

# ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ФРАГМЕНТИРОВАННЫМ ФАРАДЕЕВСКИМ ДАТЧИКОМ

*В. В. Грушко, А. Н. Моисеенко, А. В. Филиппов, О. М. Таценко, С. А. Казаков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время достигнуты высокие результаты в экспериментах по получению мягкого рентгеновского излучения, генерируемого при токовой имплозии цилиндрических лайнеров в геометрии Z-пинча. Этот вид излучения можно использовать для зажигания термоядерных мишеней. Известно, что для зажигания мишени необходимо сформировать в нагрузке импульс тока амплитудой  $\sim 60$  МА с временем нарастания менее 1 мкс [1]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ такие токи обеспечиваются дисковыми взрывомагнитными генераторами (ДВМГ). Так, например, с помощью генератора ДВМГ480 получен ток  $\sim 100$  МА с характерным временем нарастания 6,5 мкс [2].

Измерения тока на электрофизических установках проводятся, как правило, с помощью гальванических (шунтов) и индукционных (дифференцирующих и интегрирующих) датчиков. Но на мощных импульсных установках существует проблема обеспечения гальванической развязки датчиков тока с регистрирующей аппаратурой. Проблема вызвана необходимостью защиты дорогостоящих регистраторов от воздействия высоких потенциалов, развивающихся как на самих датчиках, так и при работе установки. Кроме того, из-за высокой чувствительности гальванических и индукционных датчиков, их возможности ограничены при измерениях сверхвысоких ( $10^7$ – $10^8$  А) токов.

Проблема обеспечения измерений мультимегаамперных токов в опытах с ДВМГ снимается при использовании магнитооптических датчиков, работа которых основана на использовании эффекта Фарадея [3]. Однако и в этом случае имеются технические сложности. Ранее такие измерения проводились, когда магнитооптические датчики располагались в виде колец в полостях вокруг цилиндрического токопровода, по которому протекает ток. Особенностью ДВМГ является то, что они успешно работают на низкоиндуктивные нагрузки. Поэтому в экспериментах с ДВМГ и лайнерными системами количество и размеры полостей для размещения датчиков ограничены из-за необходимости снижения величины паразитной индуктивности в цепи нагрузки. Отсюда количество измерений импульса тока в нагрузке ДВМГ магнитооптическим методом, как правило, ограничено одним-двумя. В случае механического повреждения хрупких оптоволоконных световодов (что иногда происходит при проведении монтажных работ с изделием в поли-

гонных условиях) существует риск частичной или полной потери информации о параметрах импульса тока.

Информативность измерений можно повысить, не изменяя индуктивности контура, если использовать несколько магнитооптических датчиков, размещенных в одной полости. В отличие от кольцевого магнитооптического датчика, каждый из датчиков выполняется в виде фрагмента кольца. Фрагментированный датчик регистрирует только часть полного тока. Полный ток определяется методом интегрирования по всему контуру. Предложенный метод регистрации можно использовать для изучения симметричности растекания тока в контуре ДВМГ. В докладе представлены результаты измерений тока в индуктивной нагрузке дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ-480 кольцевым и фрагментированным фарадеевскими датчиками.

## Экспериментальная установка и схема измерений

Генератор ДВМГ480 является источником энергии во взрывной электрофизической установке ЭМИР, предназначенной для генерации импульса мягкого рентгеновского излучения при схлопывании многопроволочного лайнера, который будет использоваться для зажигания термоядерных мишеней. Схема генератора ДВМГ480 показана на рис. 1.

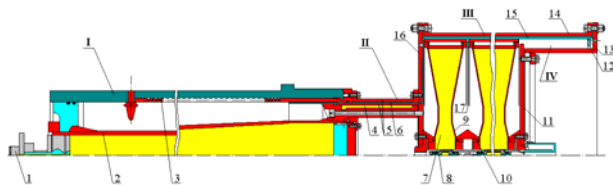


Рис. 1. Схема генератора ДВМГ480 с предусилителем энергии ВМГ-240: I – предусилитель; II – узел отключения предусилителя; III – ДВМГ; IV – нагрузка; 1 – электродетонатор; 2 – центральная труба с зарядом ВВ; 3 – спираль; 4 – заряд ВВ; 5 – электрод; 6 – изолятор; 7 – дисковый заряд ВВ; 8 – устройство инициирования дисковых зарядов; 9 – дисковая оболочка; 10 – конус; 11, 16 – торцевые стенки; 12 – оптический датчик; 13 – индукционный датчик; 14 – корпус; 15, 17 – изоляторы

Устройство запитывается от предусилителя I – спирального ВМГ, – и включает в себя узел отключения предусилителя II, пять дисковых элементов III,

и нагрузку IV. При срабатывании ДВМГ сжимаемый магнитный поток вытесняется в нагрузку через передающую линию, т. е. через зазор между дисковыми элементами и наружным корпусом 14 генератора. Магнитооптические датчики из специального измерительного оптоволоконного световода типа LB 600 размещались в нагрузке ДВМГ на токопроводе 12. В нагрузке также размещалось несколько индукционных дифференцирующих датчиков, регистрирующих производную тока ДВМГ.

Оптическая схема измерения тока представлена на рис. 2.

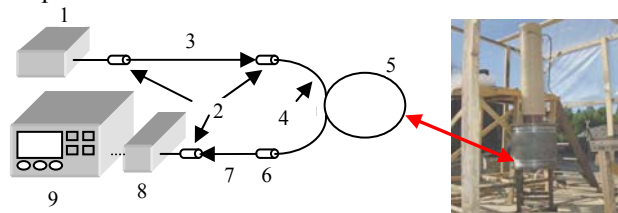


Рис. 2. Оптическая схема измерения тока: 1 – лазер; 2 – оптический адаптер; 3 – одномодовый световод ПАНДА; 4 – измерительный световод LB 600; 5 – токопровод ДВМГ480; 6 – анализатор; 7 – многомодовый световод 100/140; 8 – фотоприемник; 9 – осциллограф

Свет от лазера 1 передавался с помощью одномодового световода 3 типа ПАНДА, сохраняющего плоскость поляризации зондирующего света, на измерительное волокно LB600 – 4. Это волокно изменяет плоскость поляризации зондирующего света при воздействии магнитного поля. Одномодовое оптоволокно ПАНДА использовалось для передачи света на датчик, сохраняя плоскость поляризации зондирующего света, а также для достижения наименьшей дисперсии светового пучка. Свет, проходя через датчик 4, анализатор 6 и отводящий многомодовый световод 7, попадал в фотоприемник 8. Сигнал с фотоприемника регистрировался при помощи осциллографа 9.

Рассмотрим отдельно некоторые элементы оптической системы. Оптоволоконный датчик, работающий на эффекте Фарадея, представлял собой свернутый в кольцо световод типа LB600. Использовались три датчика (рис. 3).

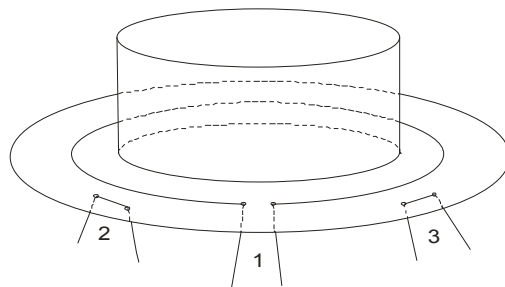


Рис. 3. Схема размещения магнитооптических датчиков тока: 1 – датчик общего тока; 2, 3 –фрагментированные датчики

Первый датчик представлял собой полный виток вокруг токопровода диаметром 531 мм (+ 4,5 мм каркас для датчика) и измерял общий ток. Таким образом, длина составляла 1680 мм. Два других были петлями с прямыми участками длиной по 50 мм и представляли собой фрагментированные фарадеевские датчики тока. Из этого следует, что показания с первого датчика должны быть в 33 раза больше показаний с датчиков 2 и 3.

В качестве источника зондирующего излучения использовались три типа лазеров: 1 – полупроводниковый лазер с длиной волны 0,66 мкм, 2 – He-Ne лазер с длиной волны 0,63 мкм, 3 – полупроводниковый лазер с длиной волны 0,85 мкм.

Данные с фотоприемников регистрировались осциллографом TDS 3054. Данный осциллограф имеет временное разрешение 2 нс, что соответствует условиям эксперимента.

### Экспериментальные данные

На рис. 4 представлена осциллограмма изменения интенсивности света, зарегистрированная фотоприемником для датчика общего тока, а на рис. 5 – для фрагментированного датчика. Результаты обработки осциллограмм представлены на рис. 6.

К сожалению, датчик 3 был выведен из строя при монтаже установки, поэтому данные с него получить было невозможно.

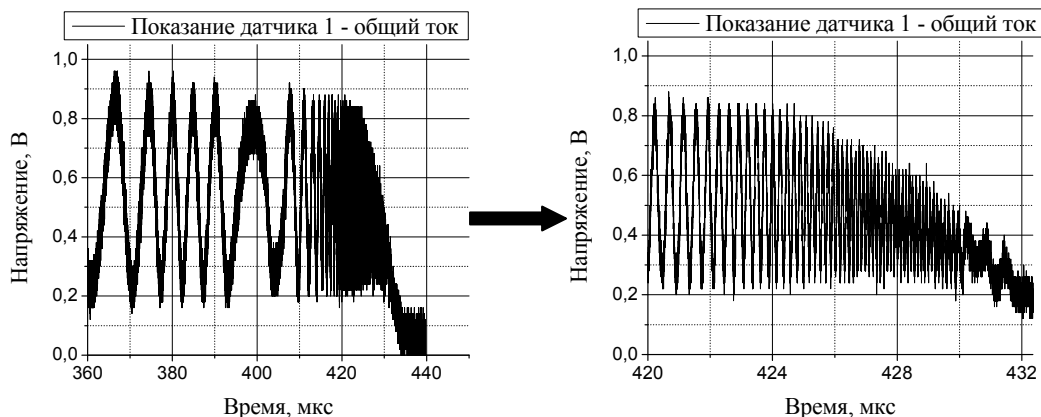


Рис. 4. Данные с фотоприемника для датчика общего тока

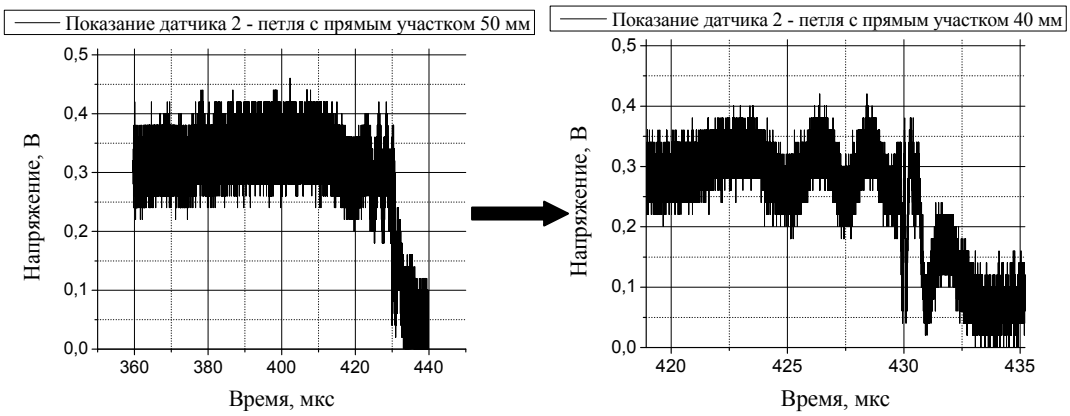


Рис. 5. Данные с фотоприемника для фрагментированного датчика

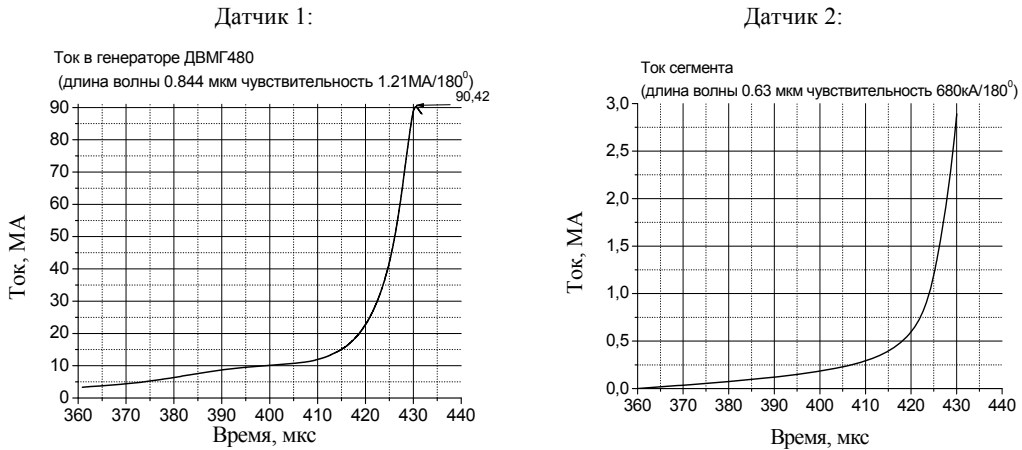


Рис. 6. Зависимость тока в генераторе ДВМГ480 от времени, измеренная оптическим методом с помощью одномодового световода: слева – датчик общего тока, справа – фрагментированный датчик

Для сопоставления результатов токовые зависимости, полученные с помощью датчиков 1 и 2, совмещенные по времени, представлены на рис. 7. Видно, что по характеру изменения тока показания с обоих датчиков практически одинаковы. Это свидетельствует о принципиальной возможности применения

фрагментированных фарадеевских датчиков для измерений тока в опытах с ДВМГ. Более того, показания фрагментированного датчика и датчика общего тока совпадают и показывают значение 90,4 МА, что практически соответствует результатам измерений индукционными датчиками (~ 94 МА).

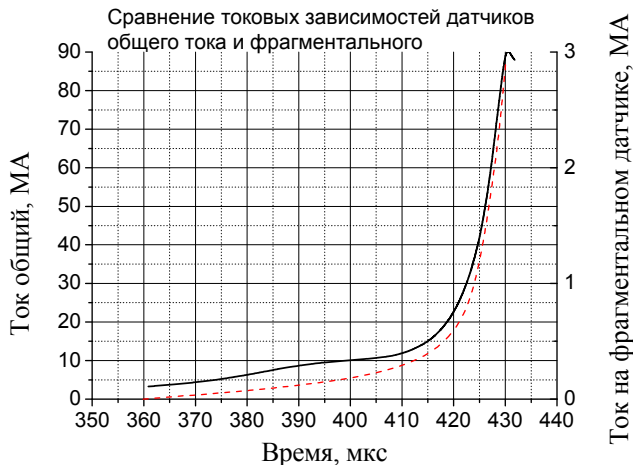


Рис. 7. Сравнение токовых зависимостей датчиков общего тока и фрагментального

В эксперименте с пятиэлементным дисковым взрывомагнитным генератором с зарядом взрывчатого вещества диаметром 480 мм при повышенной запитке от предусилителя энергии проведены измерения тока кольцевыми и фрагментированными магнитооптическими датчиками, работающими на эффекте Фарадея. Результаты измерений сравнивались с результатами измерений, проведенными с помощью индукционных датчиков. Показания фрагментированного датчика и датчика общего тока совпадают и показывают значение 90,4 МА, что практически соответствует результатам измерений индукционными датчиками (~ 94 МА). В дальнейшем будет рассмотрена и воспроизведена схема с большим количеством фрагментальных датчиков для определения равномерности протекания тока в установке. Предложенный метод регистрации тока позволяет расширить диагностические возможности во взрывных опытах.

1. Stygar W. A., Cuneo M. E., Headley D. I., Ives H. C. et al. Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators. *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2007. Vol. 10, 030401.
2. Демидов В. А., Селемир В. Д., Борискин А. С., Казаков С. А. и др. Испытание дискового взрывомагнитного генератора диаметром 480 мм при повышенной запитке // XIII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам: Доклад на Международную конференцию «Мегагаусс-13». Китай. 6–10 июля 2010 г.
3. Моисеенко А. Н., Долотенко М. И., Маркевцев И. М., Савченко Р. В., Таценко О. М., Козлов М. Б. Оптические измерения тока магнитокумулятивного генератора МК-1 // Отчет о НИР ВНИИЭФ. 2001, № 4/10187. С. 18.