

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*The main aim of this work is to decrease the uncertainty of measuring of a laser beam power by isoperibol calorimeters. Measurement and calibration operating regimes of the isoperibol calorimeter are investigated experimentally. Temperature transients during the heating and cooling of the calorimeter core are studied. The di of transient parameters in measurement and calibration operating regimes of the calorimeter are disclosed. Initial data for design of the calibration model of the isoperibol calorimeter are determined. It is recommended to take into account on a nonlinear thermalphysic characteristics of the core materials.*

**Ключевые слова:** лазерное излучение, изопериболический калориметр, калибровка.

### Постановка проблемы

Контроль энергетических параметров излучения является доминирующим видом измерений в области лазерной метрологии. В диапазоне мощностей выше нескольких долей Ватта минимальную неопределенность измерений обеспечивают калориметрические первичные измерительные преобразователи (ПИП), калибруемые методом электрического замещения. Уменьшение неопределенности калибровки измерительных преобразователей составляет важную часть задачи совершенствования государственных эталонов Украины.

### Анализ состояния проблемы

Принципиально неустранимый вклад в бюджет неопределенности калибровки калориметрических ПИП вносит неэквивалентность замещения лазерного излучения калибровочным тепловым потоком. Неэквивалентность замещения обусловлена такими источниками:

- несимметричность конструкции ПИП для процессов измерения и калибровки;
- разнесенность в пространстве приемной площадки и калибровочной нагревательной обмотки измерительного преобразователя;
- неравенство облучаемой и обогреваемой площадей приемного элемента;
- неравенство объемов нагревательной обмотки ПИП и области поглощения излучения приемного элемента;
- отличие механизмов теплоотдачи с облучаемой и обогреваемой поверхностями приемного элемента;

- отличие условий теплообмена для облучаемой и обогреваемой поверхностей приемного элемента;

- отличие временных характеристик тепловыделения при облучении и обогреве приемного элемента;

- 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.

Неоднородная внутренняя структура калориметрического измерительного преобразователя, нелинейность протекающих в нем процессов и многофакторный процесс его калибровки существенно усложняют разработку эталонных ПИП. Упростить определение оптимальных параметров измерительного преобразователя позволяет разработка его адекватной модели, которая дает возможность прогнозировать реакцию ПИП на заданное внешнее воздействие, причем заданным воздействием может быть как измеряемое лазерное излучение, так и изменение параметров окружающей среды. Задача построения модели не имеет однозначного решения, т. к. различающиеся теоретические подходы приведут к неодинаковым моделям. Наиболее ценными являются модели, отражающие, в определенной степени, внутреннюю

структуру ПИП и его организацию. Такая модель позволяет выбрать и обосновать структурную схему ПИП, состоящую из простейших хорошо изученных идеализированных элементов.

### Цель работы

Целью настоящей работы является получение исходной информации для построения модели измерительного преобразователя путем экспериментального определения параметров процесса измерения мощности лазерного излучения и процесса калибровки ПИП.

### Описание эксперимента

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.

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

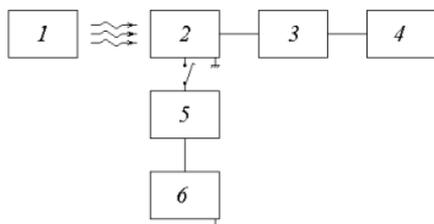


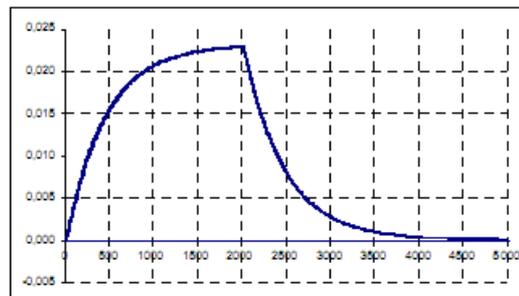
Рис. 1. Схема экспериментальной установки  
1 - лазер, 2 - ПИП, 3 - милливольтметр DM 3559,  
4 - компьютер, 5 - миллиамперметр DT-830B,  
6 - источник напряжения

Методика эксперимента предусматривала подачу оптического излучения постоянной мощности на приемный элемент ПИП и регистрацию величины напряжения  $U_i$  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.

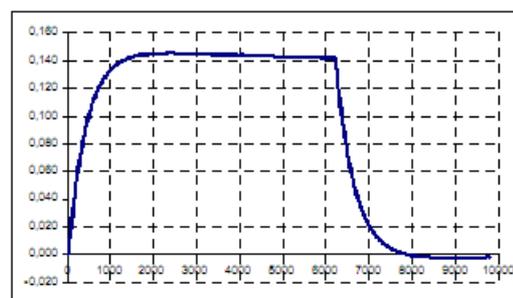
Аналогичный измерительный цикл проводился при подаче на приемный элемент ПИП калибровочного теплового потока.

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

Типичные графики регистрируемых переходных процессов показаны на рис. 2.



а) измеряемое оптическое излучение



б) калибровочный тепловой поток

Рис. 2. Изменение выходного сигнала калориметрического преобразователя в течение цикла измерения

Из теории [1] известно, что переходные процессы в линейных системах  $n$ -ого порядка, возникающие при внешнем воздействии, аппроксимируются ступенчатой функцией Хэвисайда, описываются суммой  $n$  экспонент. Отсюда следует вывод, что любую линейную систему можно представить в виде модели, содержащей некоторую совокупность простейших структурных элементов первого порядка.

В соответствии с изложенным, обработка накопленного массива данных [2] велась с целью получения корректных значений эквивалентных постоянных времени переходных процессов. Известная методика аппроксимации экспериментальных графиков исследуемых переходных процессов экспоненциальным полиномом [3] оказалась неэффективной, так как не позволяла отфильтровать сбойные и зашумленные результаты измерений, и, главное, вследствие близости переходного процесса к экспоненте, матрица коэффициентов нормальных уравнений близка к вырожденной, искаженной сбоями и шумами, а, следовательно, 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  $\Delta U_i$  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  $\Delta F_i$  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  $\Delta F_i = f(i)$  для калибровочного переходного процесса приведен на рис. 3.

Линейность графика экспоненциальной области переходного процесса свидетельствует о том, что в первом приближении калориметрический ПИП является линейной системой 1-ого порядка. Коэффициент неэквивалентности замещения для исследованного в эксперименте экземпляра ПИП равен 1,023 при доверительной вероятности 0,85. Оценка коэффициента неэквивалентности замещения совпадает со значением, полученным при непосредственных прямых измерениях энергетических характеристик лазерного излучения и замещающего его теплового воздействия электрического тока, с учетом коэффициента черноты ПИП.

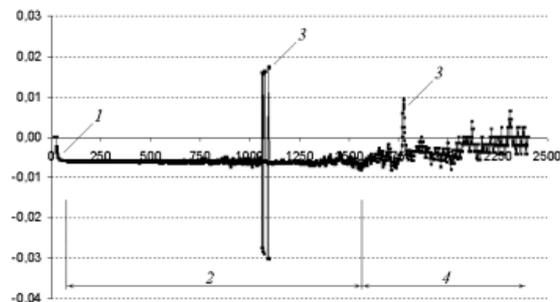


Рис. 3. Экспериментальная зависимость характеристик калибровочного переходного процесса от времени  
1 - начальная неэкспоненциальная область переходного процесса, 2 - экспоненциальная область переходного процесса, 3 - сбои измерительной аппаратуры, 4 - область доминирования шумов измерения

Полученные в эксперименте значения постоянных времени переходных процессов,

усредненные по всему массиву данных, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные значения постоянных времени переходных процессов

Постоянная времени переходного процесса, с			
Измерение		Калибровка	
Нагрев	Остыв	Нагрев	Остыв
178,73	182,78	167,76	190,66

## Выводы и рекомендации

Полученные экспериментальные результаты дают основание утверждать, что процесс измерения мощности лазерного излучения может быть описан неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка. Процесс калибровки изопериболического калориметра, вследствие завала вершины импульса, следует описывать неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка.

Для дальнейшего уменьшения неопределенности калибровки ПИП следует на основании полученных исходных данных построить более сложную модель, в которой необходимо учесть следующие 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;

- постоянные времени всех переходных процессов, измеренные в последовательных циклах, монотонно уменьшаются.

Усложнение структуры модели с учетом нелинейности тепловых характеристик конструкционных материалов требует для расчета температурного поля приемного элемента калориметра совместного применения нелинейного уравнения теплопроводности и одного из численных методов.

Необходимо отметить, что для упрощения модели калибровочного процесса изопериболического калориметра целесообразно устранить завал вершины калибровочного импульса путем изменения конструкции калориметра.

## Список литературы

- [1] М.Ф. Гарднер, Дж. Л. Бэрнс. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными параметрами. Москва-Ленинград, ГИТТЛ, 1949, 528 с.
- [2] К.И. Мунтян, Е.П. Тимофеев. Исследование погрешности замещения оптического сигнала электрическим при калибровке калориметрических преобразователей. *Світлотехніка та електроенергетика*, № 2(22), 2010, с. 4–11.
- [3] Я.С. Безикович. Приближенные вычисления. М.: Гостехиздат, 1949, 463 с.