

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200

*О. Л. Сероштанов^{a, б, 1}, В. В. Кобец^{a, б}, А. Н. Трифонов^a,
А. А. Уланкин^{a, б}*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Линейный ускоритель Линак-200 в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ — это установка, построенная для получения тестовых пучков электронов для проведения НИОКР в области детекторов элементарных частиц, изучения передовых методов диагностики электронных пучков и проведения прикладных исследований. Планируется использовать 4 канала вывода пучка, на каждом из которых будет доступен пучок электронов в определенном диапазоне энергий: канал 1 (5–25 МэВ), канал 2 (25–60 МэВ), канал 3 (60–130 МэВ) и канал 4 (130–200 МэВ). Канал 2 находится на завершающей стадии изготовления. Представлены результаты проектирования поворотных магнитов и вакуумного тракта для канала вывода пучка №2, а также архитектура системы автоматизированного управления питанием данных поворотных магнитов.

The Linac-200 linear accelerator at DLNP JINR is a new facility constructed to provide electron test beams for particle detector R&D, studies of advanced methods of electron beam diagnostics, and applied research. Four test beam channels are planned, each providing electron beams within a specific energy range: Channel 1 (5–25 MeV), Channel 2 (25–60 MeV), Channel 3 (60–130 MeV), and Channel 4 (130–200 MeV). Channel 2 is in the final stages of assembling. This paper presents the design results of the bending magnets and vacuum chambers for test beam Channel 2, as well as the architecture of the automated control system for the power supply of these bending magnets.

PACS: 29.20.–c

ВВЕДЕНИЕ

В рамках планируемой программы исследований на пучках электронов линейного ускорителя Линак-200 [1] (рис. 1) существует ряд задач, для которых нужны пучки с определенной энергией. Для расширения возможностей пользователей работать с различными энергиями ускоренного пучка был разработан поворотный магнит [2], способный обеспечить параллельный перенос пучка после секции В2АА станции А02.

¹E-mail: seroshtanov@jinr.ru

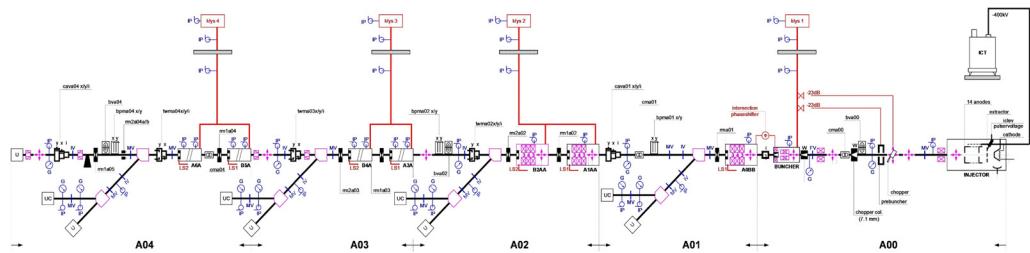


Рис. 1. Схема станций A01–A04 ускорителя Линак-200

1. РАЗРАБОТКА ПОВОРОТНОГО МАГНИТА

С помощью программы КОМПАС-3Д в ходе разработки были определены углы и грани ярма магнита, что отражено на рис. 2.

На основе полученного чертежа при угле $\alpha = 17,5^\circ$ и длине стороны треугольника $C = 319,97$ мм был построен треугольник, из которого был найден поворотный радиус пучка: $R = 532,04$ (построенный треугольник приведен на рис. 3). Также стоит отметить, что угол между $X = 167,75$ мм и R должен быть равен 90° .

Найдем неизвестный радиус R . Эта величина может быть получена из прямоугольного треугольника с катетом $C/2 = 159,985$ мм, углом $\alpha/2 = 17,5^\circ$ и гипотенузой R , равной

$$R = \frac{C/2}{\sin \alpha/2} = \frac{159,985}{0,3007057995} \approx 532,04 \text{ мм.}$$

Энергия ускоренного пучка после станции A02 — 60–70 МэВ. Исходя из формулы для энергии электронов, совершающих криволинейное движение в однородном магнитном поле E (МэВ) = $300B$ (Тл) R (м) [3], можно найти значение магнитной

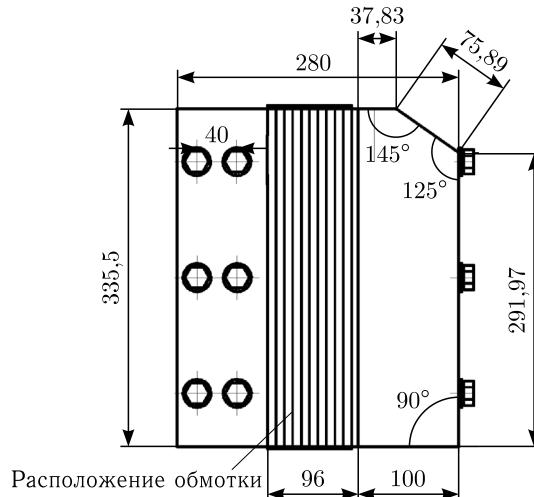


Рис. 2. Размеры (в мм) и углы магнита

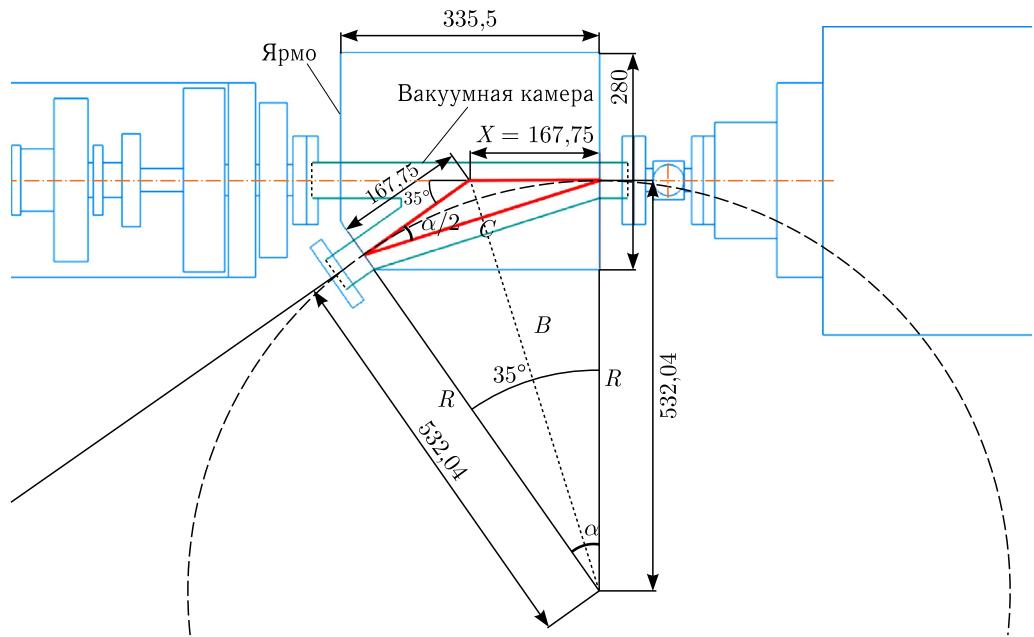


Рис. 3. Схема расчета поворотного радиуса на основе треугольника

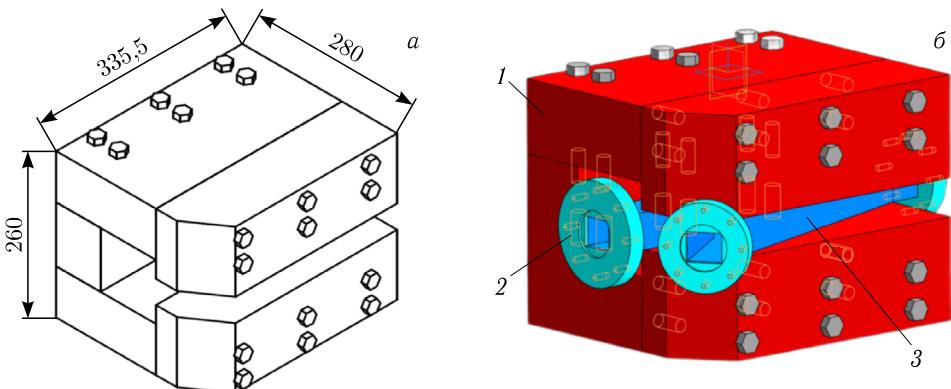


Рис. 4. а) Ярмо магнита с обозначением габаритных размеров. б) Ярмо 1, фланец 2 и вакуумная камера 3

индукции, достаточное для поворота пучка заданной энергии:

$$B = \frac{E \text{ (МэВ)}}{300} R \text{ (м)} \approx 0,44 \text{ Тл.}$$

Продольные размеры ярма магнита выбирались исходя из фиксированной длины свободного промежутка между станциями, они составляют 335,5 мм (см. рис. 3). В системе проектирования КОМПАС-3Д была построена 3D-модель (рис. 4) и разработаны чертежи ярма (рис. 5) и вакуумной камеры с фланцами (рис. 6).

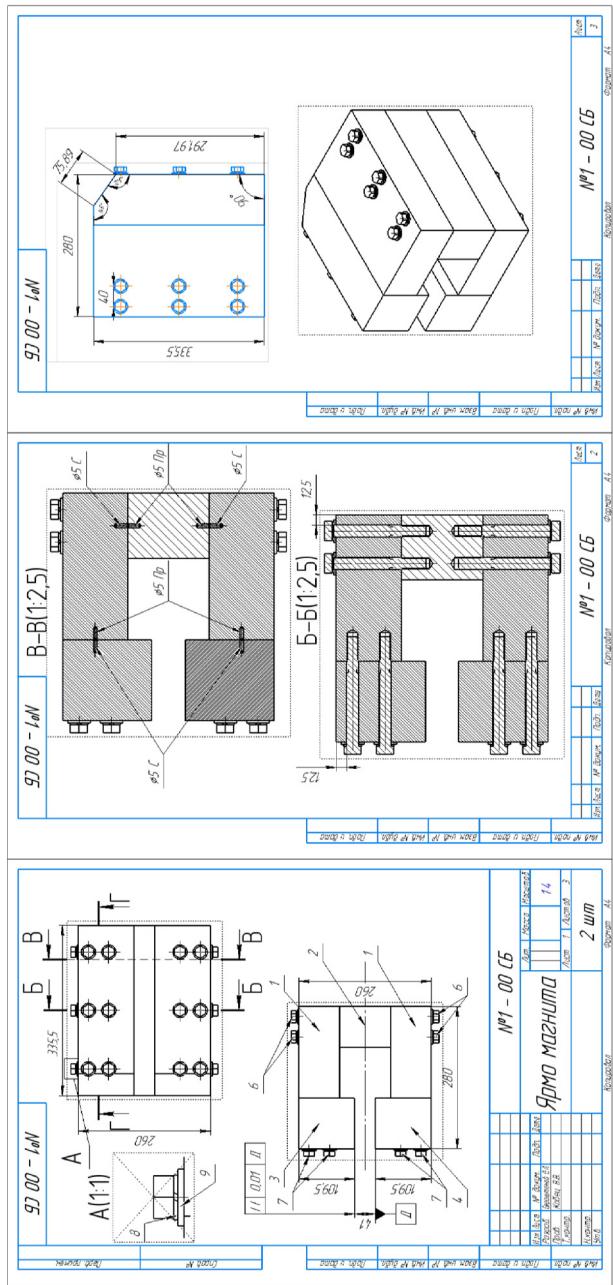


Рис. 5. Чертеж ярма магнита

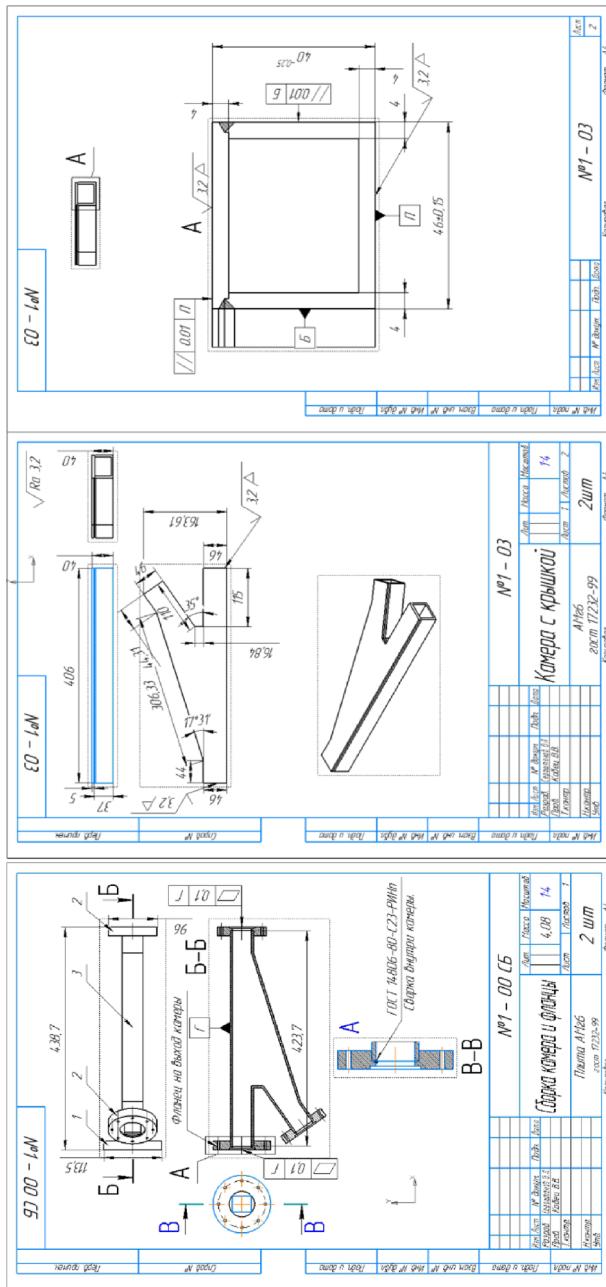


Рис. 6. Чертежи вакуумной камеры с фланцами

Ярмо магнита, представленное на рис. 5, состоит из 5 частей, соединенных между собой болтами М12, изготовленными из того же материала, что и ярмо. В силу того, что пучок должен входить и выходить под прямым углом, одна из граней магнита скошена под углом 35° (см. рис. 3). Для фиксации деталей предусмотрены штифты, предотвращающие смещение деталей ярма при сборке. Поляса магнита расположены параллельно друг другу, и расстояние между ними составляет 41 мм.

Вакуумная камера и фланцы сделаны из материала АМг6. Длина камеры 406 мм без фланцев и 421 мм с фланцами. Высота камеры равна поперечному сечению тракта ускорителя и составляет 40 мм, ширина вывода — 46 мм.

Ярмо рассматриваемого магнита изготовлено из сплава АРМКО [4]. Этот сплав представляет собой класс электротехнических нелегированных сталей и является наиболее подходящим по параметрам для нашей задачи. Рассмотрим магнитные свойства электротехнической стали в сравнении с чугуном и литой сталью. Кривая намагничивания электротехнической стали (рис. 7) имеет более крутой наклон на начальном участке и достигает более высоких значений магнитной индукции насыщения по сравнению с кривыми литой стали и чугуна. Это означает, что электротехническая сталь обладает лучшими магнитными свойствами и может достигать более высоких уровней магнитной индукции при относительно низких значениях напряженности поля. По кривым намагничивания находим, что напряженность магнитного поля в магнитопроводе $H_{\text{м.п.}} \approx 0,3 \text{ A/cm} \rightarrow 30 \text{ A/m}$.

Были рассчитаны параметры обмоток. Для провода диаметром 2 мм площадь сечения равна $S = \Pi \times R^2 = 3,14 \text{ mm}^2$. Чтобы провод не грелся, плотность тока должна быть $J = 2-4 \text{ A/mm}^2$. Через провод диаметром 2 мм можно пропустить ток $I = JS = 9,42 \text{ A}$. Тогда число витков катушки составит

$$W = \frac{14,309 \text{ (A/витков)}}{9,42 \text{ (A)}} \approx 1520 \text{ витков.}$$

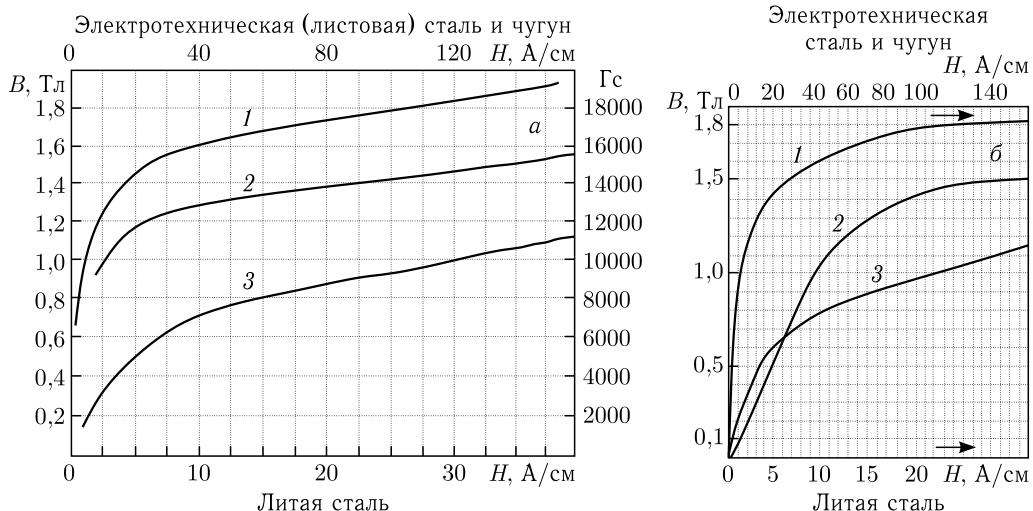


Рис. 7. Кривые намагничивания электротехнической стали (1), литой стали (2) и чугуна (3)

В одном слое намотки будет $96 \div 2 = 48$ витков. Следовательно, количество слоев будет $1520 \div 48 = 32$ слоя. Исходя из габаритов и геометрии магнита было принято решение намотать две катушки по $16 \cdot 48 \approx 760$ витков. Обмотки будут соединены последовательно с учетом направления магнитного потока в магнитопроводе. Ток в обмотках порядка 10 А, сопротивление обмоток 7,8 Ом. Для питания магнита понадобится стабилизированный источник питания напряжением порядка 100 В и мощностью порядка 3 кВт.

2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для отклонения пучка заданной энергии требуется создать определенную величину магнитного поля. Величина индукции магнитного поля пропорциональна току в обмотках магнита. Таким образом, управляя током магнита, можно менять энергию отклоняемых им электронов.

Для питания магнитов предполагается использование источников питания компании Delta Elektronika серии SM3000, максимальная мощность которых составляет 3000 Вт.

Управление источником питания осуществляется с помощью изолированного аналогового интерфейса. Интерфейс представляет собой 15-контактный разъем D-sub с четко обозначенными функциями для каждого вывода. Данный интерфейс позволяет управлять величиной тока и напряжения на выходе источника питания, а также осуществлять мониторинг их значений и различных статусных сигналов источника питания (режим работы, срабатывание ограничения по току или напряжению и др.). Диапазон уставки аналоговых сигналов 0–5 В.

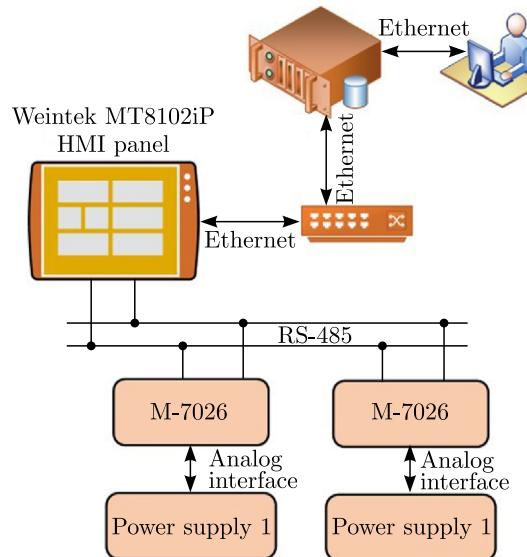


Рис. 8. Общая схема системы автоматизированного управления источниками питания Delta Elektronika серии SM3000

Для обеспечения задания уставки и мониторинга аналоговых и цифровых сигналов используется модуль ввода-вывода ICPCON M-7026. Данный модуль оснащен интерфейсом RS-485 и поддерживает работу по протоколу Modbus RTU, имеет 6 каналов аналогового ввода (16 бит АЦП), 2 канала аналогового вывода (12 бит ЦАП), 3 канала цифрового ввода и 3 канала цифрового вывода.

Общая схема системы автоматизированного управления источниками питания представлена на рис.8. Эта система позволяет осуществлять управление и мониторинг сигналов с источников питания. Модули M-7026 выполняют функцию преобразования цифровых команд управления в аналоговые сигналы для источников питания, а также обратное преобразование аналоговых сигналов состояния в цифровой формат для системы управления. HMI-панель Weintek MT8102iP подключена в локальную сеть ускорителя и служит в качестве преобразователя RS485/Ethernet, а также обеспечивает интерфейс локального управления. Удаленное управление осуществляется с помощью программного обеспечения на базе Tango Controls, серверная часть которого работает на сервере системы управления, а клиентская, соответственно, на компьютере оператора. Предложенная архитектура системы обеспечивает комплексное легко масштабируемое решение для управления источниками питания Delta Elektronika.

3. РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТА

Длина магнитопровода составляет $195 + 195 + 70 + 70 + 180 = 710$ мм по средней линии. Длина воздушного зазора равна 41 мм исходя из того, что зазор между полюсами должен быть максимально коротким и соответствовать высоте вакуумной камеры — 40 мм. Площадь сечения магнитопровода — $0,0272$ м². Магнитная индукция в воздушном зазоре $B \approx 0,44$ Тл. Магнитный поток в воздушном зазоре и в магнитопроводе одинаков и равен

$$\Phi = BS = 0,016456 \text{ Вб.}$$

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре

$$H_{B,3} = \frac{B_{B,3}}{\mu_0} = \frac{0,44}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 348549,325 \text{ А/м.}$$

По закону полного тока магнитодвижущая сила катушки будет равна

$$IW = H_1 L_1 + H_{B,3} L_{B,3} + H_2 L_2 = 14308,522 \text{ А/В.}$$

Параметры напряженности и длины магнитопроводов

Напряженность поля, А/м	Значение	Длина магнитопровода, м	Значение
H_1	30	L_1	0,460
H_2	30	L_2	0,140
$H_{B,3}$	348549,325	$L_{B,3}$	0,041

ВЫВОДЫ

- Рассчитаны параметры магнитов для канала параллельного вывода пучка электронов с энергией 60–70 МэВ.
- По имеющимся исходным данным спроектировано расположение отклоняющего магнита в тракте ускорителя и магнита для параллельного переноса пучка относительно друг друга.
- Подготовлена конструкторская документация для изготовления ярма магнита, вакуумной камеры и соединительных фланцев.
- Спроектирована система автоматизированного управления питанием обмоток магнита.
- Изготовлены ярма для обоих магнитов, а также вакуумные камеры для тракта параллельного переноса пучка.

Завершающим этапом является изготовление обмоток магнитов и проведение магнитных измерений, а также выполнение работ по сборке канала вывода пучка непосредственно на ускорителе Линак-200.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trifonov A. et al.* Linac-200: A New Electron Test Beam Facility // 41st Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP2022). PoS. 2023. V. 414. P. 1094–1098.
2. Комаров Е. Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975. С. 368.
3. *Wilson E. J. N.* An Introduction to Particle Accelerators. Oxford: Oxford Univ. Press, 2008. 268 р.
4. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1974.

Получено 28 октября 2024 г.