

Ускоряющая система линейного ускорителя протонов на средние энергии

С.К. Есин, А.С. Ковалишин, Л.В. Кравчук, П.Н. Остроумов,
В.В. Парамонов, Г.В. Романов, В.Л. Серов, С.А. Шараментов
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

N. Holtkamp, M. Nagl
DESY, Notkestraße 85, 22603 Hamburg, Germany

Введение

В рамках коллаборации ИЯИ РАН – DESY выполнена проектная работа по исследованию возможности развития линейного ускорителя-инжектора DESY Linac 3 [1]. Повышение энергии инжекции в синхротрон DESY 3 необходимо для ослабления ограничений пространственного заряда при инжекции и в целом направлено на повышение светимости комплекса HERA. Ускоряющая система существующего ускорителя Linac 3 состоит из трех резонаторов с трубками дрейфа на частоте 202,56 МГц и выходной энергией ионов H^- 50 МэВ. Ток пучка ионов равен 20 мА при длительности импульса 30 мкс и частоте повторения 1 Гц. На месте существующей линии транспортировки пучка длиной ≈ 33 м предлагается разместить дополнительную ускоряющую систему на частоте 810,24 МГц, что позволит ускорять ионы H^- до энергии 160 МэВ.

Основные характеристики

При разработке проекта модернизации Linac 3 принимались во внимание следующие противоречивые требования:

- необходимость обеспечения максимального прироста энергии при ограниченной длине ускоряющей структуры;
- требования динамики частиц;
- стоимость проекта;
- апробированность предлагаемых решений и доступность вспомогательного оборудования.

По сравнению с ускоряющей структурой Linac 3 необходимость получения более высокого темпа ускорения требует большей величины максимального электрического поля E_{smax} на поверхности ускоряющей структуры, т.е. более высокой рабочей частоты. Условия согласования продольного движения ускоряемых частиц при относительно низкой энергии перехода (50 МэВ) не позволяют выбрать большую кратность частот существующей и предлагаемой систем. При фиксированном диаметре апертуры, что определяется требованиями поперечного движения частиц, эффективность ускоряющих структур слабо зависит от рабочей частоты в диапазоне 600 ÷ 1000 МГц. Более широкий ассортимент клистронов для системы ВЧ-питания доступен при более высокой рабочей частоте.

В результате проведенных исследований частота 810,24 МГц выбрана как разумный компромисс, удовлетворяющий всем предъявляемым требованиям. Учитывая опыт разработки и эксплуатации линейного ускорителя FNAL [2], E_{smax} ограничено величиной 36,1 МВ/м, что соответствует $1,35E_k$. Здесь E_k – предел Килпатрика, равный 26,1 МВ/м на указанной частоте.

Ускоряющая система состоит из согласующего и трех ускоряющих резонаторов, каждый из которых запитывается от отдельного ВЧ-канала. Согласующий резонатор представляет собой одну ячейку структуры, примененной в первом ускоряющем резонаторе. Ускоряющие резонаторы разделены на секции с постоянной фазовой скоростью. Элементы фокусирующей системы, датчики системы диагностики и вакуумные затворы размещены в межсекционных и межрезонаторных промежутках. Длины межсекционных промежутков выбраны равными $2\beta\lambda$ в первом резонаторе и $3\beta\lambda/2$ – во втором и третьем. Объединение секций в резонатор осуществляется мостовыми устройствами с рабочим колебанием TE_{10n} [3], успешно примененными в основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН. Данные мостовые устройства просты в изготовлении, не имеют высших мод в окрестности рабочей точки и могут обеспечивать сдвиг фазы поля между секциями как π , так и 2π . Основные характеристики ускоряющей системы приведены в таблице 1.

Таблица 1: Основные характеристики УС.

Параметр	Резонатор 1	Резонатор 2	Резонатор 3
Начальная энергия, МэВ	50	85.412	119.86
Конечная энергия, МэВ	85.412	119.86	159.75
Длина резонатора, м	10.630	9.112	10.084
Тип структуры	OCSDTL	OCS	OCS
Число секций в резонаторе	10	6	6
Число ячеек в резонаторе	40	96	96
Радиус апертуры, см	1.5	1.5	1.5
Полная ВЧ-мощность, МВт	9.0	8.5	9.0
ВЧ-потери, МВт	8.29	7.82	8.2

1. Ускоряющая структура

Диапазон энергий ионов $H^-50 \div 100$ МэВ является переходным с точки зрения эффективности ускоряющих структур. Для применения в данном ускорителе рассматривались как структура с трубками дрейфа, так и бипериодические структуры. Проведенные исследования показали, что применение структуры с трубками дрейфа неэффективно из-за резкого снижения ее эффективного шунтового сопротивления Z_e при энергии ионов > 100 МэВ. Для бипериодических структур величина Z_e низка в области энергий до 90 МэВ, и в этой области их необходимо применить в модификации с промежуточной трубкой дрейфа, размещенной в середине ускоряющей ячейки [4].

Для обеспечения равномерного распределения ускоряющего поля в длинном резонаторе, содержащем 96 ускоряющих ячеек, коэффициент связи в структуре k_c должен быть не менее $8 \div 10\%$. В хорошо известной структуре с боковыми ячейками такое увеличение k_c сопровождается падением Z_e .

В рассматриваемом диапазоне энергий все бипериодические структуры имеют приблизительно равное шунтовое сопротивление, но для такого короткого ускорителя (232 ячейки) удельные затратами на изготовление для структуры с шайбами и

диафрагмами выше. Кроме того, в модификации структуры с промежуточными трубками дрейфа недостаточно проработаны методы смещения паразитных колебаний.

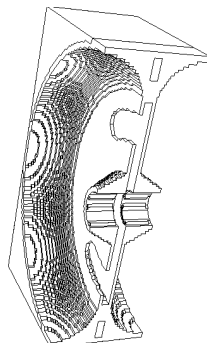


Рис. 1: Структура с внутренними ячейками связи.

Для данного проекта рекомендована структура с внутренними ячейками связи (рис. 1), хорошо известная по применениям в линейных ускорителях электронов. Оптимизация структуры с учетом особенностей проекта позволила повысить k_c до 15% при незначительном ($5 \div 7\%$) понижении Z_e из-за влияния щелей связи. Сокращение общей протяженности ячейки связи и перегородок между ячейками привело к повышению Z_e . В первом резонаторе структура приведена в модификации с промежуточной трубкой дрейфа, $k_c = 10\%$. Зависимость расчетной величины Z_e с учетом влияния щелей связи, неидеальной поверхности ($-5\%Z_e$) и штанг в модифицированном варианте (OCSDTL), а также график зависимости максимально допустимого градиента ускоряющего поля E_oT показаны на рис. 2.

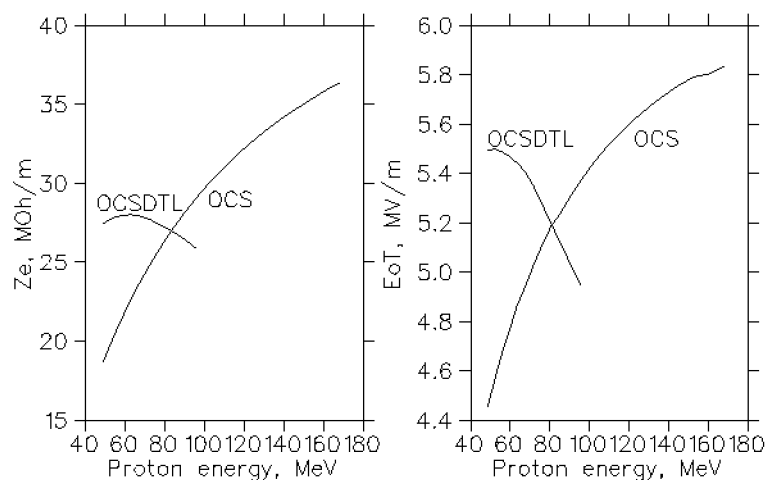


Рис. 2: Графики зависимостей Z_e (a) и E_oT (b) от энергии ионов H^- для предложенной ускоряющей структуры.

В предложенном варианте структура уступает структуре с боковыми ячейками по величине Z_e не более чем на $2 \div 4\%$, но имеет в 3 раза более высокий k_c и сохраняет свои неоспоримые технологические преимущества. Более подробно структура рассмотрена в работе [5].

2. Система ВЧ-питания

Учитывая малую величину средней ВЧ-мощности и высокую стоимость ВЧ-оборудования, принята ориентация на сокращение числа ВЧ-каналов и повышение их импульсной мощности. Система ВЧ-питания ускоряющих резонаторов состоит из трех каналов, каждый из которых состоит из модулятора, ВЧ-системы среднего уровня мощности и мощного усилительного клистрона. В качестве выходного выбран клистрон L-5859, используемый в ускорителе FNAL на частоте 805 МГц. Этот клистрон с эффективностью 50% и коэффициентом усиления 50 дБ хорошо зарекомендовал себя в эксплуатации и с минимальной адаптацией может быть использован в данном проекте. Основные характеристики клистрона приведены в таблице 2. Волноводный тракт с воздушным заполнением, в котором предусмотрены направленные ответвители и гермоокна, выполнен на основе стандартного волновода WR975. ВЧ-потери в тракте оцениваются на уровне 650 кВт. Системы среднего уровня мощности возбуждаются от единой для всего ускорителя опорной линии, содержат управляемые фазовращатели, аттенюаторы и усилители. Две цепи обратной связи предназначены для автоматической регулировки фазы и амплитуды с точностью $\pm 0.5^\circ$ и $\pm 0.5\%$ соответственно. Для уменьшения возмущений ускоряющего поля при нагрузке пучком предусмотрена возможность программного упреждения в регулировке уровня ВЧ-сигнала.

Таблица 2: Характеристики клистрона L-5859.

Параметр	Параметры L-5859	Требуемые параметры
Импульсная мощность, МВт	12	11.5
Длительность ВЧ-импульса, мкс	125	60
Частота повторения, Гц	15	1
Скважность, %	0.1875	0.006
Средняя ВЧ-мощность, кВт	22.5	0.7

При разработке модулятора меньшая по сравнению с ускорителем FNAL величина средней ВЧ-мощности позволяет, взяв за основу проработанные решения, сократить состав оборудования и снизить требования к внешним источникам питания. Сравнительные характеристики модуляторов для ускорителя FNAL и разработанного проекта приведены в таблице 3.

Таблица 3: Сравнительные характеристики модуляторов.

Параметр	Параметры FNAL	Требуемые параметры
Импульсная мощность, МВт	24	24
Напряжение, кВ	170	170
Ток, А	141	141
Длительность импульса, мкс	125	60
Частота повторения, Гц	15	1
Время нарастания, мкс	9	7
Неравномерность импульса \pm	0.05%	0.05%
Средняя мощность, кВт	50	1.53
Напряжение питания, кВ	9	9
Средний ток питания, А	6.5	0.22
Средняя мощность питания, кВт	58.5	1.98

3. Система термостабилизации

Несмотря на малую величину средней мощности ВЧ-потерь в стенках резонатора, необходима система охлаждения с главной функцией – стабилизация температуры резонатора в рабочем режиме и при возможных флуктуациях температуры окружающей среды.

Каналы водяного охлаждения расположены на поверхности резонаторов. В первом резонаторе предусмотрено также водяное охлаждение штанг промежуточных трубок дрейфа. Температура резонаторов выбрана равной 22°C и поддерживается постоянной за счет изменения температуры охлаждающей жидкости. Система содержит два контура теплообмена. Два насоса и теплообменник обеспечивают требуемый расход воды и теплообмен во вторичном контуре. Дополнительная цепь обратной связи обеспечивает постоянство температуры на выходе вторичного контура за счет регулировки расхода воды в первичном контуре.

Система обеспечивает постоянство температуры резонатора с точностью $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, что приводит к отклонениям частот резонаторов не более ± 1.4 кГц.

Список литературы

- [1] S.K. Esin et al. DESY Linac 3 Upgrade Study. Proc. of the 1996 Linac Conf., Geneva, 1996 (to be published).
- [2] FNAL Linac Upgrade Conceptual Design Report, FNAL, 1989. T.T. Kroc et al. Continued Conditioning of the FermiLab 400 MeV Linac High-Gradient Side-Coupled Cavities. Proc. of the 1996 Linac Conf., Geneva, 1996 (to be published).
- [3] В.Г. Андреев и др. Мостовое устройство для резонаторов линейного ускорителя протонов на большие энергии. Труды РТИ АН СССР, 20, стр. 47, Москва, 1974.
- [4] J.H. Billen et al. The New rf Structure for Intermediate-Velocity Particles. Proc. of the 1994 Linac Conf., p. 341, 1994.
- [5] L.V. Kravchuk, V.V. Paramonov. The On-Axis Coupled Structure for Proton Linacs with Modarte Heat Loading. Proc. of the 1996 Linac Conf., Geneva, 1996 (to be published).