

УДК 621.384.6

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК ТОКА ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

**А.Ф. Дьяченко**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»*

*Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1*

*E-mail: [dyachenko@kipt.kharkov.ua](mailto:dyachenko@kipt.kharkov.ua)*

Поступила в редакцию 5 февраля 2010 г.

Рассмотрены основные методы измерения тока пучка ускорителя: контактный, высокочастотный и индукционный методы. Удобный, точный и наиболее распространенный бесконтактный метод измерения тока пучка основан на использовании явления электромагнитной индукции. Обычно это тороидальный сердечник из феррита или тонколистового магнитного сплава (пермаллой), на который наматывается обмотка. Индукционный датчик легко градуируется с помощью калибровочного витка, по которому пропускается известный ток. Применение сердечника из аморфного нанокристаллического сплава, магнитная проницаемость которого достигает нескольких десятков тысяч, и современных помехоустойчивых электронных схем позволило разработать высокочувствительный индукционный пролетный датчик тока пучка линейного ускорителя тяжелых ионов (нижний предел измеряемого тока 1 мкА).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** индукционный датчик, линейный ускоритель тяжелых ионов, ток пучка, электронные устройства.

## THE HIGH-SENSITIVITY INDUCTION BUNCH CURRENT GAUGE OF THE HEAVY IONS LINAC

**A.F. Dyachenko**

*National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology»*

*Ukraine, 61108, Kharkov, Academicheskaya st., 1*

The basic measurement techniques of the accelerator bunch current: contact, high-frequency and induction methods are considered. The suitable, exact and most widespread bunch current measuring method is based on use of an electromagnetic induction effect. Usually it is the toroidal core from ferrite or thin-sheet magnetic alloy (permalloy) on which the winding is reeled up. The induction gauge is easily graduated by means of calibration coil on which the known current is passed. Use of the core from amorphous nanocrystal alloy which magnetic permeability reaches several tens thousand and modern noise-immunity electronic schemes has allowed to develop the high-sensitivity induction flying bunch current gauge of the heavy ions linac (the bottom limit of a measured current 1  $\mu$ A).

**KEY WORDS:** induction gauge, heavy ions linac, bunch current, electronic schemes.

## ВИСОКОЧУТЛИВИЙ ІНДУКЦІЙНИЙ ДАТЧИК СТРУМУ ПУЧКА ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ВАЖКИХ ІОНІВ

**О.Ф. Д'яченко**

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»*

*Україна, 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1*

Розглянуто основні методи вимірювання струму пучка прискорювача: контактний, високочастотний та індукційний методи. Зручний, точний і найпоширеніший метод вимірювання струму пучка заснований на використанні явища електромагнітної індукції. Зазвичай це тороїдне осердя з фериту або тонколистового магнітного сплаву (пермалой), на який намотується обмотка. Індукційний датчик легко градується за допомогою калібрувального витка, по якому пропускається відомий струм. Використання осердя з аморфного нанокристалічного сплаву, магнітна проникність якого досягає декількох десятків тисяч, і сучасних заводостійких електронних схем дозволило розробити високочутливий індукційний пролітний датчик струму пучка лінійного прискорювача важких іонів (нижня межа вимірюваного струму 1 мкА).

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** індукційний датчик, лінійний прискорювач важких іонів, струм пучка, електронні пристрої.

На Харьковском линейном ускорителе многозарядных ионов (ЛУМЗИ) проводятся экспериментальные исследования с пучками ионов легких элементов (до Ar включительно). В настоящее время в предобдирочной секции ионы могут ускоряться до энергии 1 МэВ/нуклон и в основной секции – до 8,5 МэВ/нуклон, диапазон изменения тока пучка: от нескольких десятков миллиампер до одного микроампера в импульсе длительностью 750 мкс (при нескольких посылках в секунду). Для настройки систем всего ускорительного тракта и проведения прецизионных исследований необходимо универсальное измерительное устройство для определения тока пучка, которое можно было бы использовать на всех контролируемых участках: после ионного источника, между предобдирочной и основной секциями и на выходе ускорителя.

Цель работы – создание универсального измерительного устройства для определения тока пучка линейного ускорителя тяжелых ионов на основе применения материалов с высокой магнитной проницаемостью и современных электронных устройств.

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ

Для того, чтобы выбрать наиболее приемлемый для нашего случая вариант измерительного устройства,

проанализированы основные методы измерения тока пучка ускорителя: контактный и бесконтактные (высоко-частотный и индукционный) методы.

Контактный метод, казалось бы, не только самый простой, но и самый надежный способ измерения тока пучка, поскольку основан на полном перехвате пучка заряженных частиц коллектором, который связан гальванически с усилительным и индикаторным устройствами. Однако это не так. Ускоренные частицы, попадая в коллектор, выбивают из него вторичные электроны, которые затем попадают на заземленные стенки ионопровода, внося заметную и трудно предсказуемую погрешность в результаты измерений. Не всегда помогает и выполнение коллектора в виде цилиндра Фарадея, представляющего собой металлический изолированный стакан, на днище которого попадает ускоренный пучок, а боковые стенки служат для перехвата вторичных электронов. Часть вторичных электронов все равно покидает такой цилиндр через его открытую входную горловину. Чтобы ослабить этот эффект, вход цилиндра перекрывают изолированной от него фольгой, прозрачной для основного пучка и непроницаемой для вторичных электронов (либо ставят так называемое охранное кольцо). Однако при этом сама фольга становится источником вторичных электронов, которые продолжают искажать результаты измерений даже при наличии на фольге специально поданного потенциала. При использовании цилиндров Фарадея от электронной аппаратуры не требуются очень высокие точность и стабильность, поскольку имеются методические погрешности, обусловленные вторичной эмиссией [1].

В бесконтактном высокочастотном методе измерения тока пучка используется цилиндрический резонатор, пронизываемый пучком вдоль его оси (рис. 1). Внутренний диаметр резонатора выбирается таким образом, чтобы его резонансная частота для колебания  $E_{010}$  (электрическое поле направлено по оси датчика, вариации поля по азимуту и вдоль оси отсутствуют) совпадала бы с частотой какой-либо гармоники тока пучка. Высота резонатора выбирается достаточно малой, чтобы размещение датчиков в межрезонаторных промежутках ускорителя не вызывало затруднений, и достаточно большой, чтобы чувствительность датчика обеспечила надежный прием и переработку выходного сигнала, возбуждаемого в выходном коаксиальном фидере с помощью петли связи ( $h = 1-3$  см). Резонаторный датчик позволяет измерять слабые токи с интенсивностью порядка нескольких микроампер [2]. Кроме того, такой датчик может быть многофункциональным устройством. Его основной недостаток – сложность градуирования: пучок невозможно заменить прямым эталонным имитатором ни во время наладки измерительной системы, ни в процессе ее эксплуатации, а косвенные методы недостаточно надежны из-за нестабильностей устройств, детектирующих выходной сигнал. Поэтому в большинстве случаев резонаторные датчики тока целесообразно применять только в сочетании с индукционными датчиками, используя последние для градуирования измерителей.

Удобный, точный и наиболее распространенный бесконтактный метод измерения тока пучка основан на использовании явления электромагнитной индукции [3–5]. В сущности, такой датчик представляет собой многовитковый соленоид, свернутый в тор, который охватывает измеряемый ток. При типичных значениях магнитной проницаемости  $\mu$  порядка нескольких тысяч (для ферритов), площади поперечного сечения сердечника  $S_c$  – нескольких квадратных сантиметров, а витков обмотки  $\omega$  – нескольких сот можно обеспечить чувствительность порядка единиц милливольт на миллиампер при спаде вершины на несколько процентов за 100 мкс. Для этого нагрузочное сопротивление надо выбирать в пределах от десятых долей до единиц килоом [1]. Следует отметить, что в конкретном датчике изменение  $\mu$  (за счет старения материала или из-за механических воздействий) никак не влияет на его чувствительность, а сказывается только на искажении формы импульса тока. Поэтому индукционный датчик удобно использовать как эталонный и по нему градуировать остальные датчики тока, работающие на других принципах.

Проанализировав достоинства и недостатки каждого из методов, возможность их использования в нашем конкретном случае, считаем, что именно индукционный датчик как измерительное устройство, не препятствующее прохождению пучка вдоль ускоряющего тракта, требует пристального внимания (с учетом наличия магнитных материалов, с  $\mu$  порядка нескольких десятков тысяч, и современных помехоустойчивых, высокочувствительных электронных схем).

### ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ПРОЛЕТНЫЙ ДАТЧИК ТОКА ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Тороидальный сердечник индукционного датчика из феррита или тонколистового магнитного сплава с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$  располагают таким образом, чтобы ось пучка совпадала с осью сердечника. На сердечник наматывают обмотку из  $\omega$  витков, нагруженную на сопротивление  $R$ , которое выбирается достаточно малым, для того чтобы считать обмотку короткозамкнутой. Тогда можно полагать, что произведение  $i\omega$ , где  $i$  – выходной ток датчика, примерно равно току пучка  $I_n$ . Таким образом, падение напряжения  $U$  на сопротивлении  $R$  равно

$$U = iR = I_n R / \omega, \quad (1)$$

а чувствительность датчика

$$s = U / I_n = R / \omega \quad (2)$$

определяется отношением нагрузочного сопротивления к числу витков рабочей обмотки.

Поскольку на практике требуется не только высокая чувствительность датчика, но и большая постоянная

времени  $\tau$ , которая определяет крутизну спада вершины прямоугольного импульса и рассчитывается по формуле

$$\tau = 2 \mu S_c \omega^2 / (c^2 R r_{cp}), \quad (3)$$

где  $r_{cp}$  – средний радиус тороида,  $c$  – скорость света, достоинства датчика можно охарактеризовать произведением

$$s \tau = 2 \mu S_c \omega / (c^2 r_{cp}), \quad (4)$$

которое уже не зависит от нагрузочного сопротивления  $R$  (с ростом  $R$  повышается чувствительность, но увеличивается спад вершины импульса). Чтобы повысить чувствительность датчика без ухудшения формы импульса, необходимо по возможности увеличивать  $\mu S_c \omega / r_{cp}$ . Нижний предел среднего радиуса  $r_{cp}$  и верхний предел сечения  $S_c$  определяются обычно конструктивными соображениями. Высокая магнитная проницаемость  $\mu$  обеспечивается соответствующим выбором магнитного материала. Число витков  $\omega$  не превышает нескольких сот, что зависит от нескольких причин.

С увеличением  $\omega$  начинает сказываться емкость между обмоткой и корпусом, из-за которой происходит затягивание переднего фронта прямоугольного импульса. А это приводит к необходимости повышать нагрузочное сопротивление  $R$ , чтобы не снизить чувствительность датчика (но ухудшаются ВЧ-свойства датчика и снижается помехозащищенность усилительного канала). Кроме того, с увеличением  $\omega$  возрастает омическое сопротивление обмотки, что приводит к искажению формы импульса. При многослойной намотке возрастает индуктивность рассеяния, что также приводит к ухудшению формы импульса в ВЧ-части спектра.

Для борьбы с помехами обычно используют такой довольно эффективный прием (рис. 2). Индукционный датчик (ИД) снабжен двумя одинаковыми обмотками, объединенными по схеме со средней точкой под нулевым потенциалом. Два одинаковых по значению, но противоположной полярности сигнала усиливаются в предварительных усилителях  $Y_1$  и  $Y_2$  и складываются в сумматоре  $C$  после инвертирования полярности одного из сигналов в ИП. В результате этого полезные сигналы складываются, а идентичные помехи, наводимые на два канала усиления, компенсируют друг друга. Бифилярная обмотка позволяет повысить пороговую чувствительность измерительной системы в несколько раз.

Для проведения экспериментальных исследований приобретен тороидальный сердечник с габаритными размерами  $85 \times 45 \times 40$  мм из аморфного нанокристаллического сплава с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu \sim 25$  тыс.), произведенный в Украине (г. Киев). Внутренний диаметр тороида 45 мм достаточен для диагностики тока пучка до или после ускорительных секций (максимальная апертура трубок дрейфа на ускорителе ЛУМЗИ 30 мм).

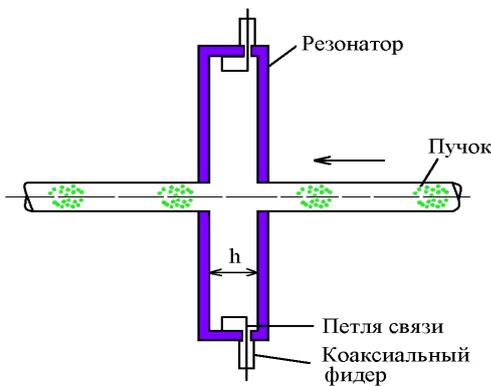


Рис. 1. Цилиндрический резонатор, возбуждаемый пучком

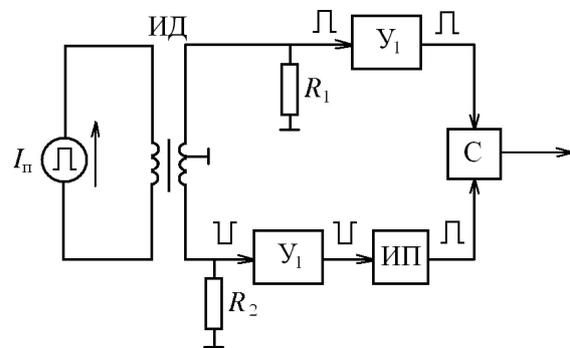


Рис. 2. Принципиальная схема, обеспечивающая компенсацию наводок в тракте усиления

Исходя из таких габаритных размеров тороида, проводилось дальнейшее конструирование корпуса датчика. Основное внимание при этом обращалось на надежное экранирование сердечника при необходимости сохранения возможности проникновения наводимого магнитного поля к катушке. На рис. 3 показан тороид с катушкой, покрытой изоляционным материалом. Для устранения наводок и помех сердечник помещен в электростатический стальной экран с небольшим разрезом (1–2 мм), обеспечивающим проникновение магнитного поля внутрь через капролоновую втулку, отделяющую сердечник от вакуумного канала. Корпус экрана состоит из двух аналогичных фланцев и опорного цилиндра, которые стягиваются с помощью шести шпилек. К опорному цилиндру с противоположных сторон подсоединяются измерительная схема в цилиндрическом экране и разъем для подачи калибровочного сигнала. На рис. 4 показаны элементы датчика перед сборкой, а на рис. 5 в собранном виде.

Поскольку датчик устанавливается в вакуумный тракт прохождения пучка, предусмотрены соответствующие переходные фланцы и изолирование измерительной схемы от общего заземления ускорителя. Проведены вакуумные испытания всей конструкции в сборе и калибровка устройства на различные токи: от 100 мА до 1 мкА. На рис. 6. приведены калибровочный (верхний) и измеренный (нижний) импульсы тока для 5 мкА.



Рис. 3. Сердечник с намотанной на него катушкой.

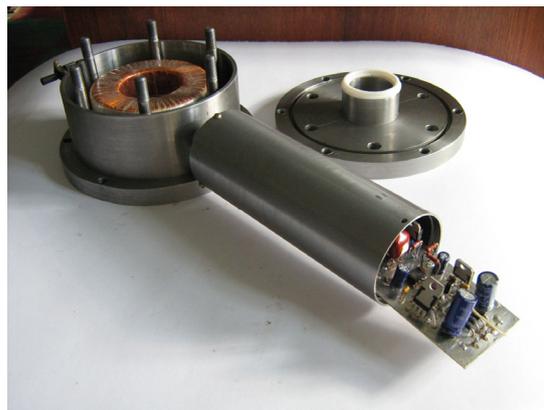


Рис. 4. Элементы датчика перед сборкой.



Рис. 5. Индукционный датчик с переходными фланцами для установки в вакуумном тракте ускорителя.

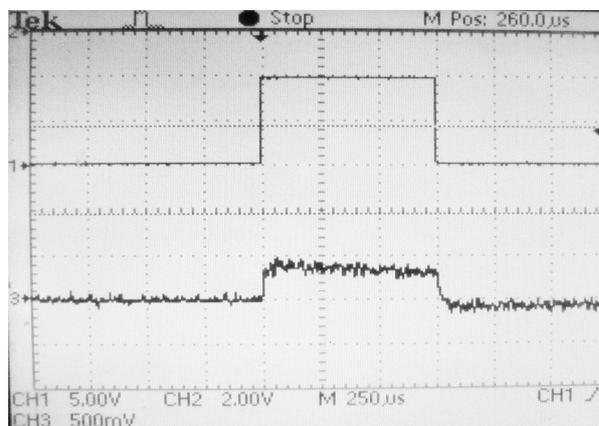


Рис. 6. Осциллограмма калибровочного (верхний) и измеренного (нижний) импульсов тока для 5 мкА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом преимуществ и недостатков рассмотренных методов измерения тока пучка для нашего конкретного случая разработан высокочувствительный индукционный пролетный датчик тока пучка линейного ускорителя тяжелых ионов, который охватывает весь диапазон измеряемых токов на ЛУМЗИ (с нижним пределом 1 мкА). Использование таких датчиков на всех необходимых участках ускорительного тракта существенно облегчит процесс вывода параметров ускорителя на максимальные значения токов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б.П. Мурин, В.Г. Кульман, Л.Г. Ломизе и др. Линейные ускорители ионов: в 2 т. Т. 2. Основные системы / Под ред. Б.П. Мурина. – М.: Атомиздат, 1978. – 320 с.
2. В.Н. Каллагов, Л.Г. Ломизе, Б.А. Рубцов, И.А. Сажин Измерение параметров пучка при помощи резонаторных датчиков // Труды Радиотехнического института. – 1973. – № 16. – С. 246–259.
3. О.К. Беляев, Ю.А. Буданов, И.А. Звонарев и др. Линейный ускоритель-инжектор Центра протонно-лучевой терапии: Препринт / ИФВЭ; 2008-6. – Протвино, 2008. – 19 с.
4. Design and construction of Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) and Mixed Phase Detector (MPD) / NICA-project, Conceptual project. – Дубна, 2006.
5. P. Reinhardt-Nikoulin, V. Gaidash, A. Menshov et al. Universal BCT Monitor for INR Proton Linac Pulse Beam // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. – 2006. – № 2 (46). – P. 113–114.