающего его теплового воздействия электрического тока. Для получения такой оценки рассмотрим идеализированные теплофизическую, электрическую и математическую модели калориметрического ПИП. Для экспериментального исследования выбираем ПИП ТПИ-2М.1, конструкция которого показана на рис. 1. Основным аргументом в пользу выбора этого ПИП служит то обстоятельство, что для отработки методики оценки желательно иметь приемный элемент, поддающийся хотя бы приближенному аналитическому расчету.

Конструкция ПИП. Основными элементами конструкции ПИП, определяющими его функциональные характеристики, являются приемный элемент 1, выполненный в виде пластины 60 мм x 60 мм x 10 мм из рекристаллизованного графита, батарея хромель-копелевых термопар 2, проволочный константановый нагреватель 3 и дюралевый корпус 4.

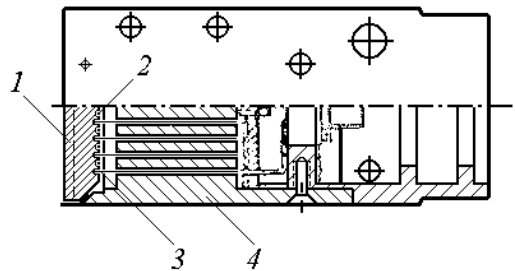


Рис. 1. Конструкция калориметрического ПИП ТПИ-2М.1

1 - приемный элемент, 2 - нагревательная обмотка, 3 - батарея термопар, 4 - корпус

Процесс измерения мощности лазерного излучения заключается в подаче измеряемого излучения на приемный элемент ПИП, ожидании окончания переходного процесса и измерении выходного сигнала батареи термопар. Процесс калибровки отличается от процесса измерения только тем, что на приемный элемент вместо измеряемого оптического излучения подается калибровочный тепловой поток, генерируемый внутренним электрическим нагревателем.

Теплофизическая модель. Приемный элемент ПИП моделируем неограниченной вертикальной пластиной толщиной δ , расположенной в воздушной среде с температурой T_0 .

Нагрев приемного элемента идет за счет следующих процессов:

- поглощение измеряемого оптического излучения с плотностью мощности $q_{изл}$;
- нагрев калибровочным тепловым потоком с плотностью мощности $q_{калибр}$.

Сброс тепла происходит вследствие следующих процессов:

- естественная конвекция с фронтальной и тыльной поверхностями приемного элемента;
- излучение с фронтальной и тыльной поверхностями приемного элемента;
- теплопроводность термобатареи, проволочного нагревателя и узла крепления приемного элемента.

Потери тепла за счет этих механизмов с фронтальной и тыльной поверхностями приемного элемента характеризуем интегральными коэффициентами теплоотдачи α_1 и α_2 , соответственно.

Теплофизические свойства воздуха, поликристаллического мелкозернистого графита, дюраля, константана, хромеля и копеля получаем аппроксимацией справочных данных [3, 4].

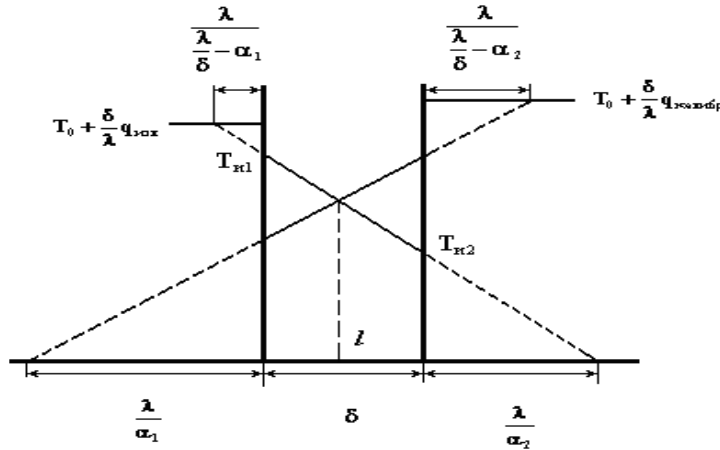


Рис. 2. Распределение стационарных температур в модели приемного элемента ПИП при измерении и калибровке

$T_{к1}$ и $T_{к2}$ - температуры тыльной поверхности, λ - коэффициент теплопроводности графита, l - координата точки измерения эффективной температуры приемного элемента.

Электрическая модель. Электрический нагреватель, генерирующий калибровочный тепловой поток, представляем в виде цепи из двух последовательно соединенных резисторов $R_{конт}$ и $R_{неконт}$, которые моделируют активные сопротивления элементов нагревателя, имеющих и, соответственно, не имеющих теплового контакта с приемным элементом.

Математическая модель. Для принятой теплофизической модели записываем законы сохранения

$$q_{изл} = \alpha_{и1} (T_{и1} - T_0) + \alpha_{и2} (T_{и2} - T_0)$$

$$q_{калибр} = \alpha_{к1} (T_{к1} - T_0) + \alpha_{к2} (T_{к2} - T_0)$$

$$\alpha_{и2} (T_{и2} - T_0) = \frac{\lambda}{\delta} (T_{и1} - T_{и2})$$

$$\alpha_{к1} (T_{к1} - T_0) = \frac{\lambda}{\delta} (T_{к2} - T_{к1})$$

и дополняем их балансными уравнениями

$$\frac{\lambda}{\delta} - \alpha_{и1} - \alpha_{и2} = \frac{C}{\tau_{и0}}$$

$$-\alpha_{и1} - \alpha_{и2} = \frac{C}{\tau_{и1}}$$

$$\frac{\lambda}{\delta} - \alpha_{к1} - \alpha_{к2} = \frac{C}{\tau_{к0}}$$

$$-\alpha_{к1} - \alpha_{к2} = \frac{C}{\tau_{к1}}$$

где C - удельная теплоемкость материала приемного элемента, $\tau_{и0}$ - постоянная времени нагрева приемного элемента измеряемым излучением, $\tau_{и1}$ - постоянная

При измерении мощности излучения и калибровке ПИП распределение температур, установившееся в приемном элементе по окончании переходных процессов, описывается законом Фурье и в линейном приближении показано на рис. 2, где $T_{и1}$ и $T_{к1}$ - температуры фронтальной поверхности приемного элемента при измерении и калибровке,

времени остывания приемного элемента, нагретого оптическим излучением, $\tau_{к0}$ - постоянная времени нагрева приемного элемента калибровочным потоком, $\tau_{к1}$ - постоянная времени остывания приемного элемента, нагретого калибровочным потоком.

Записанная система уравнений недоопределена, поэтому добавляем еще два балансных уравнения, которые предполагают, что в эксперименте мы можем теплоизолировать фронтальную поверхность приемного элемента и пренебречь ее теплопотерями при остывании.

$$-\alpha_{и2} = \frac{C}{\tau_{и2}}$$

$$-\alpha_{к2} = \frac{C}{\tau_{к2}}$$

где $\tau_{и2}$ и $\tau_{к2}$ - постоянные времени остывания приемного элемента, нагретого измеряемым излучением и калибровочным потоком, соответственно.

Аналитическое решение. Из записанной системы уравнений и теплофизической модели приемного элемента получаем коэффициент K неэквивалентности замещения

$$K = \frac{q_{изл}}{q_{калибр}} = \frac{\frac{1}{\delta} + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к0}(\tau_{к1} - \tau_{к2})}}{1 - \frac{1}{\delta} + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и0}\tau_{и1}}} \times \frac{1 + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и0}\tau_{и1}} + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и1}(\tau_{и0} - \tau_{и2})}}{1 + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к0}(\tau_{к1} - \tau_{к2})} + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0}) + \tau_{к0}\tau_{к1}}}; \quad (1)$$

Дифференцируя (1) и оставляя только доминирующие составляющие, получаем относительную погрешность dK/K коэффициента неэквивалентности замещения

$$\frac{dK}{K} = \left(\frac{dl}{\delta} + \frac{ld\delta}{\delta^2} + \frac{d\tau_{к0} + 2d\tau_{к1} + d\tau_{к2}}{\tau_{к1} - \tau_{к2}} \right) \times$$

$$\times \left\{ \left[\frac{1}{\delta} + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к0}(\tau_{к1} - \tau_{к2})} \right]^{-2} + \left[1 + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к0}(\tau_{к1} - \tau_{к2})} + \frac{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0})}{\tau_{к2}(\tau_{к1} - \tau_{к0}) + \tau_{к0}\tau_{к1}} \right]^{-2} \right\}^{\frac{1}{2}} +$$

$$+ \left(\frac{d\tau_{и0} + 2d\tau_{и1} + d\tau_{и2}}{\tau_{и0} - \tau_{и2}} \right) \times$$

$$\times \left\{ \left[1 - \frac{1}{\delta} + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и0}\tau_{и1}} \right]^{-2} + \left[1 + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и0}\tau_{и1}} + \frac{\tau_{и2}(\tau_{и0} - \tau_{и1})}{\tau_{и1}(\tau_{и0} - \tau_{и2})} \right]^{-2} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

Эксперимент. Экспериментальное исследование калориметрического ПИП ТПИ-2М.1 проводилось на установке, показанной на рис. 3, в состав которой входили диодный лазер АТС-С3000-500-АМФ-АТС-03Н ($\lambda = 0,806$ мкм) с управляющим устройством LDD-10, мультиметры DM 3559 и DT-830В, источник калибровочного напряжения JPS-3030 и компьютер.

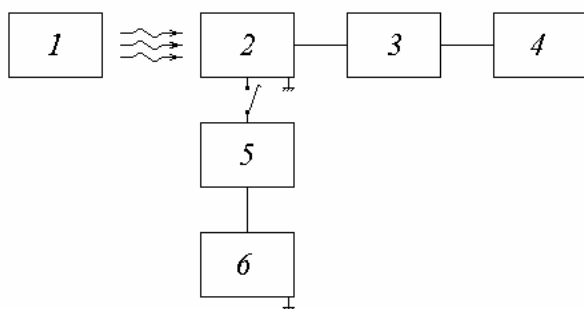


Рис. 3. Схема экспериментальной установки
1 - лазер, 2 - ПИП, 3 - милливольтметр DM 3559, 4 - компьютер,
5 - миллиамперметр DT-830B, 6 - источник напряжения

Методика эксперимента предусматривала подачу оптического излучения постоянной мощности на приемный элемент ПИП и регистрацию величины U_i напряжения выходного электрического сигнала ПИП от момента подачи излучения до момента выхода ПИП на стационарный тепловой режим. После достижения стационарного теплового режима источник излучения выключался и выходной сигнал ПИП регистрировался вплоть до момента полного остывания приемного элемента.

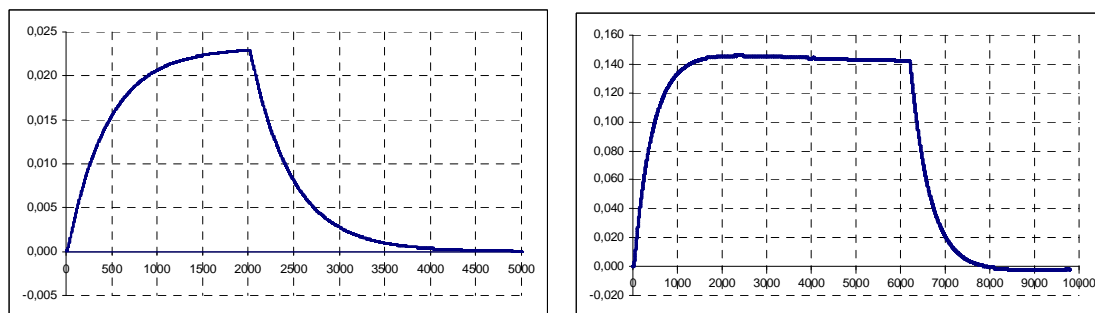
Затем мощность оптического излучения изменялась и измерительный цикл нагрева-остывания и регистрация выходного сигнала ПИП повторялись.

Аналогичный измерительный цикл проводился при подаче на приемный элемент ПИП калибровочного теплового потока.

Для теплоизоляции фронтальной поверхности приемного элемента в фазах его остывания использовался лист пенополиуретана толщиной 50 мм, который с небольшим усилием прижимался к приемному элементу ПИП. Потери через теплоизолятор составляли $\approx 0,015$ Вт.

Существенным условием регистрации выходного сигнала ПИП является эквидистантность моментов измерения во времени. Период измерений задавался внутренним генератором мультиметра и составлял 0,393 с.

Пример графиков изменения выходного сигнала ПИП в течение цикла измерения приведен на рис. 4.



а) измеряемое оптическое излучение

б) калибровочный тепловой поток

Рис. 4. Изменение выходного сигнала калориметрического преобразователя в течение цикла измерения

Обработка экспериментальных данных. Целью обработки накопленного массива экспериментальных данных являлось получение корректных значений эквивалентных постоянных времени переходных процессов.

Известная методика аппроксимации экспериментальных графиков исследуемых переходных процессов экспоненциальным полиномом [5] оказалась неэффективной, так как не позволяла отфильтровать сбойные и зашумленные результаты измерений, а, главное, вследствие близости переходного процесса к экспоненте, матрица коэффициентов нормальных уравнений вырождена (точнее, отличается от вырожденной на малую величину, обусловленную шумами измерений), поэтому необходимые в процессе аппроксимации союзные и обратные матрицы, а,

следовательно, и корни нормальных уравнений, вычисляются с большой ошибкой, что приводит к недопустимо большой погрешности определения постоянных времени.

Более эффективным оказалось прямое вычисление постоянной времени переходного процесса при нагреве (остывании) приемного элемента ПИП по следующему алгоритму:

- по массиву величин U_i , измеренных в течение переходного процесса, вычисляется массив величин $\Delta U_i = U_{i+1} - U_i$;
- по массиву величин ΔU_i вычисляется массив величин $\ln \Delta U_i$;
- по массиву величин $\ln \Delta U_i$ вычисляется массив величин $\Delta F_i = \ln \Delta U_{i+1} - \ln \Delta U_i$;
- для массива величин ΔF_i по методу наименьших квадратов вычисляется уравнение линейного тренда $\Delta F_i = f(i)$;
- постоянная времени переходного процесса вычисляется как величина, обратная свободному члену уравнения линейного тренда, и приводится к единицам времени путем умножения на период выборки величин U_i в секундах.

Для идеального экспоненциального переходного процесса линейный тренд, вычисленный по этому алгоритму, представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс и смещенную от нее вниз на величину, обратную постоянной времени экспоненты.

Пример экспериментального графика $\Delta F_i = f(i)$ приведен на рис. 5.

Описанный алгоритм вычисления постоянной времени чрезвычайно чувствителен к отклонению элементов выборки U_i от экспоненциальной зависимости, поэтому экспериментальный график на рис. 5 позволяет выявить неэкспоненциальные области переходного процесса, определить области доминирования шумов измерений и оценить их величину, отфильтровать сбои измерительной аппаратуры, вычислить характеристики доминирующей экспоненты и ошибку их вычисления, а также величину изменения этих характеристик в течение переходного процесса.

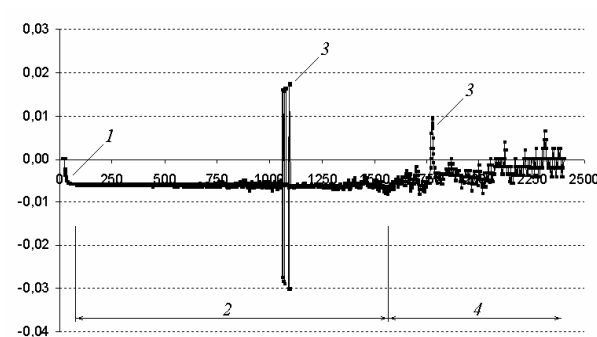


Рис. 5. Экспериментальная зависимость характеристик переходного процесса от времени

- 1 - начальная неэкспоненциальная область переходного процесса,
2 - экспоненциальная область переходного процесса, 3 - сбои измерительной аппаратуры, 4 - область доминирования шумов измерения

Обсуждение результатов. Полученные в эксперименте постоянные времени переходных процессов приведены в таблице, из анализа которой следуют основные экспериментальные факты:

- постоянная времени переходного процесса нагрева приемного элемента при измерении больше, чем при калибровке;
- постоянная времени переходного процесса остывания приемного элемента при измерении меньше, чем при калибровке;
- теплоизоляция приемного элемента листом пенополиуретана уменьшает постоянную времени процесса остывания как при измерении, так и при калибровке ПИП;

- постоянные времени всех переходных процессов, измеренные в последовательных циклах одного дня, монотонно уменьшаются (за исключением одного случая).

Таблица

Экспериментальные значения постоянных времени переходных процессов

Цикл измерения	Амплитуда, В	Постоянная времени переходного процесса, с					
		Измерение			Калибровка		
		Нагрев	Остыв	Остыв(изол)	Нагрев	Остыв	Остыв(изол)
211008_141736	0,022902	175,13	182,78				
060209_135808	0,006435				131,03	237,34	
060209_144314	0,024875				180,88	192,21	
060209_152605	0,050911				174,62	172,99	
090209_085038	0,146833				168,14	199,75	
090209_123738	0,145735				166,01	178,80	
150409_104135	0,020547	186,46		177,50			
150409_124545	0,020785	174,61		170,61			
150409_171136	0,020908				174,61		170,61
150409_184258	0,020542				173,81		140,41
160409_092354	0,020337				179,32		177,35
160409_110737	0,019974				162,39	176,72	
160409_121158	0,020059				173,40		135,70
160409_130231	0,145416				172,16	176,82	
160409_141032	0,143562				156,78		177,01
Среднее значение		178,73	182,78	174,06	167,76	190,66	160,22

Коэффициент неэквивалентности замещения для исследованного в эксперименте экземпляра ПИП, рассчитанный согласно (1), составляет $K = 1,023$ при $l / \delta = 0,85$. Полученная оценка коэффициента неэквивалентности замещения в пределах погрешности, рассчитанной согласно (2), совпадает со значением, полученным при непосредственных прямых измерениях энергетических характеристик лазерного излучения и замещающего его теплового воздействия электрического тока, с учетом коэффициента черноты ПИП.

Выводы

Использование модели линейного приближения распределения температур, установившихся в приемном элементе по окончании переходных процессов, позволяет оценить неэквивалентность замещения при электрической калибровке калориметрического первичного измерительного преобразователя.

На основании результатов эксперимента делаем следующие выводы:

- из факта неодинаковости постоянных времени переходных процессов при измерении и калибровке ПИП следует, что приемный элемент ПИП несимметричен для процессов измерения и калибровки;
- из факта увеличения потерь при теплоизоляции приемного элемента пенополиуретаном однозначно следует, что доминирующим механизмом теплопотерь для мощностей излучения порядка единиц Ватт являются потери с приемного элемента на корпус вследствие теплопроводности термобатарей, проволочного нагревателя и узла крепления приемного элемента;
- из факта монотонного уменьшения постоянных времени переходных процессов в последовательно выполненных циклах измерений следует, что теплофизические характеристики основных функциональных элементов ПИП зависят от температуры.

Таким образом, при разработке методики оценки неэквивалентности замещения необходимо учитывать тип приемного элемента ПИП и зависимость теплофизических характеристик основных функциональных элементов ПИП от температуры.

Следует отметить, что в перспективе необходима дальнейшая проверка разработанной методики оценке неэквивалентности замещения оптического сигнала электрическим при калибровке калориметрических первичных измерительных преобразователей для случая наиболее широко распространенных конусных моделей приемного элемента ПИП.

Литература

1. Тимофеев Е.П. Метрологическое обеспечение в области энергетической лазерометрии //Український метрологічний журнал. – N1. – 2007. – с.29-33.
2. Тимофеев Е.П. Разработка и исследование средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения //Український метрологічний журнал. – N2. – 2009. – с.29-35.
3. Теория тепломассообмена. Под. ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997г.
4. Физические величины. Справочник под ред. И.С. Григорьева и др., – М.: Энергоатомиздат, 1991 г.
5. Безикович Я. С. Приближенные вычисления. – М.: Гостехиздат, 1949 г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ЗАМІЩЕННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИ КАЛІБРУВАННІ КАЛОРИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

К.І. Мунтян, Є. П. Тимофеев.

Приведені результати дослідження і опрацювання методики обліку нееквівалентності заміщення оптического сигнала електричним при калібруванні калориметричних первинних вимірювальних перетворювачів.

THE INVESTIGATION OF ERROR OF SUBSTITUTING OF VISUAL SIGNAL BY ELECTRIC SIGNAL AT CALIBRATION OF CALORIMETRY CONVERTERS

K.I. Muntean, Ye.P. Timofeev.

The results of investigation and working off the account method of substituting nonequivalence for a visual signal by electric signal at calibration of calorimetry primary measurements converters are given.