

## СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОК В ПРОВОЛОЧНЫХ КАМЕРАХ

*В. М. Абазов, Г. Д. Алексеев, Г. А. Голованов, С. А. Кутузов,  
А. А. Пискун, А. Г. Самарцев, А. Ю. Верхеев,  
В. В. Зель<sup>1</sup>, Н. И. Журавлев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В этой работе описывается разработка ключевых модулей и программного обеспечения тестового стенда для измерения натяжения проволок в проволочных камерах. Натяжение проволок определяется методом измерения резонансных частот их собственных колебаний. Также в работе представлены результаты испытаний этого тестового стенда при производстве MDT-детекторов для прототипа мюонной (пробежной) системы экспериментальной установки SPD/NICA (ОИЯИ).

A test bench for determining the wire tension of wire chambers was designed. The tension of the wires is checked by measuring the resonant frequencies of their vibrations. In this work the development of the key modules of the test bench and the corresponding software are presented. The results of the test stand performance during the production of detectors for the SPD Muon System Prototype (NICA/JINR) are presented.

PACS: 07.05.Hd; 07.50.–e

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проволочные камеры широко применяются в экспериментальных установках для проведения исследований в области физики высоких энергий, в частности MDT-детекторы (мини-дрейфовые трубки) [1], которые изначально были разработаны для модернизации мюонной системы Forward Angle Muon System эксперимента D0 (FNAL) [2]. В настоящее время MDT-детекторы применяются в двух подсистемах эксперимента COMPASS (CERN) [3] — RichWall и Muon Wall 1. Кроме того, MDT-детекторы с открытой геометрией катода [1] будут использоваться в двух новых проектах мюонных систем, разрабатываемых для экспериментов SPD/NICA (ОИЯИ) [4] и PANDA/FAIR (GSI) [5].

Проектирование любой экспериментальной установки включает в себя разработку всего необходимого оборудования для ее сборки, обслуживания и серийного производства компонентов. Предстоящее массовое производство детекторов для проектируемых мюонных систем создает необходимость в разработке специальных тестовых стендов для контроля основных параметров производимых MDT-детекторов, а также

---

<sup>1</sup>E-mail: vzel@jinr.ru

качества их сборки. Одним из ключевых тестовых стендов на линии сборки MDT является стенд для контроля силы натяжения проволок. Правильная работа детектора напрямую зависит от натяжения проволок, поскольку именно натяжение, противодействуя гравитации и электростатическому притяжению (в случае с открытой геометрией катода — в асимметричном поле), обеспечивает центрированное расположение проволок в детекторе.

К разрабатываемому тестовому стенду предъявлялись следующие требования: 1) устройство должно быть небольшим и портативным как для возможного применения на производственной линии, так и для отдельного использования при ремонте и настройке детекторов; 2) компоненты тестового стенда должны быть недорогими, доступными и легкозаменяемыми; 3) тестирование должно быть достаточно быстрым (меньше 5 мин на один детектор); 4) устройство должно сопровождаться программным обеспечением, имеющим удобный и понятный интерфейс, а также все необходимые опции для автоматической работы и отображения полученных результатов.

Работа тестового стенда основана на методе измерения натяжения проволоки путем поиска резонансной частоты ее собственных колебаний. Современные реализации этого метода отличаются только способами возбуждения проволок [6–8]. Для работы этого тестового стенда для возбуждения проволок было решено использовать внешние акустические волны, так как этот метод удобен и эффективен в применении для MDT как с открытой, так и с закрытой геометрией катода. В этой статье описана разработка прототипа тестового стенда и представлены результаты его применения.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОК MDT-ДЕТЕКТОРОВ

MDT-детекторы являются модифицированной разновидностью стримерных трубок Иароччи [9]. В них сохраняется базовая геометрия, но используется пропорциональный режим работы. Также пластиковый катод заменен металлическим. MDT-детектор (рис. 1) состоит из 8 ячеек, сформированных вытянутым экструдированным гребенчатым профилем из алюминия, катодной крышкой из нержавеющей стали и анодными проволоками, расположенными по центру внутри каждой ячейки и поддерживаемыми пластиковыми спейсерами. Для обеспечения газонепроницаемости вся конструкция закрыта пластиковой (Noryl) оболочкой и двумя заглушками, в которых размещены все необходимые разъемы. Проекты мюонных систем для экспериментов SPD и PANDA основаны на использовании MDT-детекторов с открытой геометрией катода, т. е. без крышки из нержавеющей стали, что позволит считывать вторую координату путем регистрации наведенного сигнала.

Самый простой способ определить силу натяжения проволоки — измерить резонансную частоту ( $\Gamma$ ) ее собственных колебаний:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho S}},$$

где  $l$  — длина (м);  $T$  — сила натяжения (Н);  $\rho$  — плотность ( $\text{кг/м}^3$ ),  $S$  — площадь сечения проволоки ( $\text{м}^2$ ). Длина, плотность материала и площадь сечения проволок

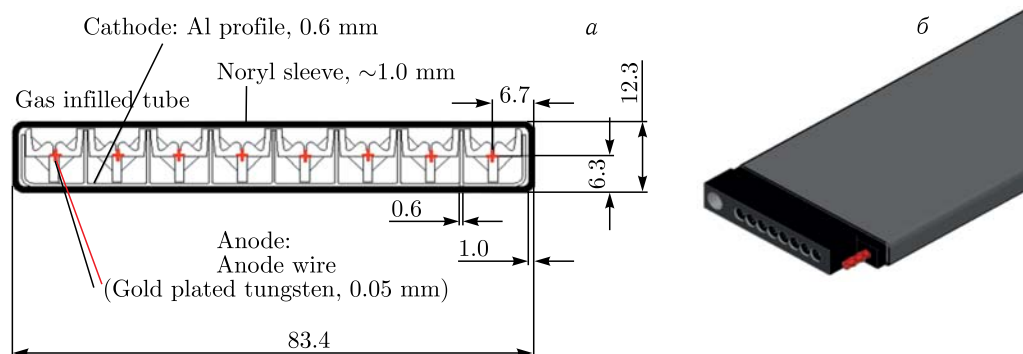


Рис. 1. а) Поперечное сечение; б) 3D-модель MDT-детектора

ки известны и определяются конструкцией детектора. Таким образом, для определения силы натяжения проволоки остается только измерить резонансную частоту ее собственных колебаний. Строение MDT-детектора позволяет воздействовать одновременно на все 8 проволок и считать их частотные характеристики. Колебания проволок легко могут быть вызваны внешним источником — динамиком с контролируемой частотой генерируемых акустических волн. Возбужденные колебания анодных проволок инициируют процесс периодического изменения емкостей детекторных ячеек, что при подаче высоковольтного напряжения на детектор приводит к процессу их периодического заряда/разряда. Соответствующее колебание напряжения может быть легко считано электроникой. Пиковое значение амплитуды напряжения будет достигаться на резонансной частоте колебания анодной проволоки. В результате, измеряя уровень напряжения, можно определить резонансную частоту, которая, как было сказано ранее, напрямую связана с натяжением и свойствами проволоки.

### ПРОТОТИП ТЕСТОВОГО СТЕНДА КОНТРОЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОК

Для решения задачи по измерению натяжения анодных проволок MDT на макетной плате был собран действующий прототип тестового стенда, удовлетворяющий всем поставленным требованиям (портативности, простоте, доступности компонентов и удобству использования). На рис.2 представлены общий вид и блок-схема устройства. Основным управляющим элементом является плата Arduino Nano (на базе микроконтроллера ATmega 168), которая контролирует работу всех модулей, предварительно обрабатывает считанные с детектора данные и обеспечивает связь с компьютером. Модуль AG30P, управляемый ЦАП MCP4725, обеспечивает подачу высоковольтного напряжения на детектор. Возбуждение вибраций анодных проволок вызывается трехватным динамиком, на который посредством генератора сигналов AD9833 и усилителя мощности звука PAM8610 подается синус необходимой частоты из заданного диапазона. Колебания напряжения на проволоках считываются 8 каналами повторителя напряжения на основе операционного усилителя LT1639IS и с помощью аналогового мультиплексора CD4051 передаются на аналоговый вход

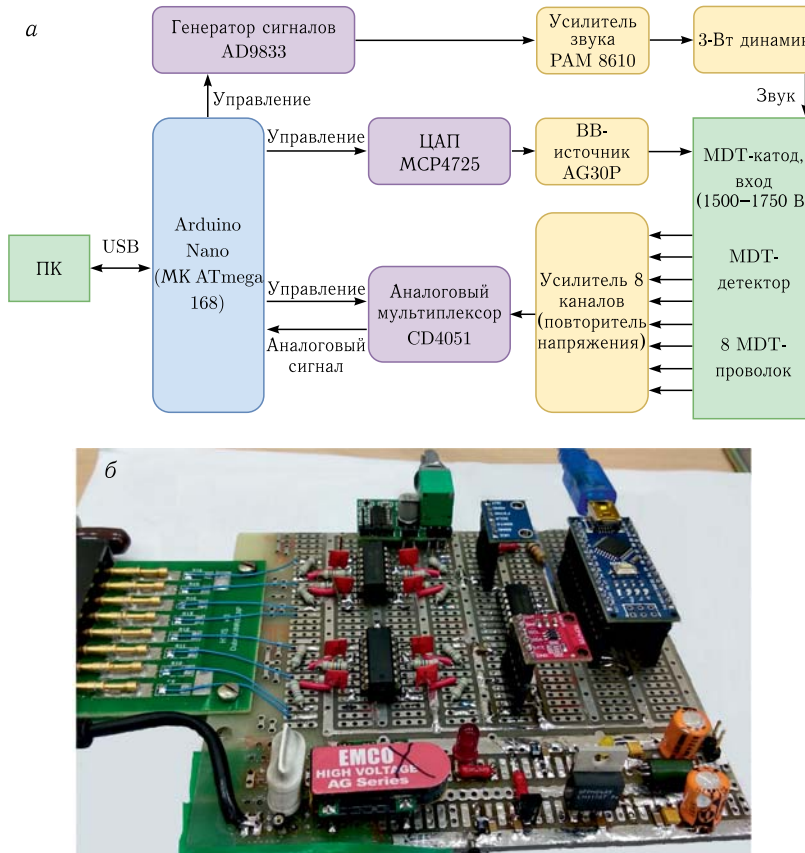


Рис. 2. Блок-схема (а) и общий вид (б) прототипа тестового стенда

микроконтроллера для последующей обработки данных и их передачи на компьютер. Взаимодействие между тестовым стендом и компьютером организовано через последовательный порт посредством USB-интерфейса.

Разработанный прототип тестового стенда имеет два режима работы. Первый режим работы — детальное сканирование. При таком режиме тестирование одного детектора проходит достаточно долго, с шагом 0,1 Гц в заданном диапазоне сканирования, но позволяет получить очень точную резонансно-частотную характеристику проволок детектора. Этот режим необходим в самом начале работы тестового стенда для настройки общих параметров тестирования, так как позволяет получить подробную информацию об условиях тестирования — шумах, уровне отклика напряжения и т.д. Второй режим работы — автоматическое сканирование. При таком режиме работы тестирование проходит с шагом 1 Гц в заданном диапазоне сканирования, и более детальное сканирование с шагом 0,1 Гц будет запущено в том случае, если будет преодолено пороговое значение напряжения на проволоке. При таком режиме работы тестирование проходит гораздо быстрее, но при этом сохраняется требуемая точность определения резонансной частоты.

Когда устройство включено, микроконтроллер находится в режиме ожидания стартовой команды. Команда на старт содержит информацию о диапазоне и режиме сканирования. Когда команда получена, микроконтроллер подает высоковольтное напряжение на детектор и запускает сканирование. На каждой итерации цикла устанавливается новое значение частоты и все амплитудно-частотные характеристики проволок считываются, обрабатываются и передаются на компьютер. Режимы работы тестового стенда отличаются шагом частоты сканирования (0,1 или 1 Гц). При сканировании в автоматическом режиме на каждой итерации происходит проверка преодоления заданного уровня порога напряжения. Также на каждой итерации проверяется получение команды для остановки сканирования. Таким образом, сканирование будет идти или до конца заданного диапазона, или до получения команды остановки. Когда цикл завершен, микроконтроллер отключает подачу высоковольтного напряжения на детектор и переходит в режим ожидания стартовой команды.

Для управления тестовым стендом и отображения полученных результатов было разработано специальное программное обеспечение с графическим пользовательским интерфейсом. В основном окне программы (рис. 3) отображается индикатор высоковольтного напряжения, текущая частота сканирования и уже измеренные значения частотно-резонансных характеристик проволок. Левая часть — блок настроек — поз-

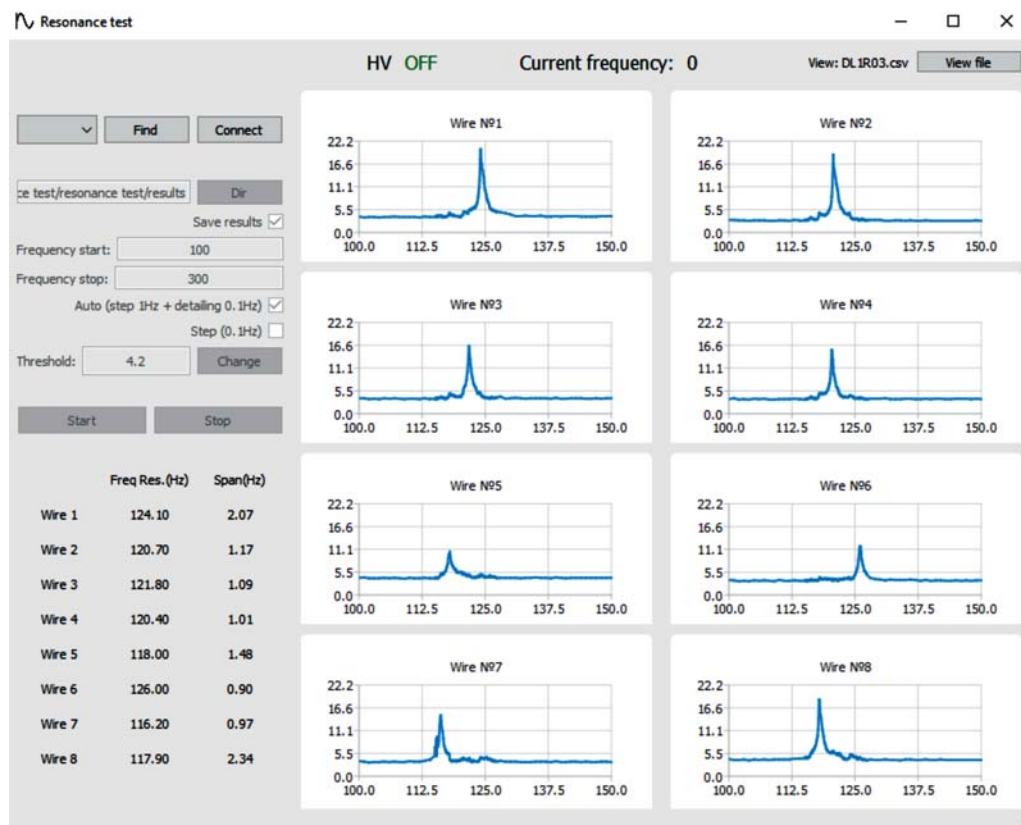


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы управления тестовым стендом

воляет выбрать параметры сохранения результатов сканирования, а также настроить тестирование (выбрать режим работы, задать диапазон сканирования и отрегулировать пороговое значение для фильтрации шумов). Ниже можно увидеть уже измеренные значения резонансной частоты и ширины пика для каждой проволоки отдельно. Также отдельно для каждой проволоки отображаются графики частотных характеристик, обновляемые в процессе тестирования детектора. Эту программу в том числе можно использовать для импорта уже сохраненных результатов и их графического отображения.

### **ИСПЫТАНИЯ ТЕСТОВОГО СТЕНДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОК**

Разработка тестового стенда для контроля натяжения проволок началась одновременно с массовым производством MDT-детекторов для прототипа мюонной системы SPD. Для прототипа были собраны 60-см MDT-детекторы с открытой геометрией катода, на которых и производились настройка и проверка работы тестового стенда. После настройки прототипа стенда он использовался для проверки натяжения проволок во всех произведенных на тот момент (~ 120 шт.) детекторах. Позднее прототип тестового стенда был использован при ремонте подсистемы RichWall эксперимента COMPASS. При этом тестовым стендом были протестированы детекторы (~ 100 шт.) разной длины (до 4 м, со спейсером на каждый метр) с закрытой геометрией катода. В целом прототип тестового стенда оба раза хорошо справился с тестированием детекторов. Им легко определялись как одиночные (на коротких трубках), так и множественные (из-за спейсеров) резонансные пики в детекторах и с открытой, и с закрытой геометрией катода.

Однако проведенные испытания прототипа тестового стенда выявили необходимость в альтернативном варианте управления модулем высоковольтного напряжения, так как используемая схема включения модуля характеризуется нестабильностью уровня выходного напряжения. Наличие возможности управления уровнем высоковольтного напряжения также оказалось необходимым для подстройки режима работы устройства в зависимости от условий проведения тестирования (в настоящее время устройство работает с фиксированным уровнем высоковольтного напряжения).

### **ВЫВОДЫ**

В итоге был разработан тестовый стенд контроля натяжения проволок, применимый для разных конфигураций геометрии MDT-детекторов. Прототип тестового стенда был собран на макетной плате и испытан на практике. Тестовый стенд снабжен специальной управляющей программой, в которой есть все необходимые опции для автоматической работы устройства и обработки данных, полученных в ходе тестирования. Результаты этой работы в дальнейшем будут использованы при создании итогового варианта печатной платы тестового стенда для контроля натяжения проволок.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Abazov V. M., Alexeev G. D., Davydov Y. I., Malyshev V. L., Piskun A. A.* Comparative Analysis of the Performance Characteristics of Mini-Drift Tubes with Different Design // *Instr. Exp. Tech.* 2010. V. 53. P. 356–361.

2. *Abazov V. et al. (D0 Collab).* The Muon System of the Run II D0 Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 552. P. 372–398.
3. *Abbon Ph. et al. (COMPASS Collab.).* The COMPASS Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455–518.
4. *Abazov V. et al. (SPD Collab.).* Conceptual Design of the Spin Physics Detector. arXiv:2102.00442 [hep-ex].
5. *Destefanis M. et al. (PANDA Collab.)* The PANDA Experiment at FAIR // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2013. V. 245. P. 199–206.
6. *Ciambrone P., Dane E., Dumps R., Dwuznik M., Felici G., Forti C., Frenkel A., Graulich J.-S., Kachtchouk A., Kulikov V.V., Martellotti G., Medvedkov A., Nedosekin A.A., Penso G., Pinci D., Pirozzi G., Schmidt B., Shubin V.* Automated Wire Tension Measurement System for LHCb Muon Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 545. P. 156–163.
7. *Wang X., Shen F., Wang S., Feng C., Li C., Lu P., Thomas J., Xu Q., Zhual Ch.* Design and Implementation of Wire Tension Measurement System for MWPCs Used in the START iTCPC Upgrade // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 859. P. 90–94.
8. *Garcia-Gamez D., Basque V., Brooks T.G., Evans J.J., Perry M., Soldner-Rembold S., Spagliardi F., Szec A.M.* A Novel Electrical Method to Measure Wire Tension for Time Projection Chambers. arXiv:1804.05941v2 [physics.ins-det].
9. *Iarocci E.* Plastic Streamer Tubes and Their Applications in High Energy Physics // Nucl. Instr. Meth. 1983. V. 217. P. 30–42.

Получено 26 января 2022 г.