

P13-2017-16

А. В. Агапов, Г. В. Мицын

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ  
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА  
ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОТОННОГО ПУЧКА  
НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Агапов А. В., Мицын Г. В.

P13-2017-16

Многоканальная система измерения магнитных полей элементов канала транспортировки протонного пучка на основе датчиков Холла

В Медико-техническом комплексе ЛЯП ОИЯИ разработана и создана многоканальная система магнитных измерений на основе датчиков Холла, позволяющая отслеживать изменения индукции магнитных полей поворотных электромагнитов канала транспортировки терапевтического протонного пучка в процедурную кабину. Проблема температурной нестабильности датчиков Холла решена применением специально разработанных блоков термостабилизации и питания, обеспечивающих поддержание постоянной температуры рабочей области датчика около  $(40 \pm 0,05)^\circ\text{C}$  и питающего напряжения с точностью  $\pm 1$  мВ. Система регулярно применяется при проведении сеансов протонной терапии, обеспечивая «гарантию качества» лучевого лечения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Agapov A. V., Mitsyn G. V.

P13-2017-16

Multichannel Magnetic Field Measuring System  
Using Hall Sensors for Proton Therapy  
Beamline Elements Control

The article considers the design and construction of a multichannel magnetic field measuring system using Hall sensors elaborated at the Medico-Technical Complex of the DLNP, JINR. The developed system allows monitoring magnetic induction fluctuations of the bending electromagnets of the proton therapy beamline. The thermostatic and power supply modules have been designed to solve the problem of thermal instability of Hall sensors. The set-point temperature of working volume of the Hall sensors is about  $40^\circ\text{C}$  with an accuracy of  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ; and the precision of supply voltage is  $\pm 1$  mV. The multichannel magnetic field measuring system is routinely used in the proton therapy treatment sessions implementing the “quality assurance” of treatment.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В Медико-техническом комплексе (МТК) ЛЯП ОИЯИ [1] для контроля параметров выведенного в процедурную кабину терапевтического протонного пучка применяется система на основе плоскопараллельных, многопроволочных ионизационных камер и набора полупроводниковых диодов [2]. Данная система позволяет в реальном режиме времени получать информацию о профиле протонного пучка, мощности его дозы и пробеге. Контроль этих параметров необходим для прецизионного воспроизведения рассчитанных дозных полей для каждого пациента и обеспечивает «гарантию качества» лучевого лечения [3].

Особенностью формирования и транспортировки протонного пучка фазотрона ОИЯИ в кабину облучения является то, что пространственное распределение частиц в пучке и их средняя энергия в месте облучения пациента может варьироваться в широких пределах в течение сеанса лучевой терапии. Это связано, в первую очередь, с наличием нестабильности магнитного поля поворотных электромагнитов канала транспортировки пучка. Отклонение значения питающего тока на этих элементах от заданных параметров может приводить к значительным отклонениям горизонтальных и вертикальных профилей выведенного протонного пучка, а также изменению его пробега, что негативно сказывается на точности формирования терапевтических дозных полей. При этом используемая система контроля параметров выведенного протонного пучка укажет на эти отклонения, однако не определит, какой именно поворотный электромагнит находится не в рабочем режиме.

Контроль параметров тока на поворотных электромагнитах осуществляется посредством снятия вольтметром значения падения напряжения на измерительном шунте, включенном последовательно в цепи нагрузки. Шунт представляет собой низкоомный резистор, результирующее сопротивление которого обладает температурным дрейфом. Так, при использовании прецизионного резистора температурный дрейф по паспортным данным может составлять до  $0,05\%/^{\circ}\text{C}$ . Также на результирующее значение падения напряжения на шунте оказывает влияние контактная группа, сопротивление проводов от шунта до используемого вольтметра и погрешность конкретного вольтметра. При измерении тока порядка сотен ампер снимаемое напряжение составляет всего несколько милливольт, при этом требуемая точность измерений достаточно высока (около 10 мкВ). Таким образом, нет возможности достаточно точно отследить изменения магнитной индукции на электромагните посредством измерения значения падения напряжения на шунте.

В связи с этим была разработана многоканальная система, позволяющая измерять непосредственно уровень магнитной индукции на поворотных электромагнитах канала транспортировки пучка с помощью миниатюрных полупроводниковых датчиков Холла (ДХ). Следует отметить, что данная система

предназначена не для определения абсолютных значений магнитной индукции, а для оценки степени отклонения индукции от заданных параметров.

Выбор в качестве измерительных элементов датчиков Холла обусловлен их малыми габаритами, достаточно высокой магнитной чувствительностью, быстрой измерений, простотой схематических решений, низкой стоимостью. Однако наряду с перечисленными достоинствами одним из существенных недостатков применения ДХ является зависимость показаний от температуры окружающей среды — так называемая температурная нестабильность коэффициента Холла, связанная с изменением концентрации носителей заряда в полупроводнике и, как следствие, изменением ЭДС Холла при постоянной индукции измеряемого магнитного поля. Так, например, для поддержания магнитной чувствительности ДХ на требуемом для стабильности протонного пучка уровне  $\pm 0,1\%$  необходимо обеспечить его термостабилизацию с колебаниями температуры не хуже  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ , при этом стабилизировать приложенное к нему напряжение с точностью не менее  $\pm 5\text{ мВ}$ .

## УСТРОЙСТВО МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основными элементами многоканальной системы магнитных измерений (рис. 1) являются четыре термостабильных шупа с аналоговыми датчиками Холла SS496А фирмы «Honeywell» (ДХ1-4) [4]. Выбранный тип ДХ обладает магнитной чувствительностью около  $2,5\text{ мВ/Тс}$  с достаточно низким дрейфом в рабочем диапазоне температур около  $0,6\%/^\circ\text{C}$ , приемлемым для выбранных измерений дрейфом нуля, равным  $0,05\%/^\circ\text{C}$ , и пределом измерений

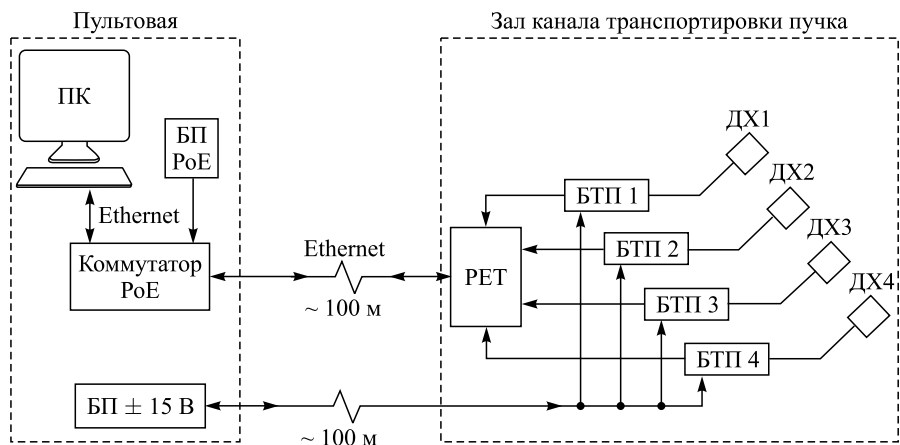
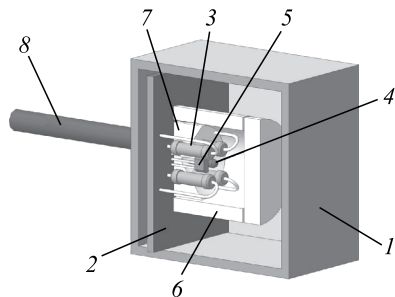


Рис. 1. Структурная схема многоканальной системы магнитных измерений

Рис. 2. Конструкция термостабильного шупа с датчиком Холла: 1 — корпус; 2 — плата; 3 — нагревательные резисторы; 4 — терморезистор; 5 — датчик Холла; 6 — стакан из пенопласта; 7 — термопаста; 8 — медная трубка



магнитной индукции 800 Гс. Датчики размещены в магнитных полях четырех поворотных электромагнитов канала медицинского протонного пучка в зале канала транспортировки. Каждый шуп оснащен индивидуальным блоком термостабилизации и питания (БТП1-4) (рис. 1). Аналоговые сигналы с датчиков Холла считываются многоканальным модулем удаленного ввода РЕТ-7017-10 фирмы ICP DAS (РЕТ) [5], оцифровываются с разрядностью 16 бит и по интерфейсу Ethernet передаются в пультовую комнату на персональный компьютер (ПК) с частотой 10 Гц. Питание БТП и ДХ осуществляется биполярным стабилизированным по напряжению блоком питания БП  $\pm 15$  В из пультовой комнаты. Питание модуля РЕТ организовано по технологии PoE с помощью коммутатора PoE и блока питания +48 В (БП PoE). Длина кабелей Ethernet и питания составляет около 100 м.

Термостабильный шуп представляет собой пластиковый полый куб (корпус), внутри которого размещена плата с нагревательными резисторами, терморезистором и ДХ (рис. 2). Все элементы платы помещены в пенопластовый стакан и находятся в тепловом контакте друг с другом с помощью теплопроводной пасты. Воздушный зазор между корпусом и стаканом обеспечивает дополнительную независимость от температуры окружающей среды. Корпус закреплен на медной трубке длиной 700 мм, позволяющей размещать его в выбранной точке измерений в магнитном поле электромагнита. Также медная трубка, внутри которой протянут сигнальный провод, обеспечивает экранирование от внешних помех.

Блок термостабилизации и питания включает в себя платы термостабилизатора и стабилизации питающего напряжения для датчика Холла. Схема термостабилизатора реализована на микросхеме компаратора КР597СА3 (рис. 3).

Термостабилизатор работает следующим образом. В момент включения температура терморезистора  $R_t$  равна температуре окружающей среды, и его сопротивление оказывается выше, чем заданное балансными сопротивлениями  $R_6$  в установившемся режиме. Вследствие этого потенциал на неинвертирующем входе (+) компаратора выше, чем на инвертирующем (-), и на его выходе присутствует напряжение высокого уровня. Возникающий при этом

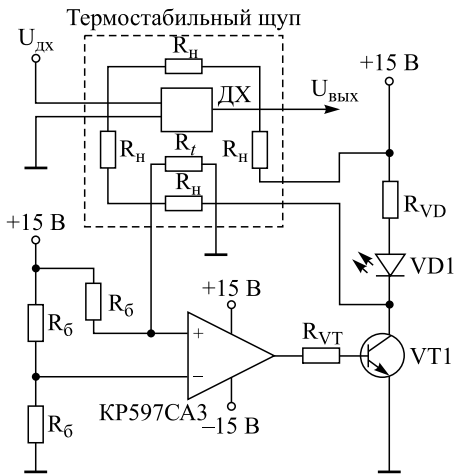


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема термостабилизатора

инвертирующем. На выходе компаратора устанавливается низкий логический уровень, VT1 закрывается, VD1 гаснет, и нагревающие резисторы  $R_n$  начинают остывать. Когда температура снижается ниже определенного уровня (разность потенциалов на входах компаратора достигает порогового значения переключения, равного 0,25 мВ, что соответствует изменению температуры рабочего объема примерно на 0,05 °С, при условии хорошего теплового контакта между  $R_n$  и  $R_t$ ), компаратор снова переключается, VT1 открывается, начинается новый цикл нагревания.

Схема стабилизации питающего напряжения для ДХ реализована на стабилитроне Д818Е. Номинал токоограничивающих резисторов подобран таким образом, чтобы обеспечить стабильность напряжения питания  $U_{дх}$  в пределах  $\pm 1$  мВ.

Собранный блок термостабилизации и питания, а также термостабильный шуп, с выбранными параметрами элементов, обеспечивают поддержание постоянной температуры ДХ около 40 °С с колебаниями до 0,05 °С и время прогрева рабочего объема шупа, при разности заданной температуры и температуры окружающей среды в пределах 20 °С, около 15 мин от момента первого включения. По истечении этого времени устройство готово к работе и выходное напряжение  $U_{вых}$  с ДХ можно считать с помощью модуля удаленного ввода РЕТ с точностью  $\pm 0,05$  %.

Элементы разработанной магнитной системы достаточно компактны. Корпус термостабильного шупа имеет размеры 50 × 50 × 50 мм, что позволяет легко помещать его в измеряемое магнитное поле. Индивидуальный блок

базовый ток через токоограничивающий резистор  $R_{VT}$  открывает транзистор VT1, вследствие чего начинается нагрев резисторов  $R_n$  из-за протекающего через них тока. Одновременно загорается включенный в коллекторную цепь светодиода VD1, индицирующий, что идет процесс нагревания. По мере повышения температуры нагревающих резисторов  $R_n$  возрастает температура рабочего объема внутри пенопластового стакана термостабильного шупа и, естественно, идет нагревание терморезистора  $R_t$  и ДХ. Потенциал на неинвертирующем входе компаратора уменьшается и в момент превышения заданной температуры оказывается ниже, чем на

термостабилизации и питания собран в пластиковом корпусе с размерами  $90 \times 50 \times 32$  мм и размещается непосредственно рядом с измеряемым электромагнитом. Модуль РЕТ и разводка питающих кабелей от БП  $\pm 15$  В расположены в металлическом ящике с размерами  $200 \times 300 \times 150$  мм, закрепленном на стене в зале канала транспортировки возле поворотных электромагнитов.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

При проведении сеанса протонной терапии на пучке фазотрона задействован медицинский канал транспортировки пучка с фокусирующими квадрупольными линзами и с четырьмя поворотными электромагнитами (СП37, СП10, СП57, СП56). Электромагниты размещены в зале канала транспортировки, между главным залом ускорителя и процедурной кабиной. Термостабильные щупы закреплены на корпусах электромагнитов, ДХ сориентированы в пространстве перпендикулярно линиям магнитного поля для обеспечения максимальной чувствительности измерений. Расположение щупов в магнитном поле выбрано в области периферии поля в рабочей плоскости электромагнита, так чтобы не превышать максимальный предел измеряемой магнитной индукции датчика, равный 800 Гс. Например, для измерения магнитного поля электромагнита СП56 с максимальной индукцией магнитного поля в центре, равной 5000 Гс, щуп расположен в рабочей плоскости электромагнита на расстоянии 430 мм от его центра. Точки крепления и расположения щупов были подобраны экспериментальным путем.

Для обработки данных с ДХ, поступающих от модуля РЕТ по интерфейсу Ethernet на ПК, было разработано программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW. На рис. 4 представлена лицевая панель созданного виртуального прибора HallDetector.exe.

Виртуальный прибор отображает данные в виде таблицы, строки которой относятся к измеряемым электромагнитам СП37, СП10, СП57 и СП56. Последовательность магнитов выбрана по ходу прохождения пучка в канале. Также указаны названия питающих мотор-генераторов соответствующих электромагнитов. При отсутствии магнитного поля (электромагнит выключен) индикатор в колонке ВКЛ «горит» красным цветом, данные с ДХ не отображаются. При появлении магнитного поля (электромагнит включен) индикатор ВКЛ «загорается» зеленым цветом, что отображает готовность системы к работе. В колонке «Установка» расположены терминалы ввода значений напряжений для электромагнитов в мВ. Данные значения при запуске программы автоматически считываются из файла данных в формате xml и соответствуют рабочим напряжениям на измерительных шунтах магнитов, при которых происходит вывод пучка из ускорителя по каналу транспортировки в процедурную кабину. При этих значениях профили и пробег вы-

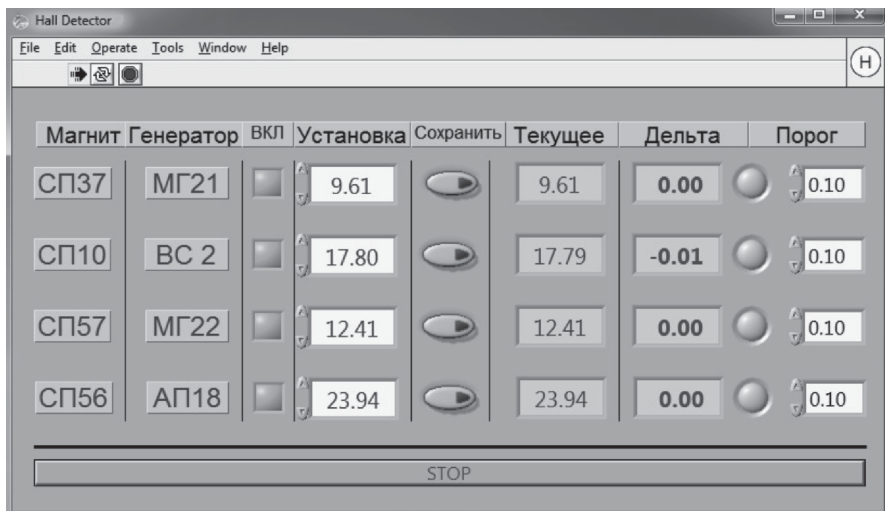


Рис. 4. Лицевая панель созданного виртуального прибора HallDetector

веденного протонного пучка, полученные с помощью системы контроля на основе многопроволочных ионизационных камер и полупроводниковых диодов, считаются «эталонными», т.е. соответствуют тем параметрам, которые были заложены в компьютерную программу планирования протонного облучения [1]. В процессе работы программы HallDetector есть возможность вручную изменять значения напряжений на измерительных шунтах, а также сохранять новые данные в файле xml с помощью кнопок в колонке «Сохранить». В колонке «Текущее» отображаются измеренные в реальном режиме времени с частотой 10 Гц данные с ДХ (прямо пропорциональные уровням магнитной индукции), преобразованные в значения напряжений на измерительных шунтах электромагнитов в мВ. Коэффициенты преобразования данных с ДХ в напряжения электромагнитов были подобраны для каждого магнита опытным путем. Далее, программа рассчитывает отклонения текущих показаний от установленных и результат выводит в колонку «Дельта». Эти отклонения указывают, как следует откорректировать ток электромагнита (и тем самым напряжение на измерительном шунте) для восстановления его корректной работы. В колонке «Порог» выставляются пределы отклонений значений из колонки «Дельта», при превышении которых срабатывают индикаторы («загораются» красным цветом) и звуковая тревога. В данной ситуации необходимо отключить ускоритель и провести корректировку токов отклонившихся магнитов. Обычно значение отклонений в колонке «Дельта» для всех магнитов выбирается равным 0,1 мВ. Если в процессе работы наблюдаются более значительные отклонения, но при этом система контроля



пучка регистрирует «эталонные» параметры, следует откорректировать соответствующие значения напряжений в колонке «Установка» и сохранить их в файле данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная многоканальная система магнитных измерений успешно прошла технические испытания и на сегодняшний день регулярно применяется в сеансах протонной терапии в Медико-техническом комплексе ЛЯП ОИЯИ. Система позволяет быстро и с достаточной точностью отслеживать отклонения магнитной индукции поворотных электромагнитов канала транспортировки пучка, определяет степень этих отклонений от номинальных значений, сообщает тревожными сигналами и индикацией о критическом превышении выставленных уровней предельных отклонений, тем самым обеспечивая требуемую «гарантию качества» лучевого лечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Аганов А. В. и др.* Методика трехмерной протонной лучевой терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 6(129). С. 80.
2. *Будяшов Ю. Г. и др.* Система контроля параметров протонного пучка при радиотерапии // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 1(130). С. 101.
3. *Fraas F. et al.* Quality Assurance for Clinical Radiotherapy Treatment Planning // Report of AARM Radiation Therapy Committee Task Group №53. USA: Medical Physics. 1998. V. 25.
4. <https://sensing.honeywell.com/>
5. <http://www.icpdas.com/>

Получено 7 апреля 2017 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 31.05.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 215 экз. Заказ № 59127.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)