

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический  
ИНСТИТУТ**



*имени  
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

15

Л. А. БОРИСЕНКО, А. В. КУЦЕНКО,

Ю. А. МИХАЙЛОВ, Л. А. НИКИТИНА,

А. С. ОРЕХОВ, Г. В. СКЛИЗКОВ, А. М. ЧЕКМАРЁВ

**ЭНЕРГОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС  
ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ “ПИКО” ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Москва 2014

# **Энергоизмерительный комплекс лазерной установки “ПИКО” для исследования взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом**

Л.А.Борисенко, А.В.Куценко, Ю.А.Михайлов, Л.А.Никитина, А.С.Орехов,  
Г.В.Склизков, А.М.Чекмарёв

## **Аннотация**

Рассмотрены требования в системе измерения энергии лазерной установки “ПИКО”, описан принцип построения калориметрической системы, базирующейся на предложенном методе построения многоканальной системы измерения энергии лазерного излучения с использованием тепловой инерционности калориметрических датчиков. Приведены результаты экспериментальных исследований временных характеристик калориметров и их динамической аналоговой памяти.

## **Energy-control System of Laser Installation “PICO” for Investigation of High Intensity Laser Radiation with Matter**

L.A.Borisenko, A.V.Koutsenko, Yu.A.Mikhailov, L.A.Nikitina, A.S.Orekhov,  
G.V.Sklizkov, A.M.Chekmarev

## **Abstract**

Requirements for energy-control system of laser installation “PICO” and principles of calorimeter system based on proposed method of laser radiation energy measurement based on thermal response time of calorimeter sensors are considered. Results of experimental investigations of temporal parameters and dynamic analog memory for calorimeters are presented.

## Введение

Многие важные вопросы взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом могут быть решены в экспериментальных исследованиях на установках с умеренной энергией в десятки и сотни джоулей. Это относится и к экспериментальным исследованиям по проблеме лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Следует отметить, что эксперименты на многопучковых лазерных установках [1,2] весьма сложны по технике и требуют огромных финансовых и материальных затрат, что делает их не всегда целесообразными. Поэтому, часто проводятся эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с тонкими фольгами, имитирующими многие важные процессы в оболочечных мишенях [3-11]. Примечательно, что подобные эксперименты можно проводить на установках с энергией излучения, существенно меньшей, чем требуется для сферического нагрева и сжатия. При этом могут успешно изучаться такие сложные и важные физические явления как поглощение и отражение лазерного излучения от оболочки-аблятора, имитируемого фольгой или комбинацией фольг различного состава и толщины, прогорание стенки мишени и развитие неустойчивостей, генерация в мишенях рентгеновского излучения, быстрых частиц и, наконец, процессы ускорения оболочки. Основным и весьма важным достоинством применения однопучковых систем является возможность целенаправленного контролируемого варьирования структуры излучения в зоне его взаимодействия с мишенью, в отличие от многопучковых установок, где энергетический профиль на поверхности мишени является результатом интерференции нескольких лучей и трудно поддается моделированию. Собственно, даже при идеальной геометрической компоновке лазерных пучков на мишени это когерентное их сложение и приводит к возникновению мелкомасштабных всплесков освещенности, способных вызвать катастрофическое развитие гидродинамических неустойчивостей в мишени, разрушающих процесс сжатия плазмы. Облучение фольги одним пучком с управляемой и контролируемой структурой позволяет исследовать влияние неоднородностей при облучении на нагрев и ускорение фольги, моделировать процессы развития неустойчивостей в плазме, а также изучать способы подавления этих неустойчивостей за счет изменения не только пространственной структуры облучения, но и временного профиля импульсов или конструкции мишени а также степени когерентности лазерного излучения.

В лаборатории Лазерной плазмы Физического Института им. П.Н.Лебедева РАН на установке "ПИКО" на протяжении ряда лет ведутся исследования по нагреву и ускорению тонких фольг с помощью мощных лазерных импульсов [5-6] и генерации высокоэнергетичных электронов в лазерной плазме [4,9,10]. Был проведен цикл экспериментальных и теоретических исследований по симметризации процесса нагрева и ускорения мишеней при помощи вспомогательного лазерного предимпульса с оптимальной

энергией и временем упреждения основного греющего мишень лазерного излучения [7,8,11]. В подобных, да и многих других, исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом решающую роль для корректной интерпретации результатов и построения адекватных моделей физических процессов играют высокоточные измерения энергии лазерного излучения как в тракте формирования и усиления лазерного импульса так и в области взаимодействия излучения с плазмой (веществом) [12].

В настоящей работе рассматриваются основные особенности формирования лазерного излучения на установке «ПИКО» и система измерения энергетических характеристик лазерного излучения.

## 1. Лазерная установка «ПИКО»

Установка «ПИКО» содержит пикосекундный лазер на фосфатном неодимовом стекле (выходная апертура  $D=45$  мм, энергия – до 0,5 Дж при длительности импульса 5 пс), наносекундный лазер на силикатном стекле ( $D=45$  мм, энергия – до 50 Дж при длительности импульса 2 нс) и вакуумную мишенную камеру с измерительным комплексом для диагностики плазмы. Каждый лазер состоит из задающего генератора, системы вырезания и нескольких каскадов усиления с апертурой пучка от  $D=10$  мм до  $D=45$  мм. Энергия светового пучка последовательно возрастает в диапазоне от 0,1 мДж до 0,5 Дж в пикосекундном лазере и от 10 мДж до 50 Дж в наносекундном лазере.

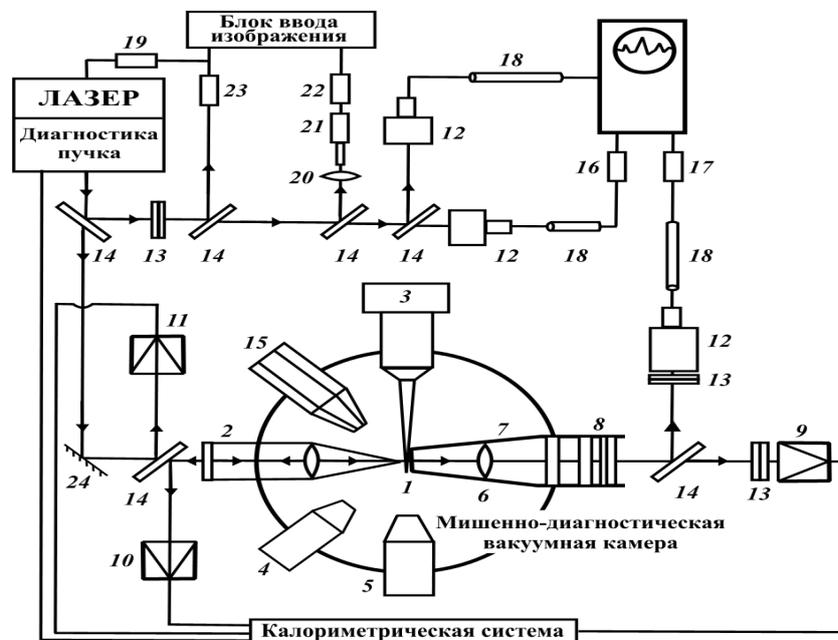
Контроль структуры фокусируемого на мишень излучения в дальней и ближней зонах осуществляется автоматизированной системой телеметрических измерений. Схема измерений показана на рис. 1. Диагностика структуры пучка осуществляется непосредственно перед вводом в мишенную камеру. Измерения в дальней зоне производятся камерой 22 типа CCD-4M на основе ПЗС-матрицы, а в ближней зоне – камерой 23 с видеоконсом ЛИ 427, имеющим память 5 мин.

Активной средой лазера является стекло ГЛС-1, активированное ионами неодима  $Nd^{3+}$ . Лазерное излучение формируется в генераторе, работающем в режиме модуляции добротности. Длина волны излучения  $\lambda=1,06$  мкм. Длительность импульса непосредственно на выходе генератора составляет 30 нс, ширина спектра излучения  $\delta\lambda = 30$  Å, полная энергия в импульсе составляет порядка 0.1 Дж. Далее лазерное излучение проходит несколько каскадов усилителей ГУС. После первого каскада усиления стоит электрооптический затвор Поккельса, формирующий длительность импульса на полувысоте порядка 2 нс. Полная энергия в импульсе на выходе последнего усилителя регулируется и составляет 1-50 Дж.

Полученное излучение фокусируется в мишенной камере с помощью асферической линзы, имеющей фокусное расстояние  $f = 12$  см, что позволяет получать плотность потока на поверхности мишени от  $10^{13}$  до  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Расходимость излучения составляет  $2\alpha = (5-8) \cdot 10^{-4}$  рад, энергетическая контрастность  $K_E = 10^4-10^5$ .

Вид оптического зала установки «ПИКО» представлен на Рис.2. Принципиальная оптическая схема наносекундного лазера установки «Пико» представлена на Рис.3. Основной частью установки «ПИКО» является мощный неодимовый лазер, построенный по схеме последовательного усиления наносекундного импульса, сформированного задающим генератором [2]. Размеры активного элемента генератора составляют  $\varnothing 12 \times 300$  мм.

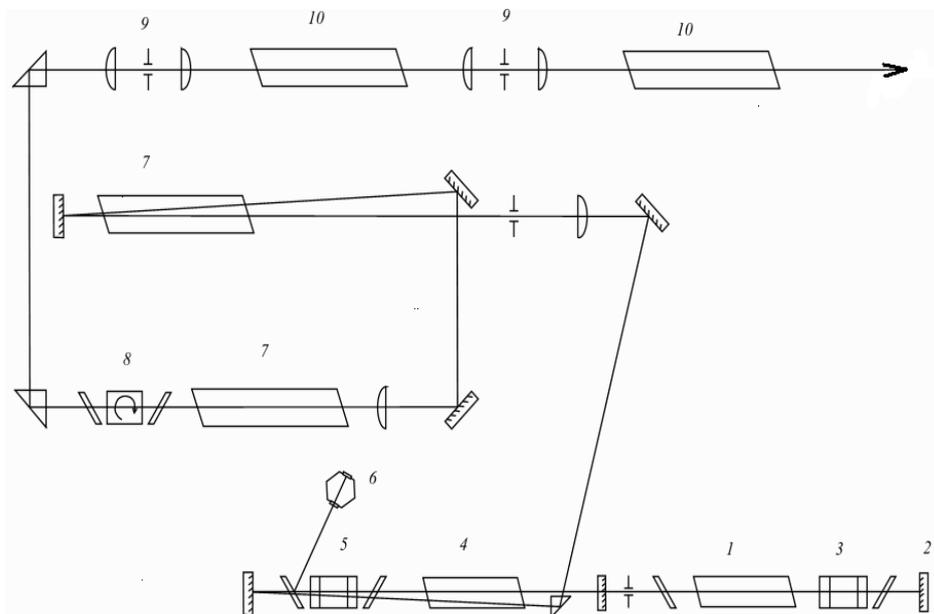
.Резонатор Фабри-Перо 2 построен на двух плоскопараллельных зеркалах с интерференционным покрытием: глухое (100%) заднее и 30%-ное выходное, имеющих максимум отражения на длине волны излучения. База резонатора  $L=1,5$  м. Модулятор добротности 3 состоит из двух скрещенных поляризаторов и ячейки Поккельса. Поляризаторы представляют собой две плоскопараллельные пластины с интерференционным покрытием, повернутые на определенный угол к оси лазерного пучка.



**Рис.1.** Схема экспериментальной установки «ПИКО». 1-мишень; 2-фокусирующая система; 3-устройство для позиционирования мишени; 4,5-система контроля положения мишени в фокусе; 6,7,8-система транспортировки прошедшего через мишень излучения; 9,10,11-калориметры; 12-коаксиальные фотоэлементы для контроля временной структуры лазерного излучения; 13-светофильтры; 14-светоделительные пластины; 15-многоканальный рентгеновский микроскоп; 16,17-высокочастотные аттенюаторы; 18-коаксиальные линии задержки для синхронизации сигналов с фотоэлементов; 19-блок синхронизации кадра оптического изображения; 20-объектив, формирующий изображение в дальней зоне; 21-микроскоп; 22,23-видеокамеры; 24 - 100% зеркало.



**Рис.2.** Лазер установки “ПИКО”.



**Рис.3.** Оптическая схема лазерной установки “ПИКО” (наносекундный лазер).  
1–активный элемент задающего генератора, 2 – 100% зеркало резонатора Фабри-

Перо, 3–модулятор добротности, 4–оптический усилитель ГУС, 5–“вырезающий” затвор Поккельса, 6–разрядник с лазерным поджигом, 7–линейные каскады усиления ГОС-1001, 8–вращатель Фарадея, 9–вакуумные пространственные фильтры, 10–выходные каскады усиления ГОС-1001

В ячейке Поккельса, работающей на продольном электрооптическом эффекте, используется кристалл KDP с полуволновым напряжением  $U_{\lambda/2} \approx 18$  кВ. Характерной особенностью этого затвора является использование заряженной коаксиальной линии, что позволяет снизить напряжение на контактах и повысить надежность работы затвора.

Чтобы уменьшить пространственно-модовый состав лазерного излучения на выходе генератора установлена диафрагма. диаметр которой определяется экспериментально и составляет 3 мм. Критерием служит максимум выходной энергии при минимальном числе поперечных мод. Длительность лазерного импульса на выходе генератора составляет 30 нс. Далее лазерное излучение проходит несколько каскадов стержневых оптических усилителей.

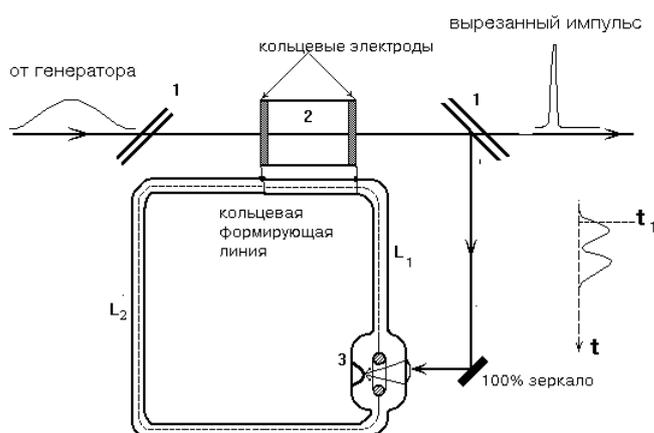
Размеры стержня первого усилителя 4 составляют  $\varnothing 20 \times 300$  мм. Отметим, что сразу после генератора мощность излучения еще невелика, поэтому, чтобы повысить эффективность съема инверсной населенности в активной среде, используется двухпроходная схема лазерного усилителя. Энергия накачки 10 кДж.

После первого усиления для получения короткого лазерного импульса стоит электрооптический затвор Поккельса 5 с лазерным поджигом 6, работающий по схеме «вырезания» [2,13]. Основной особенностью данной схемы (Рис.4) является то, что затвор включается в разрыв экрана коаксиального кабеля и изолирован от статического зарядного напряжения, что позволяет снизить вероятность пробоев. В качестве поляризаторов использовались интерференционная пластина и стопа Столетова. Включение затвора в разрыв внешне замкнутой кольцевой коаксиальной линии позволяет при замыкании её на землю в точке, смещённой на величину  $L$  ( $L/c$  - длительность вырезанного импульса) от её середины получить управляющий импульс с амплитудой в два раза превышающий статическое зарядное напряжение  $U_0$ . Эта схема позволяет при  $U_0 \gg U_{\lambda/2}$  избежать образования паразитных световых импульсов без дополнительного затвора.

Принцип работы системы формирования заключается в следующем. За счёт того, что модулируемое и вырезанное излучение имеют разную поляризацию, часть излучения направляется в разрядник с лазерным поджигом. Лазерный луч фокусируется в промежуток между катодом и анодом линзой с фокусным расстоянием 10 мм. Electroды разрядника выполнены из нержавеющей стали в виде шаров диаметром 5 мм и тщательно отполированы. Использование высоких давлений в камере разрядника позволяет существенно уменьшить рабочий зазор между электродами и, как следствие, получить

короткие длительности фронтов формируемых электрических импульсов и малую величину задержки. В лазере установки “ПИКО” зазор составляет  $D=0,5$  мм при давлении  $P=13$  атм. азота и рабочем напряжении  $U_0=13$  кВ. В начальный момент электроды затвора находятся под одним потенциалом и затвор закрыт.

В момент прихода светового импульса на разрядник происходит пробой разрядного промежутка, и по кабелям  $L_1$  и  $L_2$  распространяются волны нулевого потенциала и затвор открывается. Длина кабеля выбирается с таким расчётом, чтобы момент прихода волны на первый электрод затвора соответствовал максимуму интенсивности излучения задающего генератора.



**Рис.4.** 1 - поляризаторы, 2 – кристалл ДКДП, 3 – разрядник

Когда напряжение на затворе достигнет  $U_{\lambda/2}$ , на второй электрод приходит вторая нулевая волна напряжения. В результате, разность потенциалов между электродами становится равной нулю, и затвор закрывается. Длительность формируемого лазерного импульса определяется разностью длин кабелей  $L_1$  и  $L_2$  кольцевой формирующей линии. Длины  $L_1$  и  $L_2$  должны быть намного больше длительности формируемого импульса, что исключает последующие “паразитные” импульсы излучения. Данная система позволяет сформировать импульсы излучения длительностью до 1 нс. Максимум энергии выходящего излучения получался путём варьирования типа ослабляющих фильтров на входном окне разрядника и, следовательно, момента пробоя. Часть излучения, идущего на разрядник, отщеплялось на ФЭК и регистрировалось на скоростном запоминающем осциллографе Tektronics. Таким образом, нахождение «провала» в середине исходного импульса (на Рис.4 справа) означало, что в вырезанном импульсе содержится максимум возможной энергии.

После повторного усиления в первом оптическом усилителе 4 уже вырезанного импульса лазерное излучение после поворотной призмы и интерференционного зеркала проходит пространственный фильтр, состоящий из

линзы с фокусным расстоянием  $f=1$  м и диафрагмы диаметром  $\varnothing 1,1$  мм. Последующее усиление лазерного импульса происходит в линейных каскадах усиления (ЛКУ) 7. Причем, первый из осветителей для повышения эффективности съема инверсии в неодимовом стекле работает по двухпроходной схеме.

В экспериментах по фокусировке излучения мощных лазеров на мишень возникает задача по оптической развязке системы мишень-лазер, блокирующей оптический тракт установки от отраженного мишенью излучения, которое может привести к самовозбуждению установки и вызвать после усиления в лазере повреждения элементов схемы. Поэтому после ЛКУ на установке «ПИКО» стоит вращатель Фарадея 8. В качестве поляризаторов используются плоскопараллельные пластины, установленные под углом Брюстера к оптической оси пучка и повернутые друг относительно друга на угол  $45^\circ$ . В вентиле используется пластина из магнитооптического стекла МОС-101 с размерами  $45 \times 45 \times 15$  мм и постоянной Верде  $V=0,036$  мин/А, емкостной накопитель емкостью  $2 \times 300$  мкФ, катушки Гельмгольца со средним диаметром 60 мм и медной шиной шириной 15 мм по 20 витков в каждой. При этом угол поворота плоскости поляризации на  $45$  градусов достигается тогда, когда рабочее напряжение составляет  $U_m=3,6$  кВ. Исследования показали, что неравномерность пропускания по всей апертуре пучка не более  $0,5\%$ . Длительность импульса тока через обмотки катушек по полувисоте составляет  $\sim 400$  мкс, что примерно соответствует импульсу накачки активных элементов лазера. Это позволяет запускать затвор синхронизованно с лазером. Коэффициент развязки составил 70 дБ, а коэффициент пропускания  $80\%$ .

Последними в схеме установки стоят пространственные фильтры 9 и выходные каскады усиления (ВКУ) 10. Пространственные фильтры представляют собой систему из двух софокусных линз с фокусным расстоянием  $F=0,7$  м и диафрагмы диаметром  $\varnothing 0,7$  мм, помещенную в корпус из нержавеющей стали. Для обеспечения необходимой точности юстировки диафрагмы могли перемещаться на подвесах с помощью микрометрических винтов. Во избежание электрического пробоя в воздухе при фокусировке лазерного излучения фильтры откачиваются форвакуумным насосом до давления  $P=5 \cdot 10^{-3}$  Торр. Усилительные каскады лазера, как ЛКУ, так и ВКУ, состоят из осветителей ГОС-1001 со стержневыми активными элементами  $\varnothing 45 \times 680$  мм. Энергия накачки каждого осветителя 20 кДж. Торцы неодимовых стержней всех активных элементов установки были срезаны под углом  $5^\circ$  для предотвращения отражения от них лазерного излучения в оптический тракт лазера и самовозбуждения осветителей. Юстировка оптического тракта лазерной установки «ПИКО» осуществляется работающем в непрерывном режиме  $Nd^{3+}$ :YAG-лазером, имеющем длину волны излучения  $\lambda=1,054$  мкм, т.е. близкую к длине волны рабочего лазера. Близость частоты излучения обоих лазеров необходима для более точного совмещения оптических трактов юстировочного

и рабочего пучков. Юстировочный пучок наблюдается при помощи электронно-оптического преобразователя.

На Рис.5. приведена осциллограмма, иллюстрирующая характерную структуру лазерного излучения наносекундного лазера установки «ПИКО».

## 2. Требования к энергоизмерительному комплексу лазерной установки

При проведении экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом возникает необходимость измерения энергии как в самом лазере (генератор, система формирования импульса, усилители) так и в точках, расположенных в области мишенно-диагностической камеры и внутри нее. В настоящей работе описывается многоканальная система измерения энергии лазерного излучения, созданная и используемая в экспериментах с лазерной плазмой на установке «ПИКО».

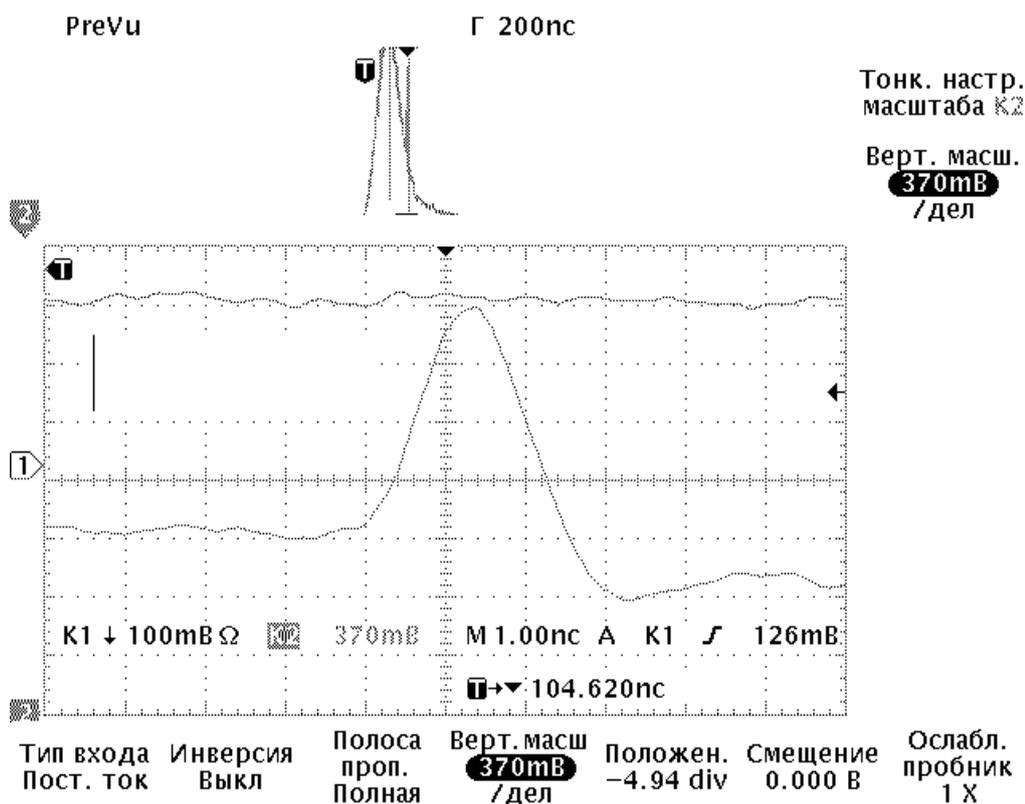


Рис.5. Осциллограмма импульса лазерного излучения.

Для контроля за работой лазеров необходимо измерение энергии в 8-10 точках оптического тракта и в каждом из двух каналов и, кроме того, в 4-5

точках для определения параметров выходного лазерного пучка (расходимости, контраста, фокусируемой энергии) перед вводом его в камеру. Для диагностики взаимодействия лазерного излучения с плазмой число калориметров снаружи камеры может достигать 10-15, а измеряемая энергия при этом может варьироваться от 1 мДж до 50 Дж, в апертуре 45 мм.

Для прецизионных измерений энергетического баланса в зоне взаимодействия лазерного излучения с плазмы требуется до 20 калориметров, которые устанавливаются непосредственно в камере и имеют различную ориентацию по отношению к мишени. Измеряемая здесь энергия может лежать в диапазоне от 0,1 мДж до 10 Дж.

Таким образом, для обеспечения работы на установке необходимо в каждом «выстреле» измерять энергию лазерных пучков в 30-60 точках в диапазоне энергий от 0,1 мДж до 50 Дж. Установка «ПИКО» работает в режиме одиночных импульсов. Минимальное время между ее выстрелами определяется остыванием активных элементов и составляет 15-20 минут. Оборудование установки рассредоточено на довольно больших площадях, что налагает требования удаленности детекторов излучения от измерительной аппаратуры на расстояние до 50 м. Вышеуказанные характеристики установки явились исходными при определении требований к системе измерения энергии и ее разработке.

### **3. Метод построения многоканальной системы измерения энергии лазерного излучения с использованием тепловой инерционности калориметрических датчиков.**

Для лазерных систем работающих в режиме одиночных импульсов, полная энергия одиночного импульса излучения описывается выражением:

$$W_{\varrho} = \int_0^{\tau_{\varrho}} P(t) dt ; \quad (1)$$

где  $\tau_{\varrho}$  - полная длительность импульса,  $P(t)$  - мгновенная мощность излучения. Задача практического измерения энергии такого импульса заключается в преобразовании мгновенной мощности  $P(t)$  в ток, интегрировании этого тока, в результате чего получается импульс напряжения, максимальное значение которого пропорционально  $W_{\varrho}$ , и запоминании пикового значения импульса напряжения с целью его дальнейшего измерения.

Для выполнения этих операций отдельный измерительный канал обычно содержит детектор излучения, интегратор тока, усилитель, схему аналоговой памяти и соответствующий ей измерительный прибор. Многоканальные системы создаются тиражированием отдельных каналов, которые поочередно опрашиваются измерительным прибором.

При построении измерительных каналов разными авторами в качестве аналоговой памяти используются схемы на конденсаторах, схемы пикового

детектора с фиксацией, схемы выборки и хранения. В некоторых случаях каждый измерительный канал содержит свой преобразователь аналогокод и цифровую память.

При таком построении каждый измерительный канал содержит несколько корпусов микросхем и более десятка навесных деталей, что делает его неэкономичным, труднозащищаемым от высокочастотных электрических помех и поэтому малоподходящим для многоканальных систем, использующихся на импульсных лазерных установках.

Описанные в литературе системы и устройства зачастую являются универсальными, т.е. предназначенными для работы с различными типами лазеров (непрерывного действия, частотными с достаточно высокой частотой повторения, лазерами одиночных импульсов).

Если задачу ограничить только измерениями на лазерах, работающих в режиме одиночных импульсов, то для этого конкретного случая построение многоканальных систем измерения энергии можно значительно упростить и улучшить. Такая возможность появляется благодаря тому, что в этом режиме время между "выстрелами" лазера составляет обычно десятки минут и более. Такого времени заведомо достаточно, чтобы применять в качестве детекторов излучения тепловые приемники с большой инерционностью, использовать для измерений и управления медленную и недорогую электронику, повышать точность, разрешающую способность и помехоустойчивость проектируемых измерительных устройств используя при этом возможность понижения их быстродействия. Кроме того, в таких условиях предоставляются широкие возможности программного воздействия на измерительную систему в реальном масштабе времени.

Суть метода состоит в использовании свойств тепловой инерционности калориметрических датчиков для промежуточного хранения зарегистрированного сигнала, что позволяет осуществлять поочередную поканальную выборку и измерение одним общим высокочувствительным АЦП без применения в каждом из каналов усилителя и схемы выборки и хранения.

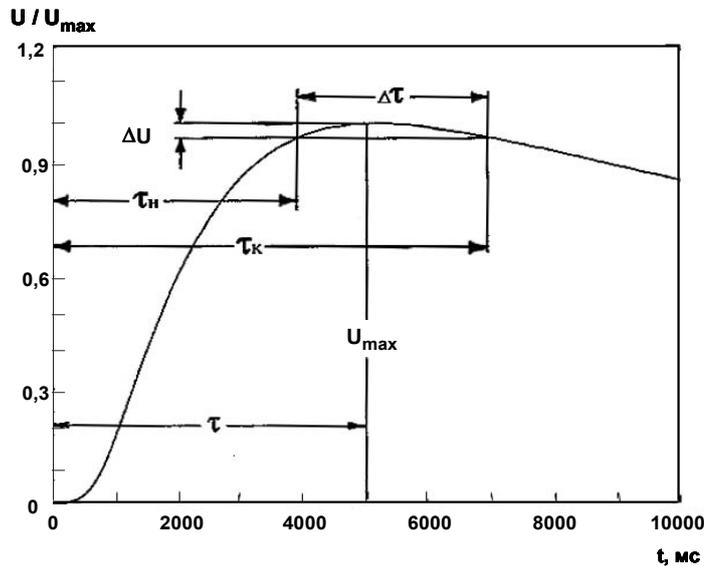
Реализация метода поясняется с помощью Рис.6. На этом рисунке представлена функция отклика калориметра, т.е. форма сигнала на выходе калориметра, полученная в результате регистрации им одиночного импульса лазерного излучения. (В качестве кривых, иллюстрирующих предлагаемый метод, используются (на рис.6 и далее на рис.7) реальные функции отклика калориметров, разработанных в ОКБ ФИАН и применяемых на установке "ПИКО" (ВЧД-2, ВЧД-3, ВЧД-5, ВКДС и КДС) [14-15].

При этом измеряемая энергия лазерного импульса равна:

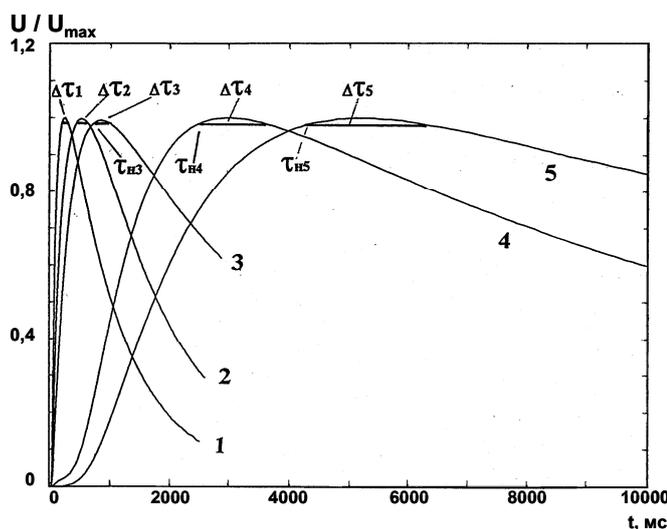
$$W_{\dot{e}} = U_{\max} / S ; \quad (2),$$

где:  $U_{\max}$  - величина сигнала в момент максимума, а  $S$  - чувствительность калориметра.

Очевидно, что для определения энергии  $W_e$  необходимо измерить  $U_{\max}$ , т.е. напряжение в момент времени  $\tau$ . Однако, как видно из рисунка это измерение можно выполнять и в другой момент времени, в некотором диапазоне  $\Delta\tau$ , если считать допустимой ошибкой измерений  $\Delta U$ .



**Рис.6.** Функция отклика калориметра на одиночный лазерный импульс и характеристики его аналоговой памяти:  $\tau$  – время выхода сигнала на максимум;  $\Delta\tau$  – время хранения сигнала;  $\Delta U$  – максимальная ошибка хранения;  $\tau_n, \tau_k$  – начало и конец хранения.



**Рис.7.** Функции отклика для разных типов калориметров.

Другими словами калориметр "помнит" измеренную им энергию в течение некоторого интервала времени  $\Delta\tau$  («время хранения»), продолжительность которого определяется типом калориметра и заданной точностью запоминания. Заметим, что ошибки  $\Delta U$  уменьшаются по мере приближения к максимуму, являются систематическими и могут быть скомпенсированы путем программного введения поправок.

Из вышесказанного следует, что калориметрический датчик можно рассматривать как детектор энергии излучения одиночных лазерных импульсов, обладающий на своем выходе динамической аналоговой памятью.

Время хранения сигнала этой памятью  $\Delta\tau$ , его начало  $\tau_n$  и конец  $\tau_k$ , при допуске ошибки хранения  $\Delta U$ , можно определить из функции отклика калориметра на одиночный импульс излучения (см. Рис.6). Функция отклика представляет собой временную зависимость напряжения сигнала на выходе калориметра полученную в результате регистрации им одиночного импульса лазерного излучения. Как видно из рисунка эта функция содержит в графическом виде полную информацию о всех временных характеристиках, а количественное определение их для конкретного калориметра сводится к точному измерению координат с помощью графического пакета.

Для построения  $n$  - канальной системы с использованием указанной памяти необходимо и достаточно иметь  $n$  калориметров данного типа, один измеритель напряжения, обладающий временем измерения  $t_u \ll \Delta\tau$ , и соответствующий мультиплексор для поочередного подключения калориметров при измерениях.

Опрос калориметров начинается спустя  $\tau_n$  после лазерного импульса (Рис.7). Первый калориметр подключается в момент времени  $\tau_n$ , второй -  $\tau_n + t_u$ , третий -  $\tau_n + 2t_u$  и т.д. до  $\tau_n + (n-1)t_u$ . Максимальное число опрашиваемых калориметров данного типа с временем хранения  $\Delta\tau_1$ , объединенных в группу, (группа 1) составляет:

$$n_1 = \frac{\Delta\tau_1}{t_u}; \quad (3)$$

Число измерительных каналов может быть увеличено путем подключения второй группы калориметров. Калориметры этой, второй, группы должны иметь другое время выхода сигнала на максимум  $\tau_2$  с тем, чтобы их "время хранения" не перекрывалось с аналогичным временем первой группы  $\Delta\tau_1$ . При соблюдении этих условий вторая группа калориметров может опрашиваться тем же АЦП, после того как он освободится от опроса 1-й группы. Этот путь можно продолжить, вводя 3-ю, 4-ю и т.д. группы. Общее число каналов при этом будет составлять:

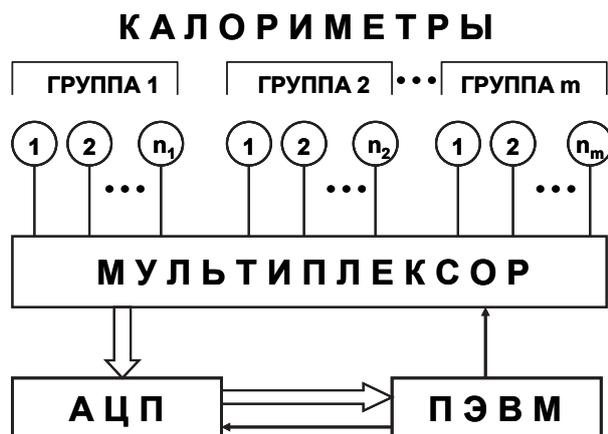
$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_m; \quad (4)$$

где  $m$  - число групп однотипных калориметров, а  $n_1, n_2, \dots, n_m$  - число измерительных каналов в группах 1, 2, ...  $m$ .

Таким образом, за счет введения дополнительных групп калориметров с различной инерционностью можно существенно увеличить число измерительных каналов, при одном опрашивающем АЦП.

Возможность организации групп однотипных калориметров и их поочередного опроса одним АЦП показана на Рис.7. На этом рисунке представлены функции отклика пяти типов калориметров (1, 2, ... 5), имеющих времена хранения  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_5$  и соответствующие им времена начала хранения  $\tau_{н1}, \tau_{н2}, \dots, \tau_{н5}$ . Путем детального анализа функций отклика вблизи максимума можно определить количественные значения этих характеристик, которые вместе с чувствительностью калориметров  $S$  являются исходными при выработке требований к АЦП и выборе его типа.

Блок-схема гипотетической многоканальной системы, которая может быть построена по методу использования памяти калориметров, представлена на Рис.8. Она состоит из  $m$  групп калориметров, мультиплексора и АЦП, управляемых от персонального компьютера. Максимально-возможное число групп  $m$  в принципе ничем не ограничено при наличии калориметров с соответствующими  $\tau$ , однако практически достаточно иметь 4 - 5 групп, чтобы обеспечить более 100 каналов при довольно низкой ( $t_u = 40\text{мс}$ ) скорости опроса.



**Рис.8.** Блок-схема многоканальной калориметрической системы, построенной по методу использования динамической аналоговой памяти калориметров.

Каждая группа объединяет  $n_i$  однотипных калориметров ( $i$  - номер группы), имеющих одинаковые, в пределах группы, характеристики памяти:  $\Delta\tau, \tau_{н}, \tau_{к}$ . При этом максимально-возможное число измерительных каналов в отдельных группах составляет:

$$N_i = \Delta\tau_i / t_i ; \quad (5) \quad \text{и}$$

определяется временем жизни динамической памяти  $\Delta\tau_i$  данной группы и

быстродействием АЦП, точнее, временем измерения  $t_u$  необходимым для оцифровки сигнала аналого-цифровым преобразователем.

Максимально-возможное число измерительных каналов всей системы составляет:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_m; \quad (6)$$

где  $N_1, N_2 \dots N_m$  – максимально-возможные числа измерительных каналов в группах.

Таким образом, предложенный метод позволяет построить многоканальную систему, каждый измерительный канал которой выполняет все функции традиционно применяемого канала, но выгодно отличается простотой реализации, поскольку содержит лишь один калориметрический датчик собственно и выполняющий эти функции.

#### 4. Экспериментальные исследования временных характеристик калориметров.

Для реализации вышеописанного метода и оценки его возможностей были проведены экспериментальные исследования временных характеристик всех типов калориметров, находящихся в работе на установке “ПИКО”.

Определение временных характеристик ( $\tau$ ,  $\Delta\tau$ ,  $\tau_n$  и  $\tau_k$ ) приведено в предыдущем разделе. В этом разделе рассматривается методика измерения указанных характеристик, их анализ и использование в процессе проектирования, наладки и эксплуатации описываемой системы измерения энергии.

##### а). Измерение функции отклика калориметров.

Схема измерения функций отклика показана на Рис.9. Она построена на основе стандартных модулей КАМАК, управляемых от компьютера IBM PC/XT и состоит по существу из усилителя ФК-4807 и аналого-цифрового преобразователя 701А.



Рис.9. Схема измерения функции отклика калориметров.

Остальные модули (см. Рис.9) являются вспомогательными и выполняют следующие функции:

- Модуль управления, в момент времени задаваемый программой, замыкает посредством механического реле контакты фотовспышки, обеспечивая тем самым импульс света.

- Генератор тактовых импульсов 7019 (HARWELL) используется в качестве часов при задании и измерении временных интервалов. Он имеет кварцевую стабилизацию частоты и обеспечивает на семи независимых выходах частоту импульсов 1, 10, 100 Гц, 1, 10, 100 КГц и 1 МГц.

- Счетчик 401 (POLON) содержит четыре счетчика емкостью 16 разрядов с максимальной рабочей частотой 15 МГц. Счетчик может программно открываться и закрываться, передавать содержимое регистров в компьютер, как при остановке, так и в процессе счета импульсов. При измерении функции отклика на вход счетчика подаются тактовые импульсы от генератора 7019 с частотой 1кГц. Счетчик открывается перед командой “Вспышка” и закрывается после окончания измерения функции. Перед началом измерения очередной точки функции, компьютер считывает содержимое счетчика 401 (время в мс) и записывает его в соответствующий программный буфер (Буфер 2, “Время”). Синхронно с этим в Буфер 6 (“Сигнал”) заносится результат измерения уровня сигнала измеренного в данный момент посредством АЦП 701А.

- Регистр предварительной установки 7039 (HARWEL) используется для задания временных интервалов между измерениями. На его вход от генератора 7019 непрерывно подаются тактовые импульсы с частотой 10кГц. Практически одновременно с началом отсчета времени измерений, на 7039 поступает команда его предварительной установки (del-40), задающая выдержку и открывающая его вход для поступления тактовых импульсов. При заполнении счетчика до заданного уровня (выдержки) на его выходе появляется сигнал (LAM), которого уже ожидает компьютер, закончивший цикл измерений. Обнаружив этот сигнал, компьютер переходит к следующему циклу измерений. Регистр 7039 является многофункциональным универсальным устройством, однако для целей данного приложения он управляется двумя командами (инициализация модуля, установка выдержки и запуск), оформленные нами в виде отдельных функций, вызываемых командой (Call).

При измерении функций отклика калориметров в качестве источника световых импульсов в целях экономии ресурсов лазера использовалась стандартная фотовспышка “Электроника ФЕ-15У”.

Для оценки корректности замены лазерного импульса излучения импульсом от фотовспышки были получены функции отклика при регистрации лазерного импульса и импульса от вспышки. Сравнение этих функций в разных временных точках показало полную их идентичность в пределах точности измерений.

Описанная схема работает под управлением программы Digifil, листинги которой приведены в Приложении. Программа написана на языке Си (digifil.c) с

включением в нее вызываемого модуля (digi\_fst.asm), написанного на языке ассемблера. На ассемблере написано управление аппаратурой, на Си - организация вывода данных и их представление.

Результат измерения функции отклика (100 точек) представляется в виде двух матриц (10x10). Первая матрица содержит данные измеренного сигнала, вторая - времена моментов измерения. Этот результат оперативно отображается на экране монитора, выводится на принтер, и запоминается в архивном файле. Для анализа и обработки функций отклика графическим пакетом WEPLLOT эти же данные записываются на отдельную дискету в виде файла в коде ASCII, содержащего две колонки (время и сигнал).

### **б). Функции отклика калориметров ВЧД-2, ВЧД-3, ВЧД-5, ВКДС и КДС.**

Исследования временных характеристик проводились для калориметров типа ВЧД-2, ВЧД-3, ВЧД-5, ВКДС, и КДС. Для нескольких конкретных экземпляров каждого типа калориметра были получены функции отклика, анализ которых позволяет определить характеристики динамической памяти (время хранения сигнала, его начало и конец) для задаваемой точности измерений. Анализ функций выполнялся графическим программным пакетом WEPLLOT, который обеспечивал определение координат с точностью 0.001 % от номинала шкалы.

Были померены и обработаны функции отклика около 50-ти калориметров 5-ти различных типов. Некоторые фрагменты результатов такой обработки представлены на Рис.10-14.

На Рис.10 показано семейство функций отклика калориметров КДС, их заводские номера, точки выхода сигнала на максимум (1,2,3,4,5), приводится величина времени выхода сигнала на максимум ( $t$ ). Время  $t$  измерялось и указано на рисунке с точностью до шестого знака, однако, в практических расчетах здесь и далее было достаточно использовать четыре знака.

Обработка функций отклика, представленных на Рис.10, позволила сделать следующие выводы:

1. Функции отклика конкретных экземпляров номинально идентичных калориметров КДС имеют значительные различия.

2. Время выхода сигнала на максимум находится в диапазоне (3.409-5.093)с., среднее время выхода сигнала на максимум равно 4.25с.

3. Максимальный разброс времени  $\tau$  для разных калориметров равен 1684мс, что составляет 39.6%.

На Рис.14 представлены функции отклика калориметров ВКДС. Из этого рисунка следует, что относительный разброс  $\tau$  для этого типа меньше, чем для КДС и составляет 13.9% против 39.6%. Время выхода сигнала на максимум  $\tau$  находится в диапазоне (2,5-2,9), среднее время составляет 2,7 с. Максимальный разброс  $\tau$  равен  $\Delta\tau = 379$  мс.

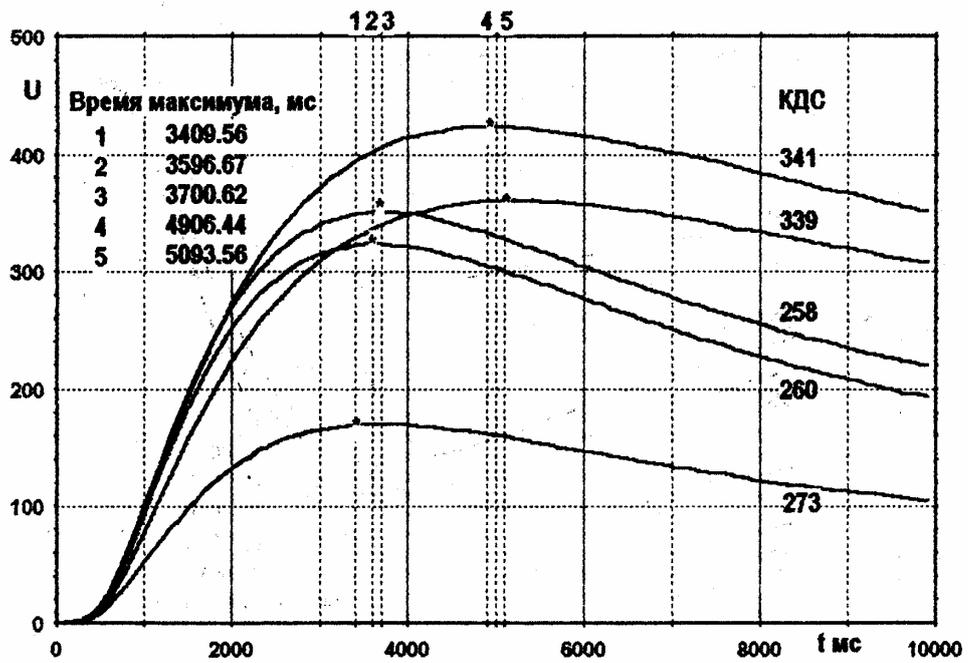


Рис.10. Функция отклика калориметров типа КДС.

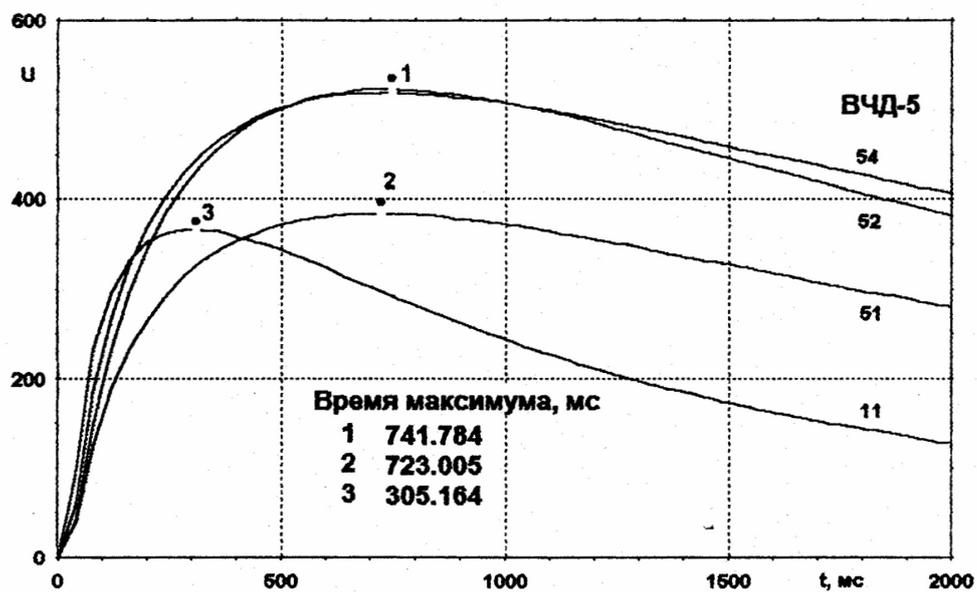


Рис.11. Функция отклика калориметров типа ВЧД-5

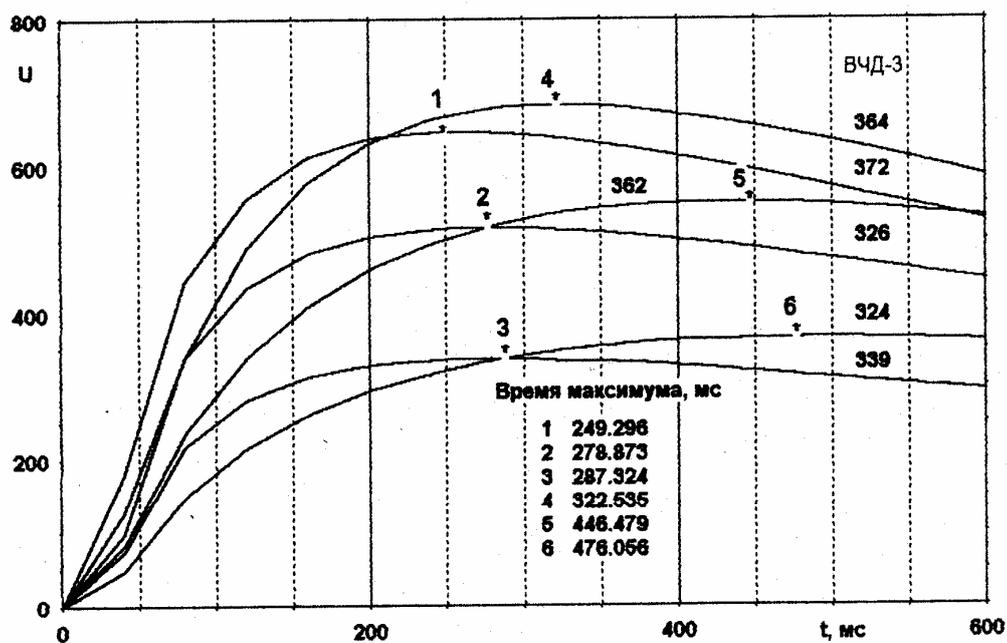


Рис.12. Функция отклика калориметров типа ВЧД-3.

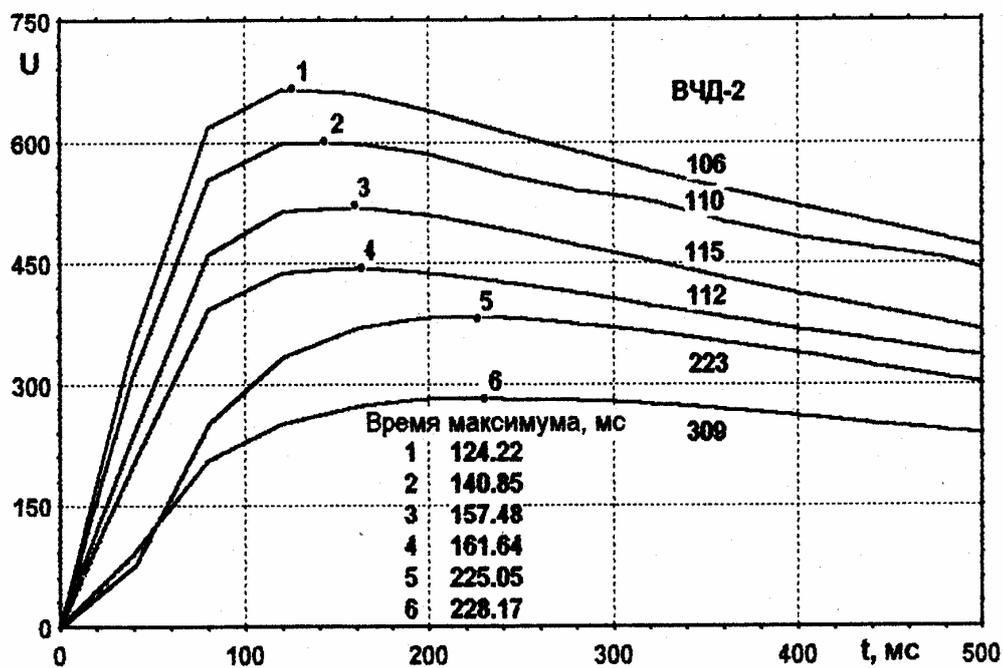
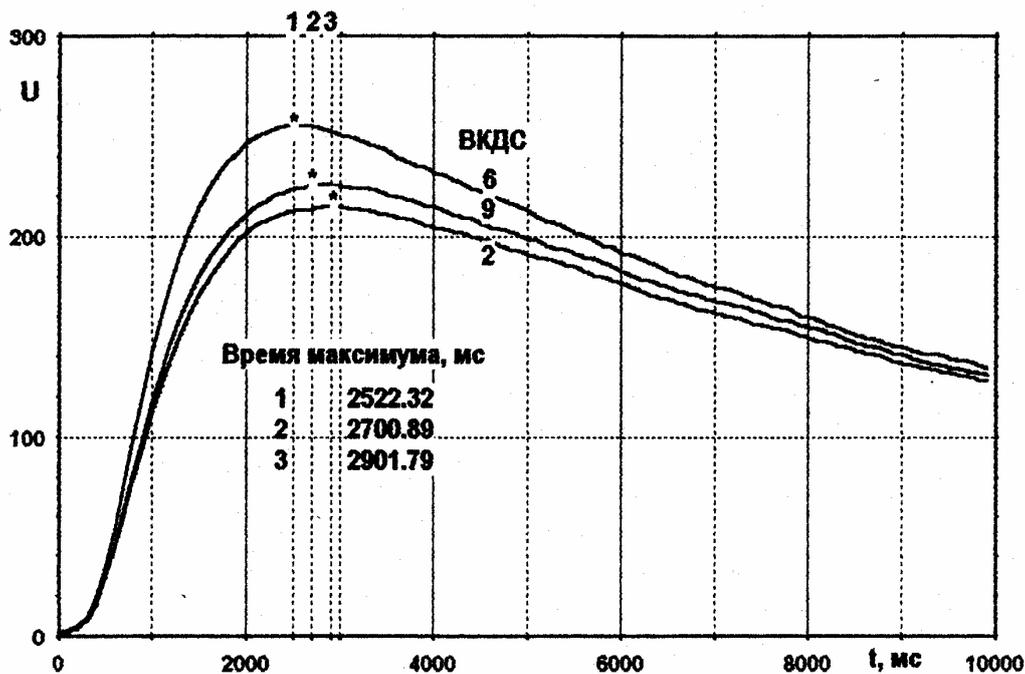


Рис.13. Функция отклика калориметров типа ВЧД-2.



**Рис.14.** Функция отклика калориметров типа ВКДС.

Калориметры типа ВЧД-5 (Рис.11) отличаются следующими характеристиками: диапазон  $\tau$  составляет 305,2-741,7 мс, среднее значение 523,5 мс, абсолютный разброс  $\tau$  составляет 436,5 мс, относительный разброс – 83%. Для калориметров типа ВЧД-3 (Рис.12) подобные характеристики выглядят следующим образом: диапазон  $\tau$  – 249,3-476,1 мс, среднее значение – 362,7 мс, абсолютный разброс  $\tau$  – 226,8 мс, относительный разброс – 62%. Для калориметров ВЧД-2 (Рис.13): диапазон – 124,2-228,2 мс, среднее значение – 176,2 мс, абсолютный разброс  $\tau$  – 104 мс, относительный разброс – 59%.

#### **в). Методика определения характеристик динамической аналоговой памяти калориметров.**

В соответствии с принципом построения многоканальных систем, основными характеристиками динамической аналоговой памяти калориметров является время выхода сигнала на максимум  $t$ , время хранения сигнала  $\Delta\tau$ , (время памяти) при заданной максимальной ошибке измерения  $\Delta U/U_{max}$ , время начала хранения сигнала (начала памяти)  $\tau_n$  и время его конца  $\tau_k$ .

Экспериментальное определение указанных характеристик является крайне важным, поскольку они необходимы при проектировании системы, оптимизации ее параметров, юстировке и калибровке системы при ее окончательной наладке.

Методика экспериментального определения характеристик состоит в следующем. Для каждого калориметра измеряется функция отклика и записывается в файл в виде двух колонок ( $t$  и  $u$ ) в коде ASCII. Указанный формат необходим для ввода данных функции в графический пакет WEPLOT. Пакет WEPLOT работает под управлением Windows и обладает широкими возможностями обработки и отображения двумерных графиков с высокой точностью.

Функции отклика различных калориметров нормируются по амплитуде и представляются в виде, показанном на Рис.15. Далее с помощью окна выделяется верхняя часть этих функций и представляется в увеличенном по оси  $Y$  виде и логарифмическом масштабе по оси  $X$  (см. Рис 16).

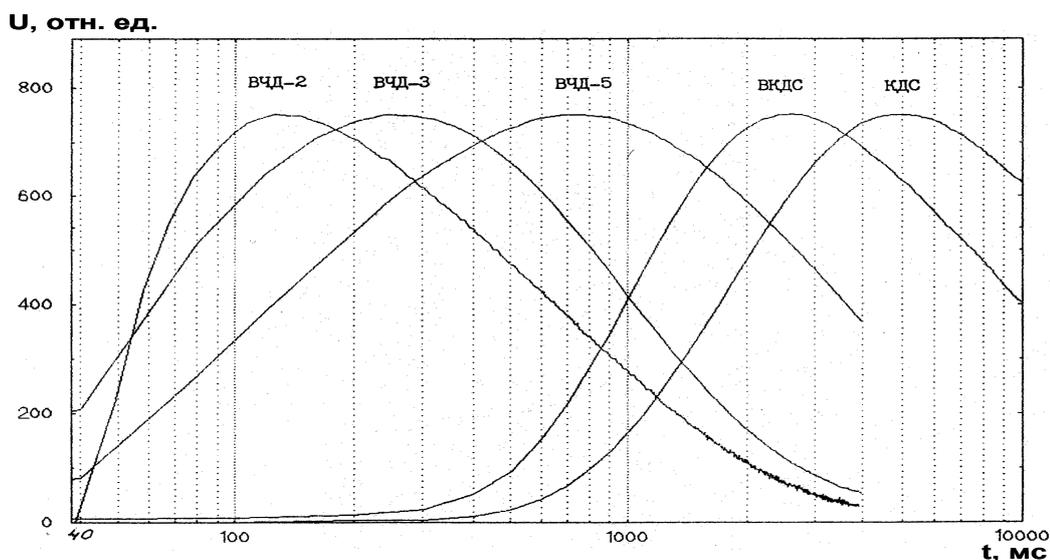


Рис.15. Нормированные по амплитуде функции отклика калориметров.

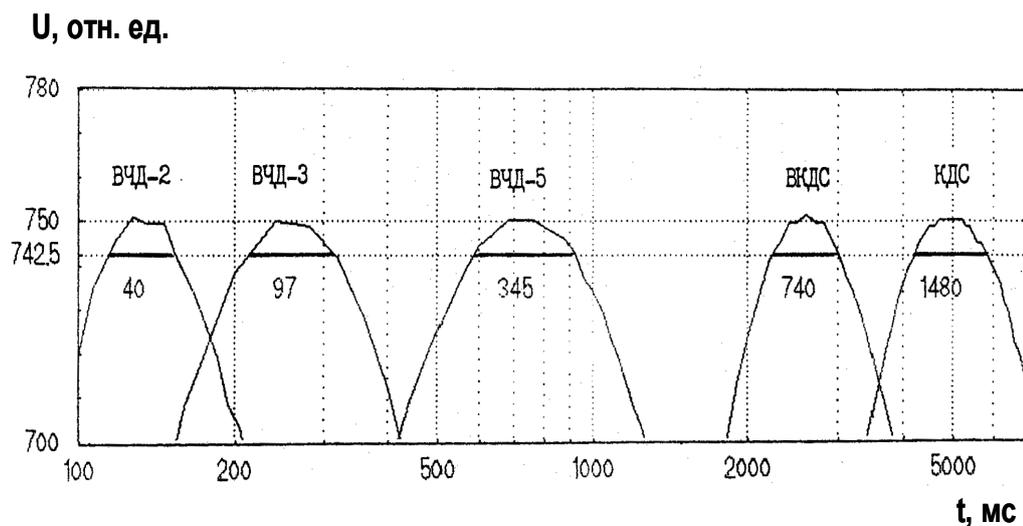


Рис.16. Увеличенное представление функций отклика калориметров.

Как видно из Рис.16, увеличенный масштаб в сочетании с прецизионной визирной техникой графического пакета позволяет определять искомые характеристики с высокой степенью точности.

При получении приводимых здесь функций отклика световая вспышка подавалась с задержкой на (35- 40) мс после начала измерения времени (нуля начала координат), что необходимо учитывать при определении времени выхода сигнала на максимум.

Детальное рассмотрение функций отклика вблизи максимума, представленное на Рис.16, показывает, что общее время хранения сигнала с ошибкой 1% достигает 2702 мс, что позволяет опросить 67 калориметров, если принять время поканальных измерений 40 мс. Существующий разброс времени выхода сигнала на максимум увеличивает эффективное время хранения каждой группы калориметров (см. пример для ВЧД-3 на Рис.13) соответственно на 160, 250, 100,500 и 1700 мс, что обеспечивает возможность увеличения числа каналов еще на 68.

Таким образом, при времени опроса 40 мс, совокупность выбранных типов калориметров позволяет в принципе построить систему на 135 каналов, при этом группы калориметров ВЧД-2, ВЧД-3, ВЧД-5, ВКДС и КДС могут содержать соответственно 5, 9, 11, 31, и 79 каналов.

Выбор рабочих точек (моментов опроса) калориметров и организация их опроса осуществлялась следующим образом. Для всех подключаемых к системе калориметров были экспериментально получены функции отклика. При этом обнаружено различие времени выхода сигнала на максимум не только у калориметров разных типов, но и у конкретных экземпляров калориметров одного и того же типа. Это потребовало индивидуального подхода при организации очередности опроса (см., например, Рис.13 для группы калориметров ВЧД-3). Для остальных групп проводилась аналогичная процедура.

На Рис.13. представлены функции отклика шести калориметров ВЧД3. Для наглядности функции показаны в разном масштабе. Анализ координат функций выполнялся графическим программным пакетом с точностью 0.001 % от номинала шкалы. Вертикальными метками указаны максимумы функций. Разброс времени выхода сигнала на максимум составляет 250 мс. Выбранные рабочие точки (моменты отсчета) обведены кружками. Опрос начинается с калориметра 1 и заканчивается калориметром 6 с интервалом 50 мс. Точки отсчета калориметров 1, 5 и 6 находятся точно на максимумах, точки 2 и 3 несколько сдвинуты, но ошибка измерения за счет этого не превышает 0.1 % и ею можно пренебречь. Калориметр 4 опрашивается далеко от максимума и ошибка при этом составляет 3 %. Поскольку эта ошибка известна и постоянна, то в таких случаях в системе предусматривается ввод соответствующего коэффициента коррекции.

По описанной методике были определены характеристики всех калориметров, использующихся в созданной системе измерения энергии.

Сводные результаты измерения характеристик по всем калориметрам представлены в Таблице 1. Данные, содержащиеся в таблице, позволяют определять максимально-возможное число измерительных каналов системы для точности измерений 1%, 2% и 5%, оптимизировать точность измерений в зависимости от числа каналов, выбирать компромисс между максимально-возможным числом каналов и временем поканального измерения, которое в свою очередь определяет помехоустойчивость и чувствительность измерительного тракта

Окончательная временная юстировка системы выполнялась при помощи специально-разработанной подпрограммы трассировки TEST-T, которая вводилась в работу параллельно с основной программой опроса каналов.

В процессе лазерного цикла, после выстрела, программа TEST-T последовательно измеряет реальные моменты (времена) опроса всех калориметров с точностью 100 мкс. Сравнение померенных моментов опроса с заданными в рабочей программе по функциям отклика позволяет установить и откорректировать несоответствия, возникающие по разным неучтенным причинам.

Путем ряда последовательных коррекций, применение временной юстировки позволило довести точность опроса калориметров до 2%, что практически является теоретическим пределом для состава оборудования созданной многоканальной системы измерения энергии.

**Таблица 1.** Характеристики динамической аналоговой памяти калориметров.

Характеристики		ВЧД-2	ВЧД-3	ВЧД-5	ВКДС	КДС
<b>1. Время выхода сигнала на максимум <math>\tau</math> (мс)</b>		<b>270</b>	<b>540</b>	<b>831</b>	<b>3014</b>	<b>5218</b>
<b>2. Время хранения сигнала <math>\Delta\tau</math> (мс) при максимальной ошибке <math>\Delta U/U_{\max} =</math></b>	<b>=1%</b>	<b>80</b>	<b>170</b>	<b>300</b>	<b>900</b>	<b>1500</b>
	<b>=2%</b>	<b>120</b>	<b>230</b>	<b>410</b>	<b>1200</b>	<b>2000</b>
	<b>=5%</b>	<b>200</b>	<b>380</b>	<b>660</b>	<b>2000</b>	<b>4500</b>
<b>3. Время хранения <math>\tau_H</math> (мс) при <math>\Delta U/U_{\max} =</math></b>	<b>=1%</b>	<b>220</b>	<b>455</b>	<b>716</b>	<b>2585</b>	<b>4558</b>
	<b>=2%</b>	<b>200</b>	<b>430</b>	<b>670</b>	<b>2450</b>	<b>4300</b>
	<b>=5%</b>	<b>180</b>	<b>360</b>	<b>580</b>	<b>220</b>	<b>3800</b>
<b>4. Конец хранения</b>	<b>=1%</b>	<b>290</b>	<b>620</b>	<b>1020</b>	<b>3460</b>	<b>6070</b>

$\tau_k(\text{мс})$ при $\Delta U/U_{\text{max}}=$	$=2\%$	<b>320</b>	<b>660</b>	<b>1080</b>	<b>3700</b>	<b>6300</b>
	$=5\%$	<b>380</b>	<b>750</b>	<b>1240</b>	<b>4200</b>	<b>7320</b>
<b>5. Максимально возможное число каналов данного калориметра при времени измерения 40 мс <math>\Delta U/U_{\text{max}}=</math></b>	$=1\%$	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>22</b>	<b>37</b>
	$=2\%$	<b>3-5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>50</b>
	$=5\%$	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>50</b>	<b>75</b>

Калибровка каналов по чувствительности осуществлялась подпрограммой TEST-U. В процессе работы этой подпрограммы, по команде Выстрел, на входы всех каналов подается ступенька калиброванного напряжения 100 мкВ, далее выполняется обычный цикл измерительной программы, система работает в своем измерительном режиме, за исключением последнего этапа, обработки и представления данных. В режиме калибровки система выдает массив коэффициентов коррекции каналов по чувствительности. Сравнение контрольного массива коэффициентов с аналогичным массивом, заложенным в рабочую программу, позволяет установить и устранить несоответствия, в случае их возникновения.

### **5. Функциональная схема системы энергоизмерительной системы.**

Функциональная схема системы измерения энергии в экспериментах на установке “ПИКО” представлена на Рис. 17.

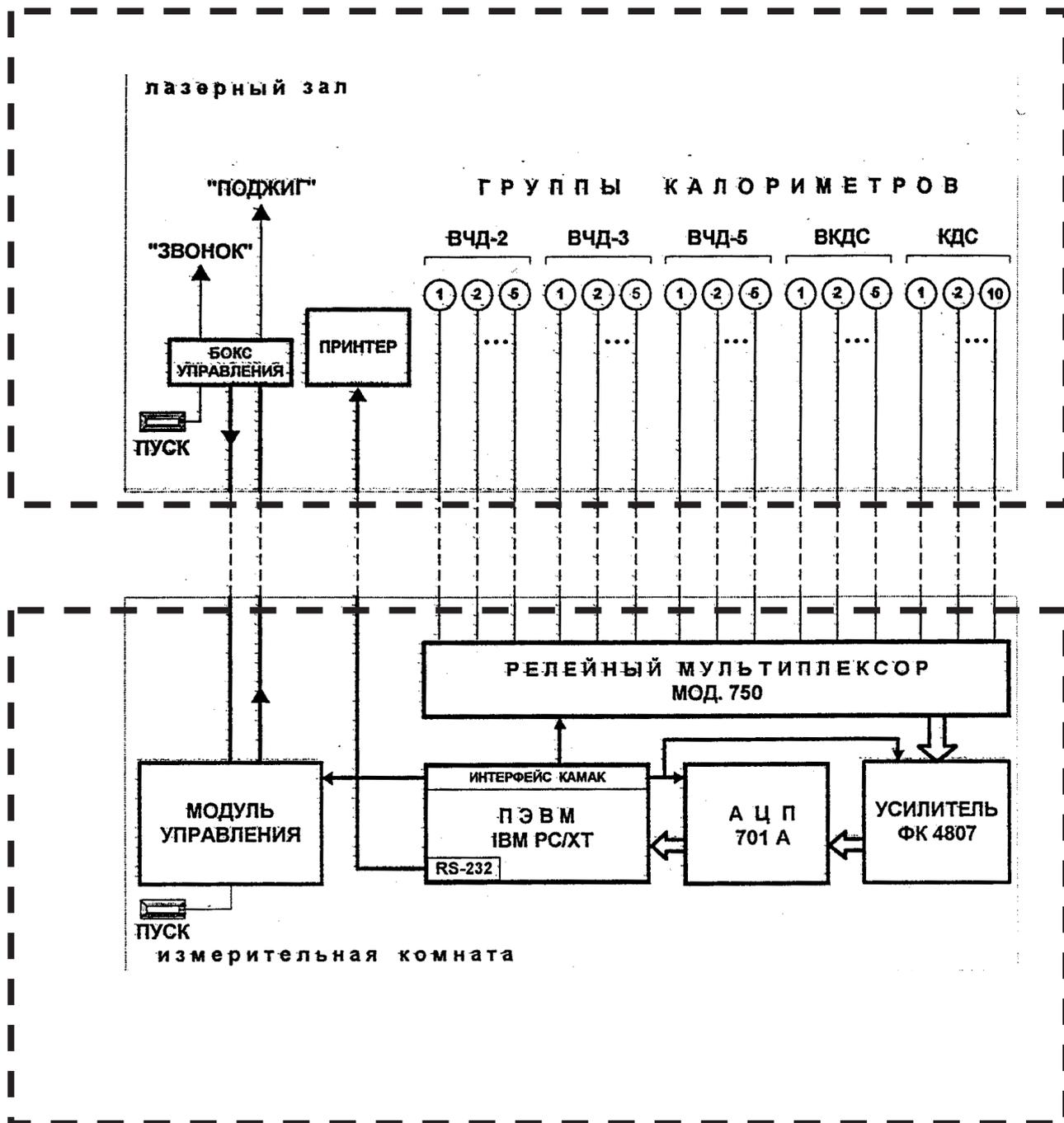


Рис.17. Функциональная схема измерительной системы.

В качестве детекторов лазерного излучения выбраны пять типов калориметров: ВЧД-2, ВЧД-3, ВЧД-5, ВКДС и КДС, технические характеристики которых представлены в Табл.1. Основным критерий выбора - большое различие во времени выхода сигнала на максимум.

Измерительная система содержит три функциональных модуля стандарта КАМАК, управляемых персональным компьютером посредством контроллера крейта 1330 НУТЕС. Функциональная схема аппаратурной части системы

(Рис.17.) содержит 30 калориметров 5-ти различных типов, объединенных в группы. Каждый калориметр подсоединяется на вход мультиплексора посредством скрученной пары, образуя, таким образом, опрашиваемый канал. Длина скрученных пар составляет 20-50 м, в зависимости от места установки калориметра.

Подключение калориметров к АЦП выполняет релейный мультиплексор 750 POLON. Он обеспечивает произвольный выбор одного из 32-х двухпроводных изолированных от земли каналов с временем переключения не менее 10 мс, при сопротивлении перехода 0.3 Ом и сопротивлении изоляции 100 МОм.

В качестве АЦП используется интегрирующий 11-разрядный помехозащищенный аналого-цифровой преобразователь 701А POLON с максимальным временем преобразования 40 мс, имеющий 6 программно управляемых диапазонов измерений (50 мВ-10 В) и гальваническую развязку аналоговой части от цифровой. Для повышения чувствительности измерительного тракта используется измерительный дифференциальный усилитель ФК4807 П/О "Вибратор" с программно-управляемым коэффициентом усиления и гальванической развязкой от земли.

Таким образом, двухпроводный измерительный тракт каждого канала от калориметра до АЦП является дифференциальным, изолирован от земли и может быть заземлен в наиболее удачном месте. Такое решение принято в целях максимальной защиты от помех.

Синхронизация системы с лазерной установкой осуществляется посредством выполненного в стандарте КАМАК модуля управления и связанного с ним размещенного в лазерном зале бокса управления, содержащего набор исполнительных реле и кнопок управления. Посредством модуля управления и соответствующих программ создается режим ожидания готовности лазера, передается в систему сигнал оператора "Пуск", формируются сигналы на исполнительные устройства, реализующие запрограммированное звуковое оповещение, и "Выстрел" лазера. К моменту "Выстрел" программно привязываются все процессы, связанные с управлением системой измерения энергии. Для защиты от помех линии связи модуль - бокс развязаны посредством реле и оптопар.

Программное обеспечение системы содержит основную программу управления и ряд вспомогательных программ, предназначенных для тестирования и измерения ее рабочих характеристик. Программы написаны на языке Си и работают под управлением MS DOS. Фрагменты программ, управляющие модулями КАМАК написаны на языке ассемблера в виде функций, которые вызываются из программы на языке Си.

Программа управления системой обеспечивает подачу звукового оповещения в лазерный зал перед выстрелом, поканальные измерения и запоминание "Фона" калориметров, подачу команды "Выстрел", поканальные измерения "Сигнала" калориметров (точнее "Сигнал + Фон"), поканальное

вычитание "Фона" из "Сигнала", нормировку сигналов (перевод в милливольты, учет чувствительности калориметров, коэффициентов калибровки, геометрии и др.), формирование протокола измерений в данном выстреле, отображение его на экране дисплея, выдачу на принтер и запись в архивный файл.

Вспомогательные программы обеспечивают проверку работоспособности системы в целом (тест, имитирующий выстрел), калибровку чувствительности каналов по эталонному напряжению, измерение функций отклика калориметров, установленных в каналах, трассировку поканального опроса (проверку соответствия моментов опроса калориметров выбранным рабочим точкам), проверку помехозащищенности и др.

В заключение приведем основные технические характеристики системы: число подключенных измерительных каналов - 30 (Система позволяет наращивание числа каналов до 120 путем простого подключения дополнительного модуля мультиплексора на каждые 30 каналов), диапазон измеряемых энергий (без аттенуаторов) - 1 мДж - 100 Дж, погрешность абсолютных измерений - (7-9) %, в зависимости от типа калориметра, погрешность относительных измерений (1.5-3) %, чувствительность измерительного тракта - 2.5 мкВ/бит.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерные термоядерные установки,  
Басов Н.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И.  
ВИНИТИ, Москва. Итоги науки и техники, серия Радиотехника, том 25, 1984г.
2. Мощная лазерная установка «Дельфин» для нагрева сферических термоядерных мишеней,  
Басов Н.Г., Быковский Н.Е., Данилов А.Е., Калашников М.П., Михайлов Ю.А., Роде А.В., Склизков Г.В. и др.  
Труды ФИАН 1978г., том.103, № 1, стр. 3-45
3. Методика исследования процессов переноса в фольгах, моделирующих абляторы термоядерных мишеней,  
Борисенко Н.Г., Громов А.И., Иванов В.В., Князев А.К., Куценко А.В., Лебо И.Г., Мацвейко А.А., Меркульев Ю.А., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизков Г.В., Стародуб А.Н.  
Труды IX Совещания по диагностике высокотемпературной плазмы 2-4 июня 1997 г. Санкт-Петербург, Россия 1997г., стр. 11

4. Исследование генерации высокоэнергичных электронов в лазерной плазме, Иванов В.В., Князев А.К., Куценко А.В., Мацвейко А.А., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизков Г.В., Стародуб А.Н.  
Журнал экспериментальной и теоретической физики 1996г., том.109, № 4, стр. 1257-1266  
Investigation of the generation of high-energy electrons in a laser plasma, Ivanov V.V., Knyazev A.K., Kutsenko A.V., Matsveiko A.A., Mikhailov Yu.A., Osetrov V.P., Popov A.I., Sklizkov G.V., Starodub A.N.  
Journal of Experimental and Theoretical Physics 1996г., том.82, № 4, стр. 677-682
5. Аномальное прогорание тонких фольг при нагреве лазерным излучением высокой яркости, Иванов В.В., Куценко А.В., Лебо И.Г., Мацвейко А.А., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Розанов В.Б., Склизков Г.В., Стародуб А.Н.  
Журнал экспериментальной и теоретической физики 1999г., том.116, № 4(10), стр. 1287-1299  
Anomalous burn-through of thin foils by high-intensity laser radiation, Ivanov V.V., Kutsenko A.V., Lebo I.G., Matsveiko A.A., Mikhailov Y.A., Osetrov V.P., Popov A.I., Rozanov V.B., Sklizkov G.V., Starodub A.N.  
Journal of Experimental and Theoretical Physics 1999г., том.89, № 4, стр. 689-695
6. Anomalous burning through of thin foils at high brightness laser radiation heating, Koutsenko A.V., Lebo I.G., Matzveiko A.A., Mikhailov Y.A., Rozanov V.B., Sklizkov G.V., Starodub A.N.  
Laser and Particle Beams 1999г., том.17, № 3, стр. 557-563
7. Исследование симметризирующего воздействия лазерного предимпульса на неоднородность нагрева тонких фольг, Илясов А.О., Лебо И.Г., Михайлов Ю.А., Розанов В.Б., Склизков Г.В., Стародуб А.Н., Тишкин В.Ф. и др.  
Квантовая электроника 2005г., том.35, № 7, стр. 641-647  
Study of symmetrising action of laser prepulse on inhomogeneity of thin foil heating, Ilyasov A.O., Lebo I.G., Mikhailov Yu.A., Rozanov V.B., Sklizkov G.V., Starodub A.N., Tishkin V.F. et.al.  
Quantum Electronics 2005г., том.35, № 7, стр. 641-644
8. Effect of a prepulse on ablation-pressure smoothing in laser heating of thin foils, Mikhailov Y.A., Grechko M.A., Zhitkova O.A., Zhurovich M.A., Koutsenko A.V., Lebo I.G., Limpouch J., Matsveiko A.A., Rozanov V.B., Sklizkov G.V. et.al.  
Journal of Russian Laser Research 2007г., том.28, № 4, стр. 310-325

9. Stochastic heating of electrons in focused multimode laser fields,  
Mikhailov Y.A., Nikitina L.A., Sklizkov G.V., Starodub A.N., Zhurovich M.A.  
Journal of Russian Laser Research 2007г., том.28, № 4, стр. 344-355
10. Relativistic electron heating in focused multimode laser fields with stochastic phase perturbations,  
Mikhailov Y.A., Nikitina L.A., Sklizkov G.V., Starodub A.N., Zhurovich M.A.  
Laser and Particle Beams 2008г., том.26, № 4, стр. 525-536
11. Выравнивание абляционного давления в короне лазерной плазмы при нагреве мишеней для ЛТС,  
Журович М.А., Житкова О.А., Лебо И.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Стародуб А.Н., Тишкин В.Ф. и др.  
Квантовая электроника 2009г., том.39, № 6, стр.531-536  
Smoothing of ablation pressure nonuniformities in the laser-plasma corona during heating of laser fusion targets,  
Zhurovich M.A., Zhitkova O.A., Lebo I.G., Mikhailov Y.A., Sklizkov G.V., Starodub A.N., Tishkin V.F et.al.  
Quantum Electronics 2009г., том.39, № 6, стр. 531-536
12. Калориметрические измерения баланса энергии лазерного излучения при нагреве сферических мишеней на установке Дельфин-1,  
Васин Б.Л., Данилов А.Е., Калашников М.П., Михайлов Ю.А., Орлов В.В., Роде А.В., Склизков Г.В., Федотов С.И., Цветков М.Ю.  
Квантовая электроника 1984г., том.11, № 7, стр. 1313-1318
13. Электрооптическая система формирования лазерных импульсов с предельной контрастностью излучения,  
Калашников М.П., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И.  
Приборы и техника эксперимента 1978г., № 6, стр. 47-51
14. Метод построения многоканальных систем измерения энергии лазеров, работающих в режиме одиночных импульсов,  
Иванов В.В, Князев А.К., Куценко А.В., Мацвейко А.А., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизков Г.В., Стародуб А.Н. и др.  
Приборы и техника эксперимента 1996г., том.39, № 4, стр. 123-125
15. Система многоканальных измерений энергии излучения на лазерной установке "Пико",  
Иванов В.В, Князев А.К., Куценко А.В., Мацвейко А.А., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизков Г.В., Стародуб А.Н. и др.  
Приборы и техника эксперимента 1997г., том.40, № 4, стр. 168-172

Подписано в печать 27.06.2014 г.  
Формат 60x84/16. Заказ № 35. Тираж 140 экз. П.л 2.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640