

P13-2001-201

Д.В.Дедович, В.В.Журавлев, С.А.Котов, С.И.Мерзляков,  
И.Н.Потрап, А.И.Руденко, Г.А.Шелков

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ  
СИГНАЛЬНОЙ ПРОВОЛОЧКИ  
В ДРЕЙФОВЫХ ТРУБКАХ**

# 1 Введение

Современное развитие техники проволочных детекторов во многом диктуется повышением требований к точности измерения координат. Одним из ключевых параметров, без знания которого невозможно точное определение координат, является натяжение анодной проволоки. Натяжение определяет электростатическую устойчивость и поправки к положению проволочек, обусловленные их электростатическим отклонением и гравитационным провисом. Вследствие этого соответствие натяжения заданной величине и его неизменность со временем являются важным критерием качества изготовления высокоточных проволочных детекторов.

В данной работе описывается прибор, разработанный для контроля натяжения проволочек на участке по сборке дрейфовых трубок повышенного давления для мюонной системы эксперимента АТЛАС [1] (LHC, CERN).

Дрейфовая трубка (ДТ) представляет собой алюминиевую трубу диаметром 30 мм и длиной до 6 метров, вдоль оси которой с высокой точностью (10 мкм) натянута 50 мкм позолоченная вольфрамовая нить (2,7% Re). Согласно техническим требованиям, при номинальном значении 350 г, натяжение должно измеряться с точностью 1 г, или 0,3 %. Условия массового производства (до 100 трубок в день) также накладывают ряд требований. Измерение должно быть быстрым, проводиться автоматически, как часть процедуры сборки трубок, крайне желательно не использовать высокое напряжение, и, поскольку сборка проводится в чистой термостабилизированной комнате, желательно также максимально снизить количество дополнительного оборудования (крейт САМАС, осциллоскоп и т.п.) в целях сохранения чистоты и минимизации тепловыделения.

## 2 Принципы измерения натяжения проволочек

Существующие методы измерения натяжения анодной проволочки в различных проволочных детекторах обычно используют связь между величиной натяжения проволочки и основной частотой ее свободных колебаний:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\tau}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота колебаний;  $L$ ,  $T$ ,  $\tau$  – длина, натяжение и линейная плотность проволочки.

В приведенных работах [2-8] вынужденные колебания проволочки возбуждаются под действием внешней периодической силы. Амплитуда колебаний или их фаза наблюдаются как функция от частоты внешнего воздействия. При совпадении этой частоты и собственной частоты проволочки амплитуда колебаний близка к максимальной, а сдвиг фаз равен  $\frac{\pi}{2}$ . Для возбуждения колебаний используются электростатический (если подавать переменное напряжение на электроды), электромагнитный (если пропускать по проволочке, помещенной в магнитное поле, ток звуковой частоты) или механический (вибратором или звуковыми волнами) способы. Колебания проволочки, в свою очередь, могут наблюдаться визуально, по изменению импеданса проволочки, либо по ЭДС, наведенной на проволочке в результате колебаний в магнитном поле.

Такие методы хорошо разработаны, но получить с их помощью точность лучше 0,5% достаточно сложно. Это связано с тем, что на результат измерений может влиять форма возбуждающих колебаний. Кроме того, существенное влияние оказывает затухание, сдвигающее максимум амплитудного отклика в сторону меньших частот. В частности, в работе [9] показано, что для достижения высокой точности необходимо вводить эмпирические поправки, зависящие от амплитуды колебаний, что не всегда приемлемо.

Исходя из этого, для достижения поставленных целей мы выбрали другую методику, элементы которой использовались в работах [10,11], главное отличие которой заключается в том, что наблюдаются не вынужденные, а свободные колебания проволоочки. Проволочка помещается в постоянное магнитное поле, и ее колебания возбуждаются серией импульсов тока. Затем подача возбуждающих импульсов прекращается, а ЭДС, наведенная на проволочке в результате свободных затухающих колебаний в магнитном поле, усиливается и оцифровывается. Для определения спектрального состава колебаний полученные данные анализируются с помощью преобразования Фурье, после чего определяется основная гармоника этих колебаний. Использование именно свободных затухающих колебаний и фурье-анализа позволяет практически полностью устранить влияние затухания и способа возбуждения колебаний (может меняться соотношение амплитуд гармоник и ширина пиков в спектре, но не их положение). Более того, благодаря дискретности спектра свободных колебаний, с помощью данного метода можно получать корректные результаты при предельно низкой (сравнимой с шумом) амплитуде сигнала, возбужденного в проволочке.

### 3 Конструкция прибора

При разработке прибора основной идеей было стремление максимального использования промышленно выпускаемых электронных блоков и возможностей современных ПК и, как результат, сведение к минимуму как количества, так и стоимости специально изготовляемого оборудования.

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. Центральный элемент схемы - плата расширения ПК CIO-DAS08 (7), включающая в себя 8-канальный 12-битный АЦП и цифровой вход/выход. Сигнальная проволочка (2), над центральной частью которой помещен подковообразный постоянный магнит (5), через миниатюрное реле (6А) подключается либо к источнику постоянного тока, либо ко входу усилителя (6В) и одному из каналов АЦП платы CIO-DAS08. Состояние реле и ток через проволочку задаются программно через цифровые выходы платы. Подавая и убирая логическую единицу на управляющий контакт реле, соединяющего проволочку с источником постоянного тока, можно формировать возбуждающие импульсы нужной частоты и длительности. Таким образом, возбуждающая последовательность импульсов полностью задается программно, что позволяет легко адаптировать работу прибора к конкретным условиям.

Изначально для проведения измерений использовался следующий алгоритм работы. Сначала на проволочку подавалась последовательность коротких (2 мс) импульсов с увеличивающейся частотой, между импульсами сигнал оцифровывался и находилась его амплитуда. Таким образом грубо определялась частота, соответствую-

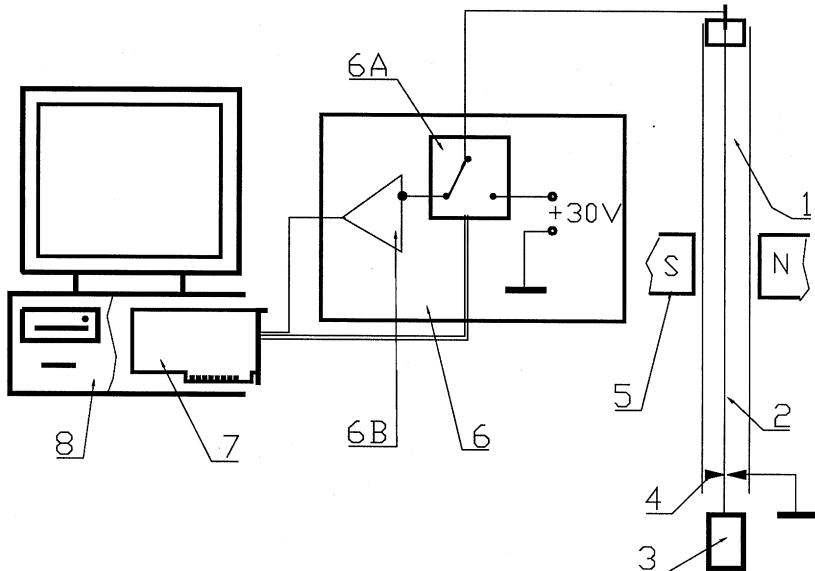


Рис. 1. Блок-схема прибора и стенда для его тестирования: 1 – установленная вертикально тестовая трубка; 2 – анодная провололка, протянутая по оси трубки и жестко закрепленная на верхнем конце, где в точке крепления обеспечен электрический контакт для подключения к прибору; 3 – груз, определяющий натяжение провололки; 4 – скользящий контакт, ограничивающий рабочую длину провололки и заземляющий ее; 5 – подковообразный постоянный магнит; 6 – блок электроники; 6А – реле; 6В – усилитель; 7 – плата CIO-DAS08, включающая в себя 8-канальный 12-битный АЦП и цифровой вход/выход; 8 – персональный компьютер

ющая максимальной амплитуде колебаний. Далее провололка возбуждалась серией импульсов с найденной частотой, после чего считывался и оцифровывался сигнал, наведенный на провололке в результате свободных колебаний в магнитном поле. С помощью быстрого преобразования Фурье определялся спектральный состав сигнала и выделялся пик, соответствующий первой гармонике свободных колебаний. Типичный сигнал и спектр, ему соответствующий, приведены на рис. 2: хорошо видны пики первой и третьей гармоник колебаний, а также заметен 50 Гц пик наводок от цепей питания.

В дальнейшем для использования в серийном производстве была написана программа на LabVIEW, которая работает по слегка измененному алгоритму: поскольку от трубки к трубке частота варьируется совсем незначительно и известна заранее с хорошей точностью, можно исключить из алгоритма ее предварительное определение и возбуждать колебания во всех трубках импульсами одинаковой частоты. Помимо

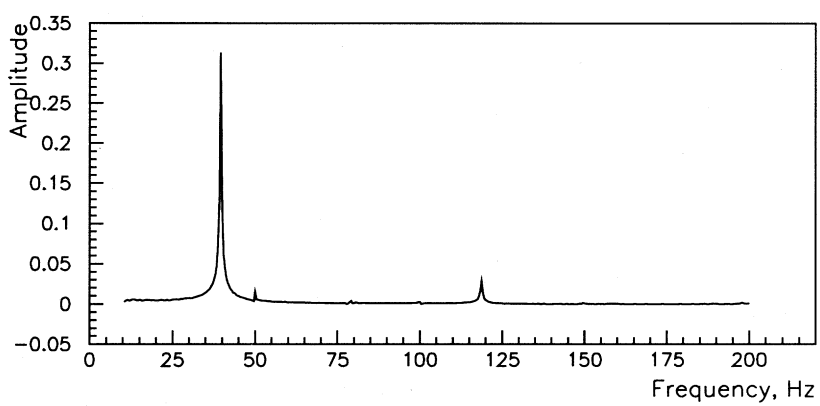
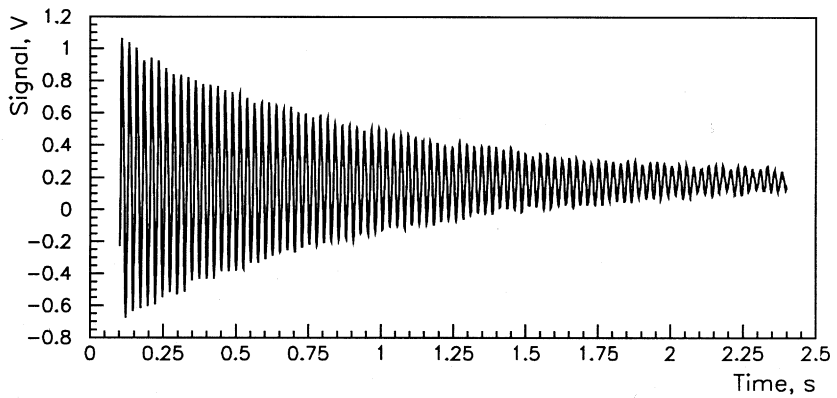


Рис. 2. Форма сигнала с проволочки (вверху) и его фурье-образ (внизу)

этого, новая программа использует резонансную кривую затухающих колебаний<sup>1</sup> для фитирования пиков в спектре преобразования Фурье. На рис. 3 приведен вид панели LabVIEW программы с типичным измерением.

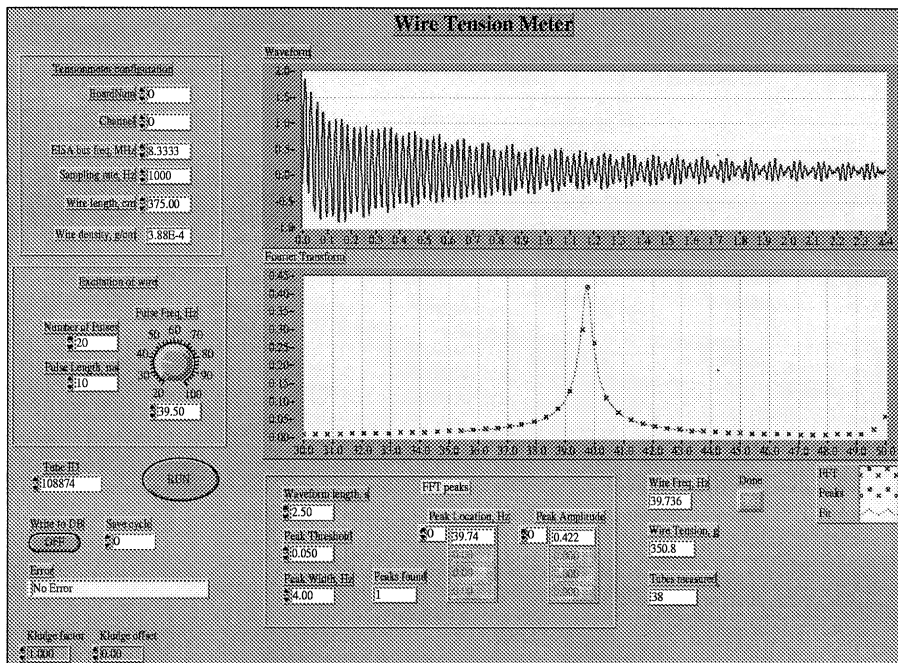


Рис. 3. Вид панели LabVIEW программы для измерения натяжения проволоочки с типичным измерением

Принципиальная схема приведена в приложении. Прибор использует один канал АЦП, 4 бита логического входа/выхода и питание +5В платы CIO-DAS08. Дополнительных блоков, в том числе источников питания, не требуется. Свободные каналы платы могут быть использованы для других целей (в нашем случае они используются для мониторинга параметров среды).

## 4 Результаты испытаний

Для определения характеристик прибора была проведена серия испытаний, в которой измерялась зависимость измеренной основной частоты колебаний проволоочки от ее натяжения. Результаты этих измерений показаны на рис. 4 вверху, где сплошная линия – аппроксимация функцией вида  $T \propto \nu^2$ . Нижний рисунок – распределение

<sup>1</sup> Функция вида  $f = 1/\sqrt{(\nu^2 - \nu_0^2)^2 + (2\gamma\nu)^2}$ , где  $\nu$  – частота колебаний,  $\nu_0$  – резонансная частота,  $\gamma$  – коэффициент затухания.

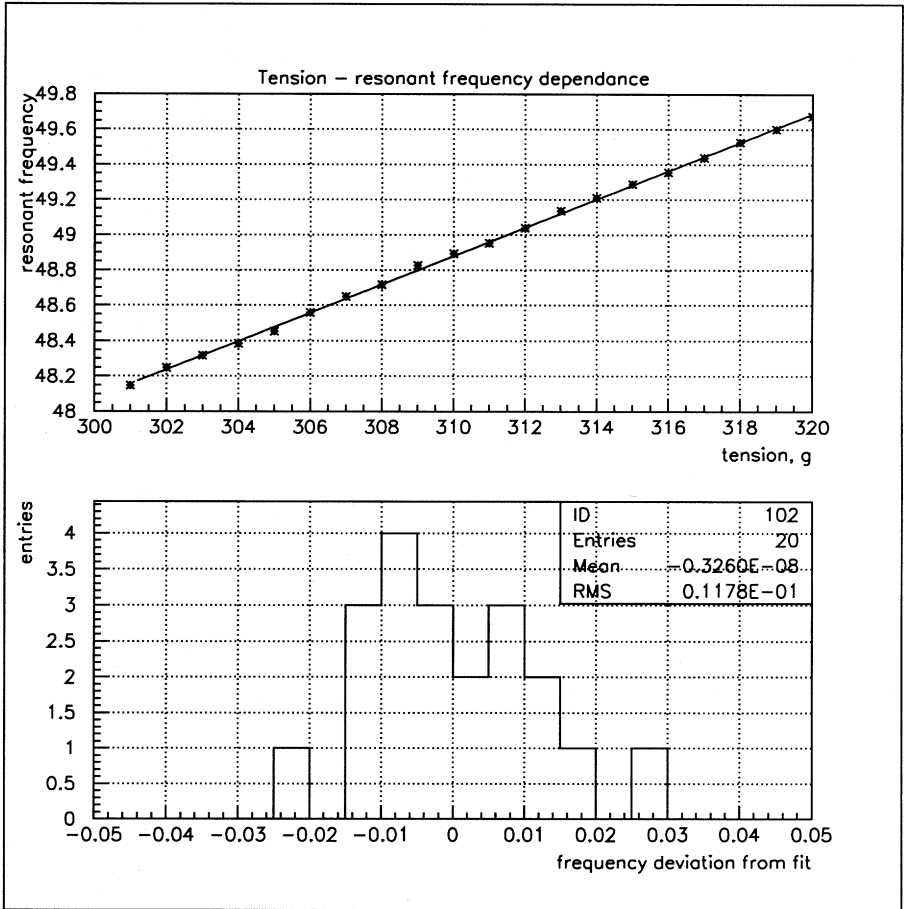


Рис. 4. Вверху – зависимость измеренной основной частоты от натяжения проволочки, где сплошная линия – аппроксимация функцией вида  $T \propto \nu^2$ . Внизу – распределение отклонений отдельных измерений от аппроксимирующей функции

отклонений отдельных измерений от аппроксимирующей функции. Как видно, случайная ошибка отдельного измерения 0,01 Гц, то есть 0,02 % для частоты или 0,04 % для натяжения. Сюда входят как ошибка собственно измерений, так и погрешность, вносимая обработкой.

Прибор предназначался прежде всего для измерения натяжения в отдельных трубках, но мы также проверили возможность его использования для измерения натяжения проволочек в собранной камере, когда магнит невозможно вплотную приблизить к трубке, а также при увеличении давления газа внутри ДТ до рабочего давления 3 атм. Измерение при повышенном давлении позволяет также оценить влияние затухания на точность прибора. Результаты этих измерений показаны в таблице, где мы представили средние значения и RMS для серий измерений, проведенных для трех слоев трубок в камере и для повышенного давления. При измерении с повышенным давлением трубка находилась в третьем слое камеры, то есть в наиболее неблагоприятных для измерения условиях.

Воспроизводимость результатов при различных условиях

Условия	Глубина, см	$\langle \nu \rangle$ , Гц	RMS, мГц	$\frac{RMS}{\langle \nu \rangle}$ , %
1-й слой камеры (1 атм)	1,5	43,58	9,8	0,022
2-й слой камеры (1 атм)	3,2	43,20	5,6	0,013
3-й слой камеры (1 атм)	5	43,83	20,2	0,046
3-й слой камеры (3 атм)	5	43,86	29,1	0,066

Уже более полутора лет описываемый прибор используется для проверки натяжения проволочки в дрейфовых трубках, производимых для мюонной системы детектора АТЛАС на специализированном производственном участке в НЭОВП ЛЯП, а также на аналогичных участках в Салониках (Греция) и Фрайбурге (Германия). На рис. 5 показаны результаты измерения натяжения проволочки в более чем 13500 дрейфовых трубках, сделанных в ОИЯИ (разброс по натяжению обусловлен не погрешностями в его измерении, а точностью, с которой автоматизированная линия по производству трубок натягивает проволочку, и тем, что проволочка на разных катушках имеет слегка различающуюся линейную плотность).

## 5 Заключение

Предложенный прибор позволяет автоматически с высокой точностью измерять натяжение сигнальных проволочек дрейфовых трубок и пригоден для контроля качества ДТ в условиях их серийного производства. Использование в основе конструкции стандартного блока массового производства значительно удешевляет прибор и упрощает его изготовление, а вынесение основных управляющих функций на программный уровень позволяет легко адаптировать его к конкретным условиям.

Авторы благодарны профессору Н. Vallenstain из Бостонского университета за плодотворное обсуждение.



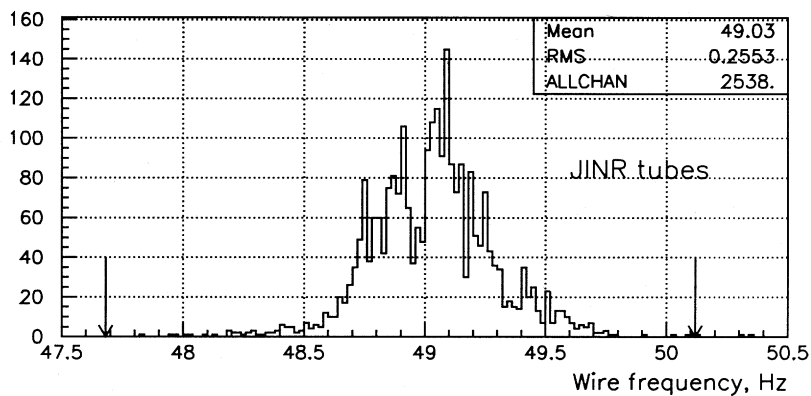
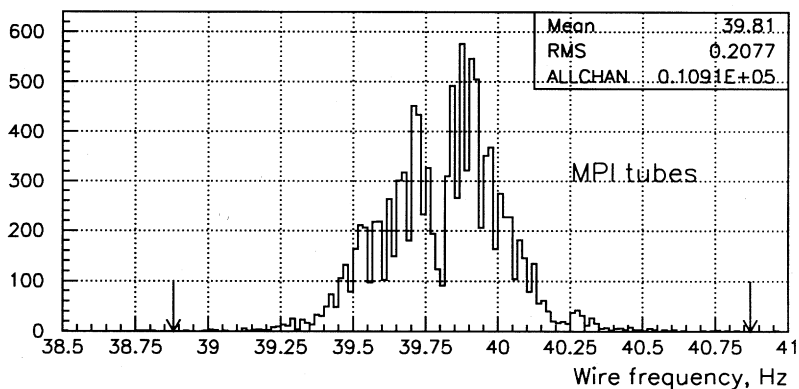


Рис. 5. Распределение результатов измерения натяжения проволочки в дрейфовых трубках, произведенных в ОИЯИ (стрелками показаны критерии допуска для детектора АТЛАС)

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Принципиальная электронная схема измерителя натяжения

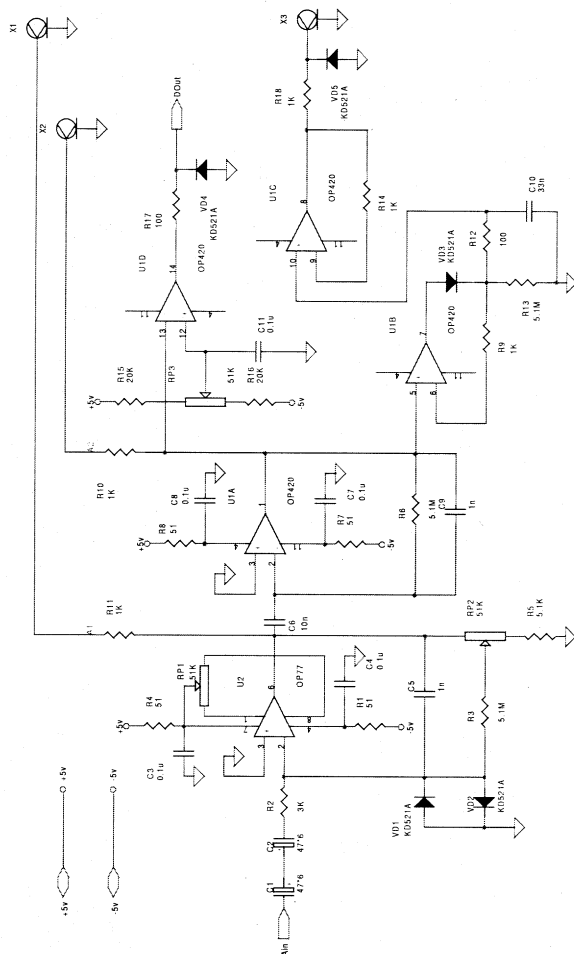


Рис. 6. Аналоговая часть

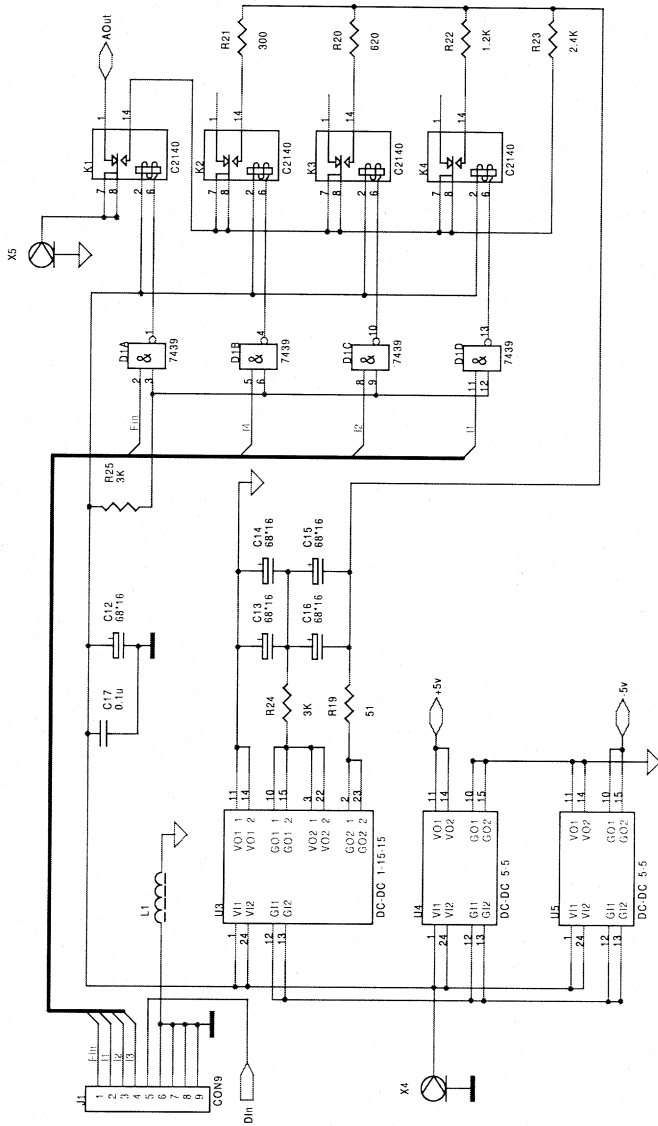


Рис. 7. Цифровая часть

## Список литературы

- [1] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report CERN LHCC 97-22
- [2] A.Borghesi et al. Nucl. Instr. Meth. **A 153**(1978) 379-381
- [3] M.Cavalli-Sforza et al. Nucl. Instr. Meth. **A 124**(1975) 73-82
- [4] R.Stepherson et al. Nucl. Instr. Meth. **A 171**(1980) 337-338
- [5] Y.Asano et al. Nucl. Instr. Meth. **A 254**(1987) 35-43
- [6] S.Bhadra et al. Nucl. Instr. Meth. **A 269**(1988) 33-39
- [7] M.Calvetti et al. Nucl. Instr. Meth. **A 174**(1980) 285-289
- [8] S.A.Roth et al. Nucl. Instr. Meth. **A 369**(1996) 215-221
- [9] D.Carlsmith, S.Lusin Nucl. Instr. Meth. **A 364**(1995) 79-89
- [10] B. Brinkley et al. Nucl. Instr. Meth. **A 373**(1996) 23-29
- [11] K.Lang et al. UTEXAS-HEP-98-5

---

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 сентября 2001 года.

Дедович Д.В. и др.

P13-2001-201

Прибор для измерения натяжения сигнальной проволоки  
в дрейфовых трубках

Представлен прибор для измерения натяжения проволоки в проволочных детекторах. Принцип его работы состоит в возбуждении колебаний сигнальной проволоки импульсами тока в постоянном магнитном поле и определении основной частоты ее свободных колебаний путем фурье-анализа. Прибор позволяет измерять натяжение проволоки как в отдельных трубках, так и в собранных из них камерах. Точность прибора лучше 0,05 %, время измерения не более 5 секунд.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

#### Перевод авторов

Dedovich D.V. et al.

P13-2001-201

Device for Measuring of Wire Tension in Drift Tubes

A device for measuring the wire tension in wired detectors is presented. Its operational principle consists in the excitation of the signal wire oscillations in magnetic field with current pulses followed by determination of the main frequency of the wire free oscillations using Fourier analysis. The device allows to measure the wire tension both in separate drift tubes and in chambers assembled of them. The measurement accuracy is better than 0.05 %, and the measurement time is less than 5 seconds.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 19.10.2001  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,88  
Тираж 325. Заказ 52913. Цена 88 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области