

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра загальної фізики

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри загальної фізики

проф. О.В. Лазоренко


(підпис)

« 16 » _____ 12 _____ 2024 р.

Оцінка «99 (відмінно)»

Голова ЕК

проф. С.І. Шевченко


(підпис)

« 19 » _____ 12 _____ 2024 р.

Бихун Олександр Володимирович

**Розробка та вимірювання електромагнітних характеристик
додаткових коригувальних магнітів каналу транспортування
100 МеВ/100 кВт електронного прискорювача – драйвера
ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ**

Кваліфікаційна робота на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр»
спеціальність 104 – «фізика та астрономія»
освітньо-наукова програма «фізика»

(підпис студента)

Науковий керівник – доцент кафедри
загальної фізики ХНУ імені В.Н. Каразіна,
канд. фіз.-мат. наук, доцент
І.А. Таранова

(підпис керівника)

Науковий консультант – нач. лабораторії
дослідження магніто-оптичних систем і
динаміки пучка в циклічних прискорювачах
і накопичувачах ННЦ ХФТІ НАНУ,
канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.
А.О. Мициков

(підпис консультанта)

Харків 2024

Анотація

Бихун О.В. Розробка та вимірювання електромагнітних характеристик додаткових коригувальних магнітів каналу транспортування 100 МеВ/100 кВт електронного прискорювача – драйвера ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія». – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2024. – 34 с. – Табл. 2. Іл. 18.

Проведено розрахунок та вимір електромагнітних характеристик двох коригувальних магнітів для модифікованої структури каналу транспортування 100 МеВ/100 кВт електронного прискорювача – драйвера ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ. Вимірювання проведено на стенді із попереднім калібруванням матриці датчиків Холла за допомогою ЯМР вимірювача РТ2026. Вимірами доведено відповідність наявних магнітних властивостей таким, що необхідні згідно проекту модернізації прискорювача.

Ключові слова: магнітна індукція, ЯМР тесламетр, коригувальні магніти, розподіл магнітного поля, магнітооптичні властивості, датчик Холла, матриця датчиків Холла.

Annotation

Bykhun O.V. Development and measurement of the electro-magnetic characteristics of the additional magnetic correctors in the transportation channel of the 100 MeV/ 100 kW electron linear accelerator – the driver of the SNF «Neutron Source» of NSC KIPT.

Diploma thesis to obtain Master's educational qualification level with speciality 104 – «Physics and Astronomy». – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University, 2024. – 34 p. – Tab. 2, Fig. 18

Calculations and measurement of the electro-magnetic characteristics of two magnetic correctors for modified lattice of the 100 MeV/100 kW linear electron accelerator – the driver of the SNF «Neutron Source» of NSC KIPT were carried out. Measurements were done at the experimental bench with preliminary calibration using Hall probe matrix by nuclear magnetic resonance meter of PT2026 type. Measurement results confirmed correspondence of the developed magnet characteristics to the required parameters according to the transportation channel modernization design.

Key words: magnetic induction, nuclear magnetic resonance meter, magnetic correctors, magnetic field distribution, magnetic optics characteristics, Hall probe, Hall probe matrix.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. ЛІНІЙНІ ПРИСКОРЮВАЧІ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК.....	8
1.1. Динаміка пучків заряджених частинок у прискорювачах та їх фокусування	8
1.2. Система фокусування лінійного прискорювача – драйвера ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ	10
1.3. Визначення вимог до параметрів системи корекції положення пучка на мішені.....	12
Розділ 2. РОЗРАХУНОК МАГНІТІВ У ДВОМІРНОМУ НАБЛИЖЕННІ	20
2.1. Вибір загальної геометрії коректорів	20
2.2. Розрахунок очікуваних поля та ампервитків коректора.....	21
Розділ 3. КАЛІБРУВАННЯ МАТРИЦІ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА	24
3.1. Матриця датчиків Холла.....	24
3.2. Тестовий магніт.....	26
3.3. Порівняльні виміри.....	28
Розділ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ	29
4.1. Техніка вимірювання.....	29
4.2. Сила коректорів.....	30
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна ядерна енергетика у світі (включаючи Україну) має високі економічні й екологічні показники, оскільки в процесі виробництва електроенергії не відбуваються викиди CO₂ та радіоактивного пилу. Однак, вона має ряд істотних недоліків, до яких належать низьке спалювання уранового палива (0,7%), напрацювання і невикористання трансуранових елементів та теоретична можливість ядерних аварій. Вирішити ці проблеми може новий клас установок – підкритичні збірки, що керуються прискорювачами заряджених частинок. Розробки таких систем ведуться у багатьох країнах (Європейський союз, США, Японія, Китай, Індія і т.д.). Подібні установки абсолютно виключають ядерні аварії, дозволяють спалювати весь уран і роблять ядерну енергетику безпечною та екологічно чистою.

Починаючи з 2010 року в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» разом з Аргонською національною лабораторією (США) розроблено та реалізовано проект спорудження ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується лінійним прискорювачем електронів» (далі – ЯПУ «Джерело нейтронів»). Протягом 2019-2021 років було успішно виконано фізичний пуск цієї новітньої дослідницької установки.

Принцип роботи ЯПУ «Джерело нейтронів» заснований на наступному. При бомбардуванні пучком електронів мішені з вольфраму або урану утворюються первинні фотонейтрони. Підкритична збірка з низько збагаченим паливом (19,7 %) використовується для розмноження фотонейтронів у результаті поділу ядер урану. Максимальний коефіцієнт розмноження нейтронів активної зони підкритичної збірки становить 0,98 при будь-яких вихідних подіях, що виключає виникнення ланцюгової самопідтримуючої ядерної реакції поділу. При

виключенні подачі пучка електронів на мішень одразу припиняється поділ ядерного палива.

Електронний пучок для виробництва первинних нейтронів генерується на лінійному прискорювачі з проектними параметрами:

- енергія електронів $E_e = 100$ MeV;
- середній струм пучка $I_e = 1$ mA;
- потужність пучка, що поглинається у мішені $P_e = 100$ кВт.

Висока потужність електронного пучка накладає серйозні вимоги до його проведення по всій довжині прискорювача, оскільки при попаданні пучка на апертуру вакуумної камери він спричинить пошкодження обладнання прискорювача.

У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є забезпечення контролю та управління положенням пучка електронів на нейтронно-генеруючій мішені ЯПУ «Джерело нейтронів».

Предмет дослідження – електромагнітні характеристики коригувальних магнітів.

Об'єкт дослідження – каналу транспортування 100 MeV/100 кВт електронного прискорювача.

Основною метою проведених досліджень було визначення електромагнітних характеристик коригувальних магнітів каналу транспортування 100 MeV/100 кВт електронного прискорювача, необхідних для забезпечення надійного контролю та управління положенням пучка електронів на нейтронно-генеруючій мішені ЯПУ «Джерело нейтронів».

Методи, що були застосовані для досягнення цілі: порівняння результатів чисельного моделювання електромагнітних характеристик магнітів, одержаних за допомогою програмного коду, з результатами експериментальних вимірів.

Результати досліджень, наведені в цій дипломній роботі, були одержані на базі Науково-дослідницького комплексу «Прискорювально-ядерні системи» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Розділ 1.

ЛІНІЙНІ ПРИСКОРЮВАЧІ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

1.1. Динаміка пучків заряджених частинок у прискорювачах та їх фокусування

Рух зарядженої частинки в прискорювачах описується у так званій супутній системі координат (x, y, s) . У лінійному прискорювачі вісь s збігається з напрямком руху частинки - поздовжньою віссю прискорювача, у площині (s, x) описується динаміка у горизонтальній (радіальній) площині та у площині (y, s) – у вертикальній. Координати x, y та складові імпульсу $p_x = dx/ds, p_y = dy/ds$ описують поперечне відхилення частинки від ідеальної рівноважної орбіти у відповідних площинах. Як поздовжня координата s використовується відхилення від так званої рівноважної частинки по осі s .

Електромагнітні пристрої для фокусування відрізняються залежно від енергії частинок. В електронних гарматах, що генерують вихідний пучок для прискорення, застосовується, як правило, фокусування електростатичних лінз, утвореними певними конфігураціями електродів гармати. На початкових ділянках прискорювача, у інжекційних секціях прискорювача, фокусування здійснюється соленоїдальними – поздовжніми – магнітними полями B_s . Прискорення пучка відбувається в секціях при прольоті резонаторних прискорювальних структур. У міру зростання енергії пучка соленоїди стають неефективними і для фокусування релятивістських пучків використовують поперечні магнітні поля так званих квадрупольних лінз. Компоненти магнітного поля квадруполі описуються виразами [1 – 4]:

$$B_y = Gx; B_x = Gy; B_s = 0, \quad (1.1)$$

де G – квадрупольний градієнт лінзи. Є глибока аналогія між світловою оптикою та оптикою пучка заряджених частинок у прискорювачі. У наближенні тонких лінз перетворення координат світлового променя описується виразом:

$$\begin{pmatrix} u \\ pu \end{pmatrix}_1 = M \begin{pmatrix} u \\ pu \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ pu \end{pmatrix}_0, \quad (1.2)$$

де матриці-стовпці з індексами 0 і 1 – це координати світлового променя $u = \{x, y\}$ на вході та виході з лінзи, відповідно, а квадратна матриця M являє собою матрицю тонкої лінзи з фокусною відстанню f . Так само, матриця квадрупольної лінзи в тонкому наближенні визначається матрицею M з фокусною відстанню:

$$\frac{1}{f} = KL = \frac{G}{B_0 \rho} L \quad (1.3)$$

У цьому виразі добуток $B_0 \rho$, званий магнітною жорсткістю системи, визначається енергією E частинок, що прискорюються, і може бути визначений з виразу:

$$E [GeV] \approx 0.3 B_0 [Tl] \rho [m] \quad (1.4)$$

Відмінність між світловою оптикою та оптикою з квадрупольями полягає в тому, що звичайна світлова лінза аксіально симетрична і фокусує або дефокусує світлові промені в будь-якій площині через оптичну вісь лінзи. Квадрупольне фокусування аксіально несиметричне, якщо лінза фокусує пучок заряджених частинок в одній з поперечних площин, то в іншій площині буде дефокусування. Це зумовлено аксіальною асиметрією полів (1.1). Однак, комбінуючи лінзи, що фокусують і дефокусують, можна створювати об'єктиви, що фокусують пучок в обох поперечних площинах. Як правило, у прискорювальній техніці використовуються дублети та триплети квадрупольних лінз.

1.2. Система фокусування лінійного прискорювача – драйвера

ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ

Схема лінійного прискорювача – драйвера ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ приведена на Рисунку 1.1 та описана в роботах [5-8].

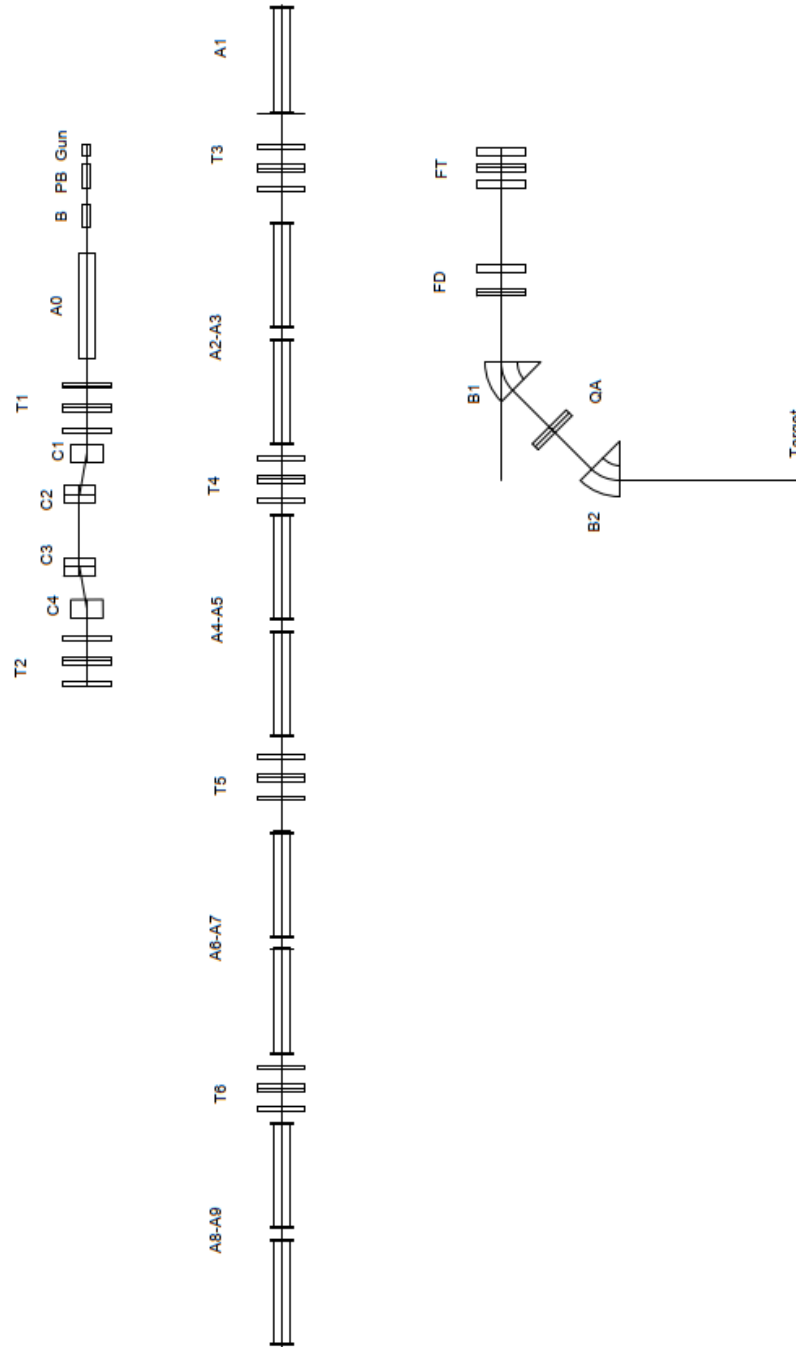


Рисунок. 1.1 – Схема прискорювача – драйвера ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ.

Інжекційна частина прискорювача складається з електронної гармати (Gun), передгрупування (PB) і групувача пучка (B), інжекційної секції A0, двох фокусуєчих триплетів квадрупольних лінз T1 і T2 і так званого чікейна (C1-C4), формує необхідний розкид частинок з енергій. Енергія пучка на виході чікейна становить приблизно 25 MeV.

З виходу інжекційної частини пучок потрапляє у основну частину прискорювача, де у прискорюючих структурах A1 – A9 він прискорюється до енергії $E_e = 100$ MeV. Для фокусування пучка між групами прискорювальних структур встановлено квадрупольні триплети T3 – T6. Положення пучка в поперечній площині контролюється декількома датчиками положення пучка, розташованими в проміжках між секціями, що прискорюють. Корекція положення пучка здійснюється декількома коригуючими елементами.

Після прискорення до робочої енергії пучок в кінцевій частині прискорювача повертається вниз за допомогою поворотних магнітів B1 і B2 і спрямовується в активну зону збірки, що утворює нейтрони (мішень). Для фокусування пучка в цій частині прискорювача використовуються дублет та триплет FD та FT.

Загальна кількість електромагнітних елементів, що використовуються для проведення та фокусування пучка дорівнює приблизно 40. Неточності юстування елементів призводять до появи небажаних магнітних полів на осі прискорювача та відхиляють реальну орбіту пучка від ідеальної рівноважної орбіти (PO). Чим більше випадкові помилки виставлення елементів, тим більше спотворення PO, які можуть призвести до втрати пучка при його попаданні на елементи вакуумної камери прискорювача. Зрозуміло, що при розробці системи фокусування та корекції пучка на ділянці FT – Target прискорювача необхідно визначити допуски на точність юстування елементів та необхідну точність вимірювань положення PO. На основі цих розрахунків можна визначити вимоги до системи корекції PO – визначити місця розташування коригувальних елементів та їх необхідні поля,

після чого можна приступати вже безпосередньо до розрахунків і проектування коригувальних магнітів.

1.3. Визначення вимог до параметрів системи корекції положення пучка на мішені

(зміст цього підрозділу подано до публікації у науковому журналі ВАНТ за авторством співробітників ННЦ ХФТІ)

Структура кінцевої частини прискорювача та повороту пучка до нейтронно-генеруючої мішені наведена на Рисунку 1.2.

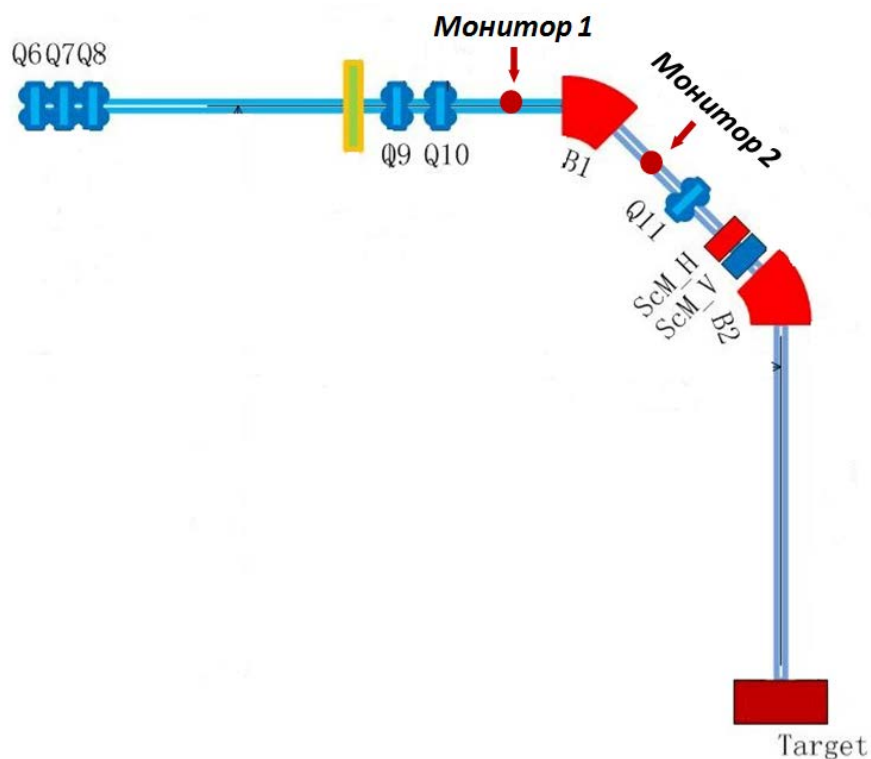


Рисунок 1.2 – Поворот пучка до мішені.

Q6-Q8 і Q9-Q10 – фінальні триплет та дублет, B1 та B2 – поворотні магніти у вертикальній площині, Q11 – квадрупольна лінза поворотної арки, ScM_V(H) – скануючі магніти, Монітор 1(2) – двокоординатні датчики положення пучка M1, M2.

Основна проблема у проведенні пучка на цій ділянці пов'язана з неможливістю розміщення датчика положення пучка поблизу мішені через радіаційну обстановку в активній зоні підкритичної збірки. Жодна електроніка та кабельна продукція не витримує радіаційного навантаження в центрі активної зони. Для того, щоб мати можливість судити про положення пучка на мішені, використовуючи показання датчиків перед та після першого поворотного магніту В1, за допомогою програми MADX [9] були проведені розрахунки спотворень РВ через помилки юстування електромагнітних елементів прискорювача, визначені необхідні точності їх виставлення та визначено кореляційні залежності положень пучка на НУМ та в датчиках положення пучка М1 та М2.

У випадковому розіграші помилок юстирування було визначено чутливості положення пучка на мішені до окремих помилок і були прийняті наступні середньоквадратичні значення, можливі для реалізації:

- точність виставлення у поперечній площині $\sigma_x = \sigma_y = 0.2$ мм;
- помилки поворотів елементів щодо осей системи координат
 $\sigma_{px} = \sigma_{py} = \sigma_{rx} = 0.5$ мрад;
- відносна точність встановлення полів елементів $\sigma_B = 2 \cdot 10^{-4}$.

На Рисунку 1.3 наведено результати моделювання. Середньоквадратичні відхилення РО становлять $\sigma_x = 6.5$ мм у радіальній площині та $\sigma_y = 1.0$ мм у вертикальній. Такі значні відходи РВ у горизонтальній площині при досить жорстких вимогах до юстування елементів обумовлені дефокусуванням по горизонталі квадрупольною лінзою Q11, що фокусує у вертикальній площині і забезпечує ахроматичність поворотної арки. Такі відхилення РО на мішені неприпустимі, оскільки можуть сильно спотворювати вимірювані параметри установки, тому положення пучка на мішені необхідно контролювати та коригувати.

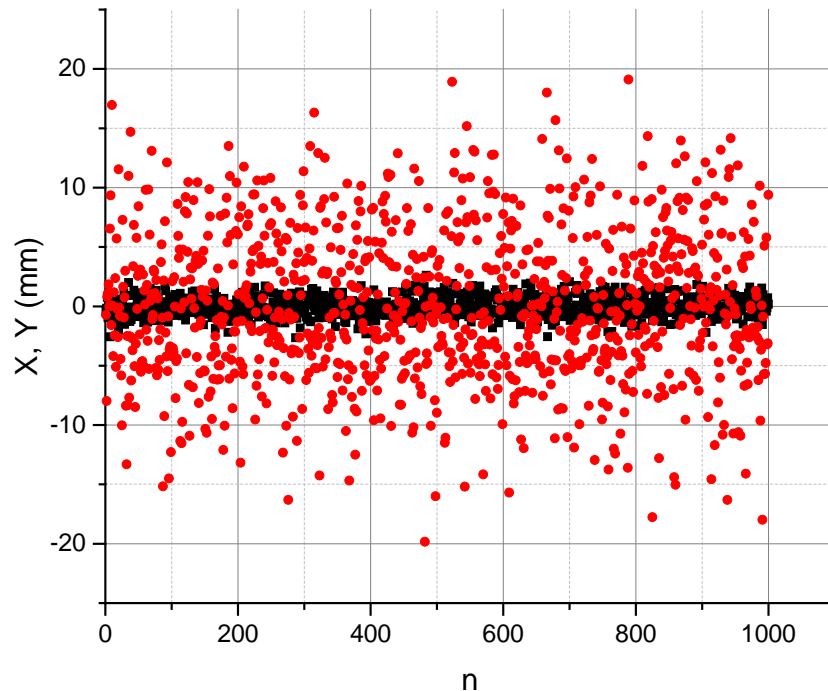


Рисунок. 1.3 – Відхилення положення пучка щодо центру мішені при 1000 розіграшах випадкових помилок встановлення елементів у вертикальній площині повороту (чорні точки) і в горизонтальній площині (червоні символи).

Можливість контролю положення пучка на мішені була досліджена за допомогою пошуку кореляційної залежності між цим положенням та результатами вимірювання РО у моніторах M1 та M2. Розрахунки були проведені за допомогою програми MADX, результати розрахунків наведено на Рисунках 1.4 та 1.5. Проведене моделювання показує помірну лінійну кореляцію положень пучка *M1-мішень* і значну кореляцію *M2-мішень*. Розрахунок кореляційних залежностей, виконаний за допомогою MADX та графічного пакету ORIGIN, дає такі результати:

- коефіцієнт кореляції *M1-мішень* у радіальній площині дорівнює $r = 0.57$, у вертикальній площині є помірний негативний зв'язок з $r = -0.67$;
- коефіцієнт кореляції положення пучка *M2-мішень* в радіальній площині дорівнює $r = 0.89$, у вертикальній площині кореляція становить $r = -0.94$.

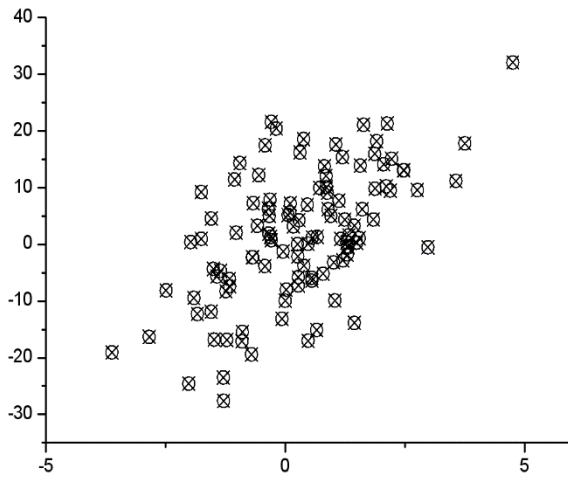


Рисунок 1.4.а – Положення пучка на мішені в залежності від його положення у моніторі М1 в радіальній площині. Осі у мм.

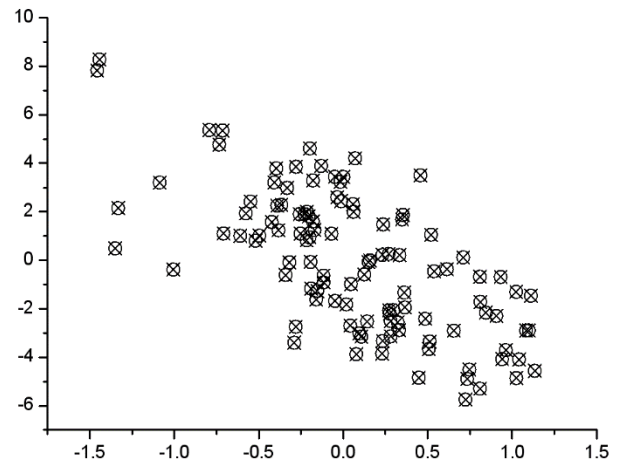


Рисунок 1.4.б – Положення пучка на мішені в залежності від його положення у моніторі М1 в вертикальній площині. Осі у мм.

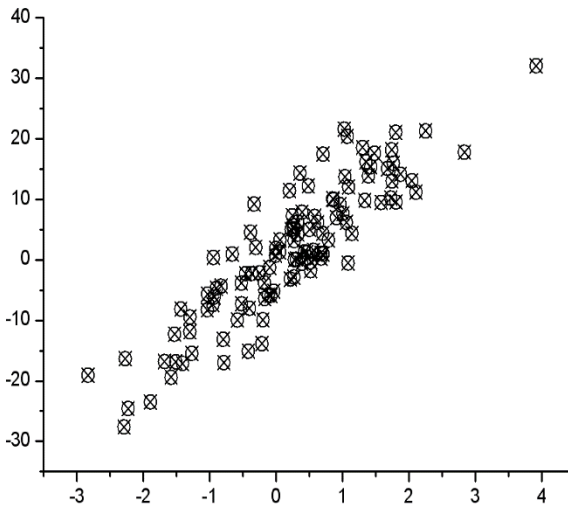


Рисунок 1.5.а – Положення пучка на мішені в залежності від його положення у моніторі М2 в радіальній площині. Осі у мм.

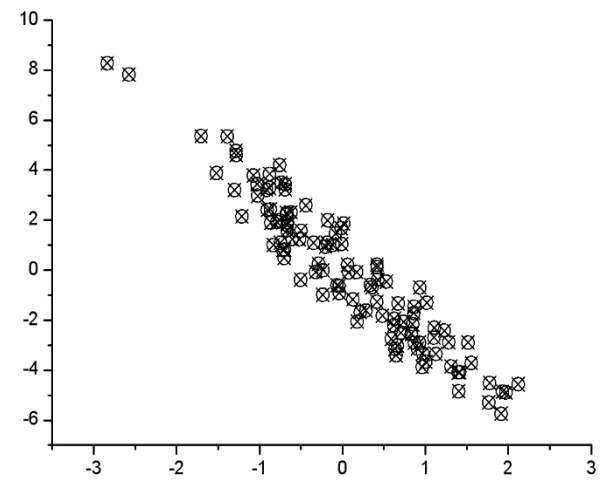


Рисунок 1.5.б – Положення пучка на мішені в залежності від його положення у моніторі М2 в вертикальній площині. Осі у мм.

Таким чином, знаючи положення пучка в моніторах, ми можемо з достатньою точністю судити про положення пучка на мішені та коригувати його.

На Рисунках 1.6 та 1.7 наведено результати чисельного моделювання одного з варіантів спотворень рівноважної орбіти та корекції орбіти з використанням описаного вище методу двома двокоординатними коригуючими магнітами.

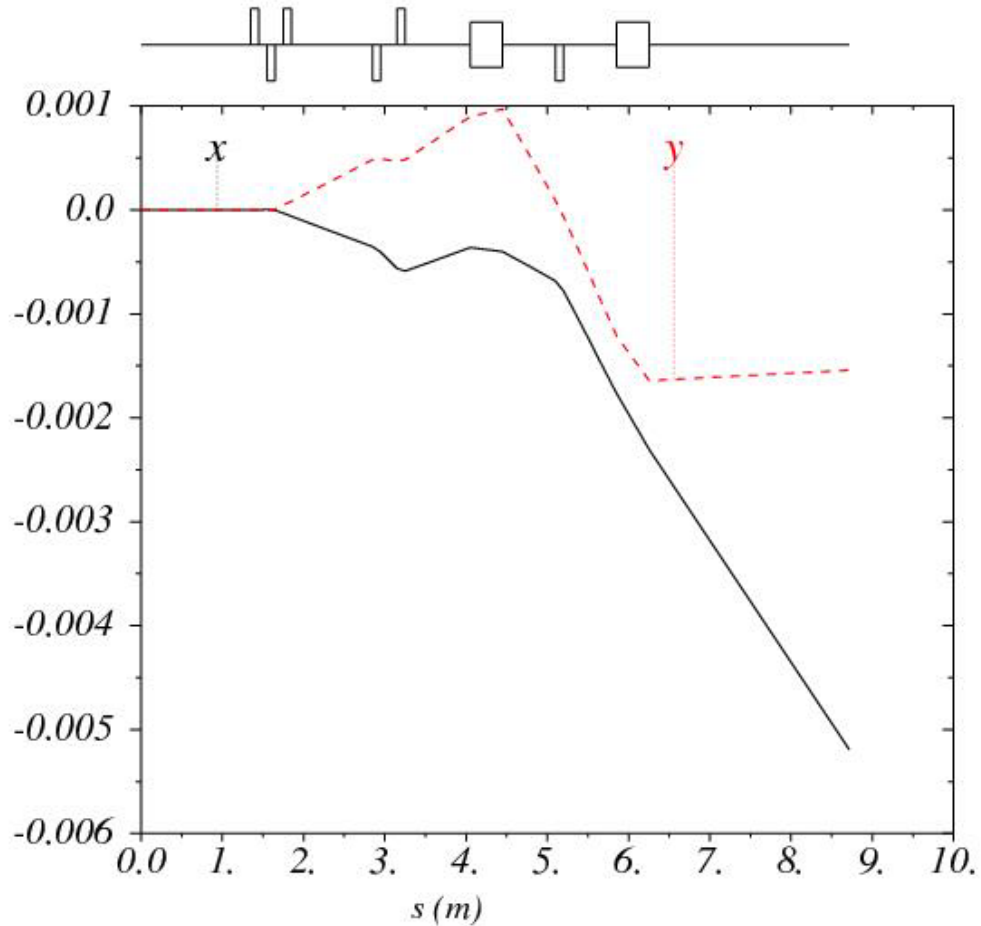


Рисунок. 1.6 – Спотворена P0 на ділянці вихід останньої секції прискорювача – мішень.

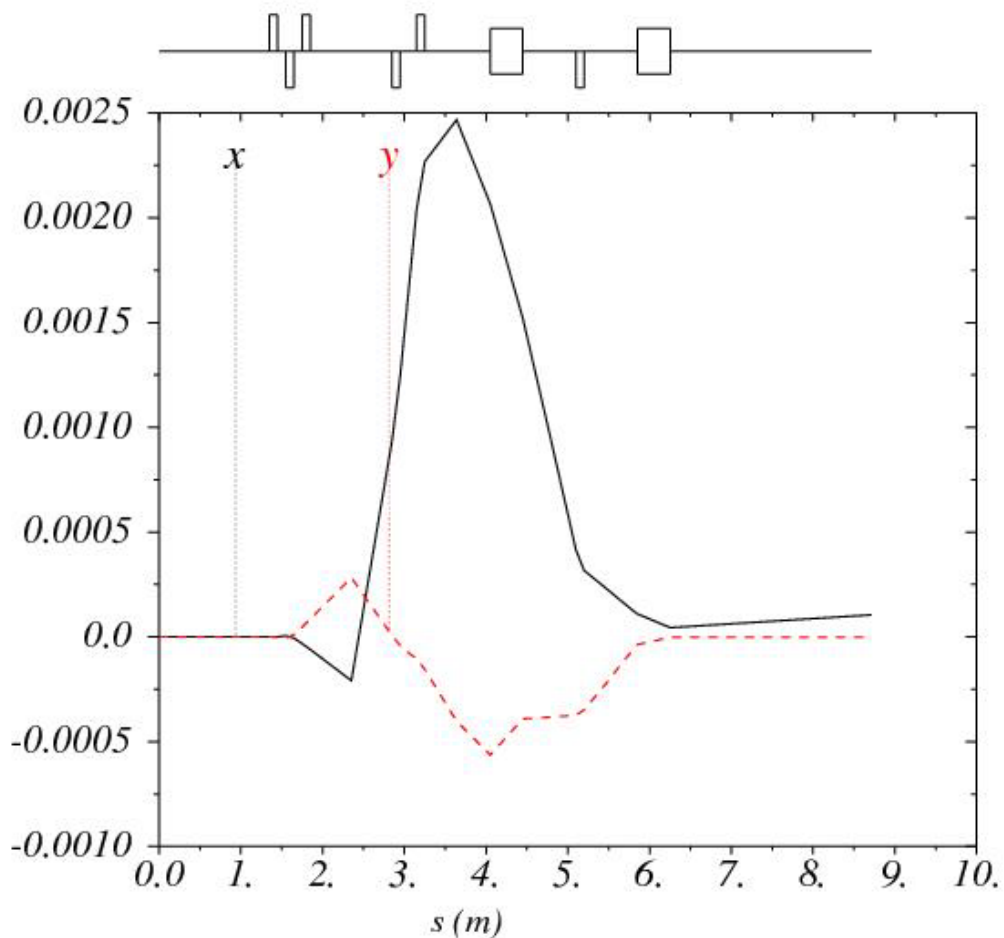


Рисунок. 1.7 – Скоригована R_0 на ділянці вихід останньої секції прискорювача – мішень.

Технологічно у змонтованому прискорювачі перший коректор може бути розташований (і встановлений) у прямолінійному проміжку після триплету Q6 – Q8 (див. Рис. 1.8а), другий коректор – після дублету Q9 – Q10. (див. Рис. 1.8б)

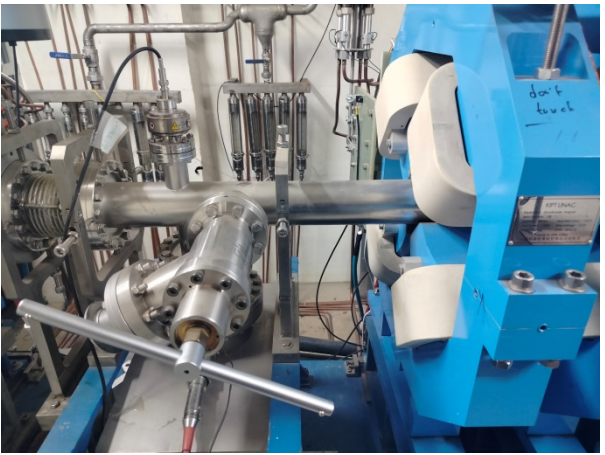


Рисунок 1.8а – Місце для першого коректору



Рисунок 1.8б – Місце для другого коректору

Вихідними даними результату корекції РВ в MADX є сили коректорів, які визначаються як необхідні кути поворотів у поперечних площинах та описуються виразами:

$$\alpha_x = \frac{B_y L_{cor}}{B_0 \rho}, \alpha_y = \frac{B_x L_{cor}}{B_0 \rho}. \tag{1.5}$$

У цих виразах B_x , и B_y – компоненти поля коректора в радіальній та вертикальній площинах, L_{cor} – довжина коректора, $B_0 \rho = 3.33564 E_e [\text{Гев}]$, $[Tл*М]$ – магнітна жорсткість.

Як показано у [10] в багатьох випадках зручно використовувати замість (1.5) формулу:

$$\alpha = \frac{0.3}{E [\text{Гев}]} \int_{c1}^{c2} B \ dl = \frac{0.3 B_{max}}{E [\text{Гев}]} L_{ef} \tag{1.6}$$

Значення інтегралу $L_{ef} = \int_{s1}^{s2} B \ dl / B_{max}$ прийнято називати ефективною довжиною магніту. B_{max} – це максимум поля на проміжку інтегрування.

Для вироблення вимог до сил коректорів було проведено численні розрахунки корекцій спотвореної орбіти для різних наборів помилок юстування та після статистичної обробки цих результатів було визначено вимоги до полів

коректорів. Для обліку можливих промахів у виставках магнітних елементів та неконтрольованих доглядів рівноважної орбіти розрахункову силу коректорів було збільшено вдвічі. З точки зору технологічності виготовлення обидва коректори однакові.

Визначена таким чином необхідна сила коректорів становить:

$$\alpha_x = \alpha_y = 6 \cdot 10^{-3}.$$

Звідки

$$B_{max} L_{ef} = \alpha \frac{E[GeV]}{0.3} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{0.1}{0.3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл} \cdot \text{м} \quad (1.7)$$

Точність, з якою потрібно корегувати поле впливає із розміру сфокусованого пучка на мішені, яка дорівнює 2.5мм. Тому похибка повинна бути не більше 0.5 мм. Максимальна корекція дорівнює 20 мм (див. Рис. 1.3). Відношення цих величин і визначає відносну точність сили коректора 0.025.

Розділ 2.

РОЗРАХУНОК МАГНІТІВ У ДВОМІРНОМУ ПРИБЛИЖЕННІ

2.1. Вибір загальної геометрії коректорів

Геометричні розміри коригуючих магнітів задаються їх силою та розміром апертури вакуумпроводу прискорювача. На Рисунку 2.1 зображено поперечний переріз коригуючого магніту.

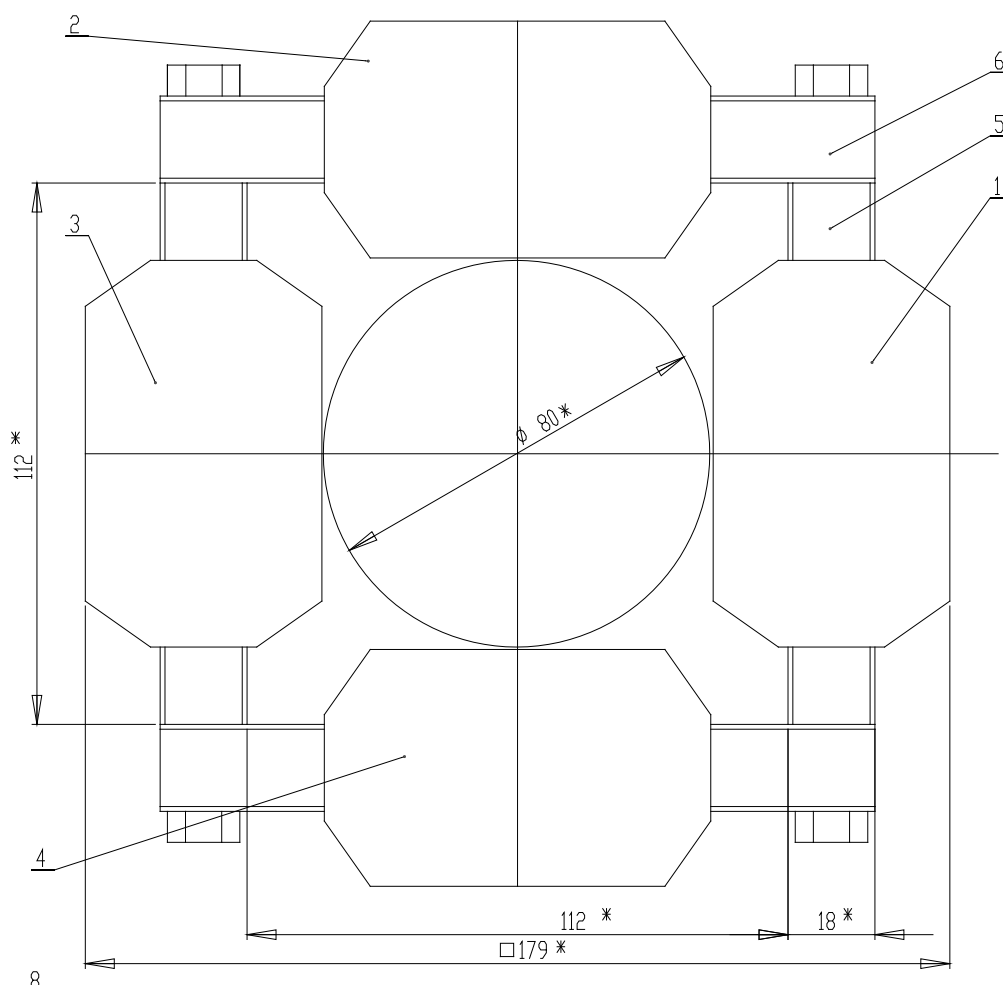


Рисунок 2.1 – Поперечний розріз коригуючого магніту.

1, 3 – котушки горизонтальної корекції, 2, 4 – котушки вертикальної корекції,
5, 6 – ярмо.

Магніт виконує функції вертикальної та горизонтальної корекції орбіти електронів в прискорювачі [11]. Як було показано вище, кут відхилення пучка електронів пропорційний силі магніту, яка дорівнює інтегралу поперечної складової магнітного поля вздовж траєкторії.

2.2. Розрахунок очікуваних поля і ампервитків коректора

У відповідності законам Максвелла, у випадку незалежності від часу, циркуляція вектору магнітного поля \vec{H} (А/м) дорівнює густині струму \vec{j} (А/м²), що охоплює контур L поля \vec{H} . У інтегральній формі цей закон, відомий як закон Ампера має вид:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I \quad (2.1)$$

де I – загальний струм, що охоплює контур L .

Візьмемо до уваги, що поле \vec{H} пов'язане з індукцією магнітного поля \vec{B} виразом:

$$B = \mu \mu_0 H \quad (2.2)$$

де μ – відносна магнітна проникність; $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ (Гн/м=Вб/А/м=Тл*м/А) магнітна проникність вакууму.

Розділимо контур інтегрування із формули [2.1] на дві частини. Інтеграл по повітряному проміжку (контур A_a) та по залізу (контур A_i). Тоді з урахуванням (2.2) маємо:

$$\int_{A_a} \frac{B}{\mu_a \mu_0} d\vec{l} + \int_{A_i} \frac{B}{\mu_i \mu_0} d\vec{l} = I \quad (2.3)$$

де μ_a – відносна магнітна проникність зазору магніту; μ_i – відносна магнітна проникність ярма магніту.

В зазорі магніту присутні повітряний проміжок, стінки вакуумної камери, вакуум. Для всіх цих речовин відносна магнітна проникність може бути прийнята 1. Відносна магнітна проникність ярма μ_i для магнітом'яких матеріалів зазвичай дорівнює 1000-3000. Тому для оцінки току збудження магніту інтегралом по залізному ярму можна знехтувати. Для приблизного розрахунку току збудження магніту формула (2.3) трансформується до:

$$B \cdot |Aa|/\mu_0 = I \quad (2.4)$$

Де $|aA|$ зазор = 0.112м (див. Рис. 2.1)

$$B = 0.01 \text{ Тл}$$

$$\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

Таким чином загальний струм збудження (ампервитки)

$$I \approx 900 \text{ А} \cdot \quad (2.5)$$

Для намотки вибираємо мідний провід (1.95x3.85), який укладено у три шари (див. Рис. 2.2). Загалом маємо 55 витків. Таким чином струм джерела збудження дорівнює 16.4А.

Розділ 3.

КАЛІБРУВАННЯ МАТРИЦІ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА

3.1. Матриця датчиків Холла

Для вимірювання сили коректорів була використана матриця датчиків Холла, яка дозволяє вимірювати поле одночасно в 7 точках. Вид матриці приведено на Рисунках 3.1 та 3.2. Матриця являє собою збірку з 7 датчиків закріплених у пазу мідної пластини (шасі). Шасі обладнано терморегулятором і вимірювачем температури.

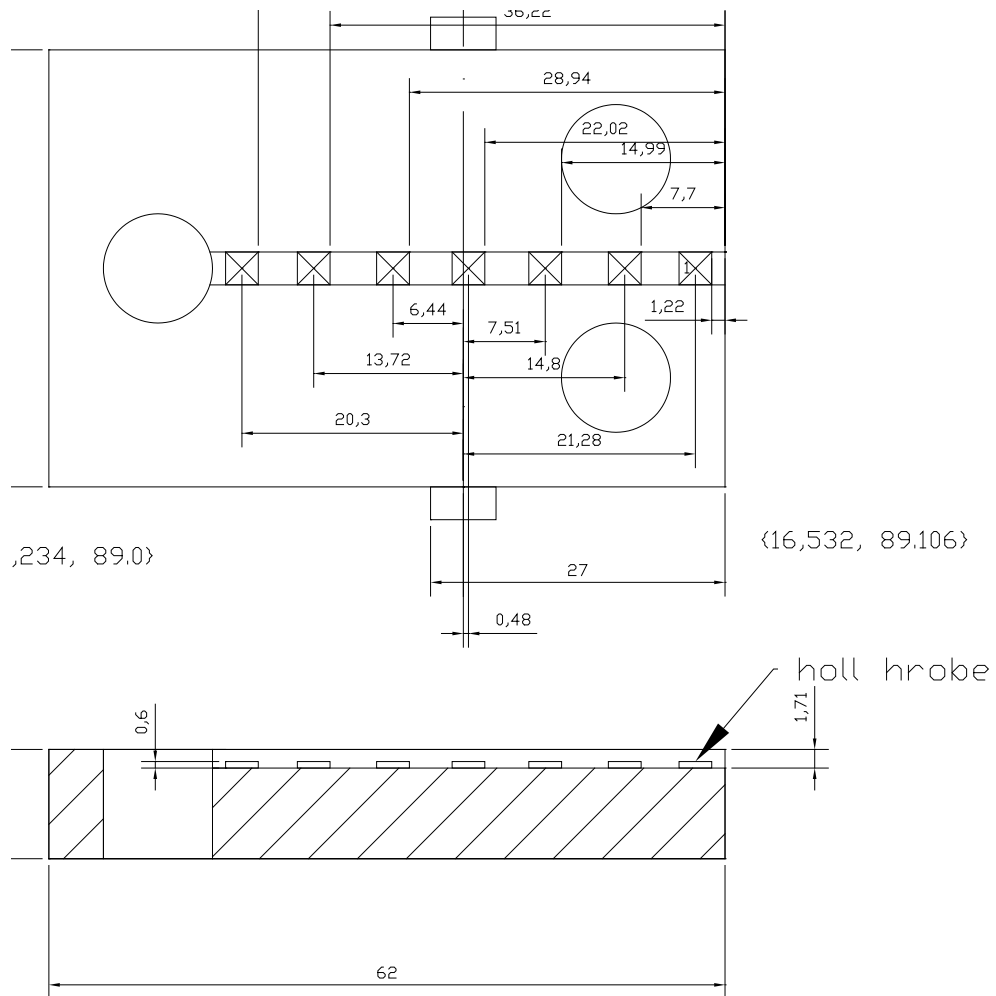


Рисунок 3.1 – Геометричні параметри матриці датчиків Холла.

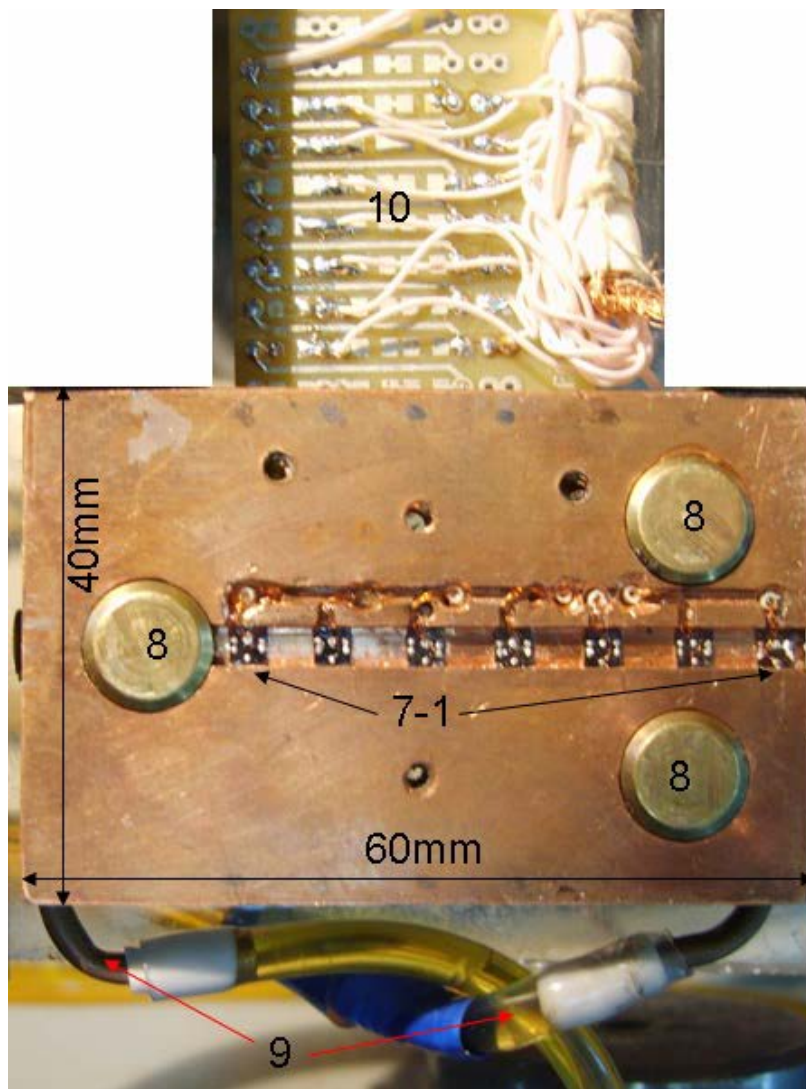


Рисунок 3.2 – Матриця Датчиків Холла.

1-7 – датчики Холла; 8 – регулятори висоти; 9 – підведення від термостата;

10 – плата розведення

Магнітометричні властивості матриці наведені у Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Матриця з 7 датчиків Холла

Датчики Холла ПХЭ 602 117В		Верхній ступінь індукції магнітного поля 5 Тл,						номінальний струм 100 мА
Номер датчику Холла		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Паспорт		890	883	880	885	888	874	873
Контакт 2 ДХ на номер контакту комутатору		4	6	10	12	16	18	22
Контакт 3 ДХ на номер контакту комутатору		3	5	9	11	15	17	21
Розташування лівого нижнього кута датчика	X	17,8	24,28	31,57	38,61	45,53	52,8	59,38
	У	110,53	110,52	110,45	110,436	110,51	110,51	110,51
Магнітна чутливість, мкВ/мТл		304	301	301	301	301	300	302
Остаточна напруга, мкВ		3	10	2	5	13	5	4
Температурний коефіцієнт ЕДС Холла, %/К		-0,09	-0,07	-0,08	-0,07	-0,09	-0,08	-0,08
Температурний коефіцієнт остаточної напруги, мкВ/К		0,28	0,51	0,77	0,51	0,28	0,77	0,77
Коефіцієнт нелінійності при $V=2Tл$, %		-0,85	-0,77	-0,79	-0,85	-0,88	-0,82	-0,84
Коефіцієнт розходження, %		-0,05	-0,01	-0,05	-0,09	-0,08	-0,06	-0,5
Вхідний опір, Ом		5,02	5,48	4,73	5,3	4,97	4,78	5,06
Вихідний опір, Ом		6,4	6,37	6,67	6,44	6,64	6,48	6,68

3.2. Тестовий магніт

Перед вимірюванням безпосередньо коректорів проведено порівняння показів матриці з показом вимірювача на основі ядерного магнітного резонансу РТ2026. Матриця і датчик ЯМР розміщувалися в зазорі тестового магніту (див. Рис.3.3 та 3.4).



Рисунок 3.3 – Тестовий магніт.



Рисунок 3.4 – Зазор тестового магніту.

Зазор тестового магніту перерізом 135x145мм забезпечує однорідне поле в достатньо великій області (40x80 мм) з точністю ($\pm 5 \cdot 10^{-4}$) (див. Рис. 3.5). На цьому рисунку приведені результати вимірів карти поля приладом РТ2026 [12] при полі в зазорі 950Гс.

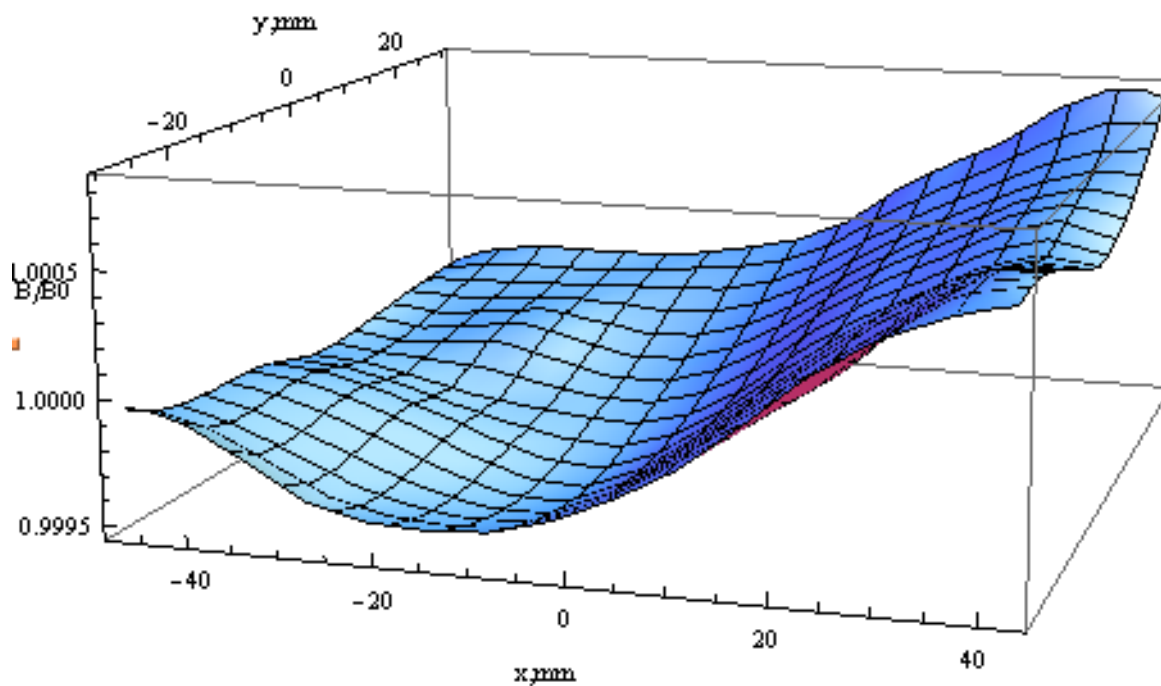


Рисунок 3.5 – Область гарного поля магніту.

3.3. Порівняльні виміри

Як показано вище, розміри області гарного поля дозволяють одночасно розмістити в однородному полі і матрицю поля і датчик ЯМР. Діапазон чутливості датчика, що використовується, 38-1450 Гс. Тому використовуючи джерело живлення ЕК100010 можна пройти діапазон -1450-+1450 Гс та порівняти відгук кожного датчика матриці на задане поле. Результати цих вимірів приведено в Таблиці 3.2 Перший стовпчик показує поле в Теслах яке було зафіксовано датчиком ЯМР, при якому проводились виміри. Стовпчики з поміткою Н1-Н7 містять відносні відхилення показів датчиків матриці від показів датчику ЯМР.

Таблиця 3.2 Порівняння Датчиків Холла і датчика ЯМР

"B0,T"	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	Н7
-0.1438	-0.0017	-0.0033	-0.0021	-0.0041	-0.0056	-0.0028	-0.0034
-0.1384	-0.0014	-0.0031	-0.0019	-0.0040	-0.0056	-0.0028	-0.0034
-0.1269	-0.001	-0.0028	-0.0018	-0.0041	-0.0061	-0.0031	-0.0036
-0.1176	-0.0014	-0.0034	-0.0023	-0.0049	-0.0071	-0.0040	-0.0045
-0.1117	-0.0003	-0.0024	-0.0014	-0.0041	-0.0066	-0.0033	0.0039
-0.0987	0.0004	-0.0020	-0.0010	-0.0041	-0.0071	-0.0034	-0.0040
-0.0847	0.0012	-0.0018	-0.0007	-0.0046	-0.0082	-0.0038	-0.0044
-0.0734	0.0019	-0.0014	-0.0004	-0.0048	-0.0092	-0.0042	-0.0047
-0.0674	0.0023	-0.0012	-0.0002	-0.0050	-0.0098	-0.0043	-0.0049
-0.0480	0.0026	-0.0018	-0.0003	-0.0067	-0.0129	-0.0049	-0.0059
0.0572	-0.0043	-0.0012	-0.0015	0.0042	0.0021	0.0019	0.002
0.0658	-0.0038	-0.0013	-0.0015	0.0037	0.001	0.0014	0.0016
0.0776	-0.0033	-0.0012	-0.0014	0.0029	-0.0002	0.0008	0.001
0.0882	-0.0030	-0.0013	-0.0015	0.0023	-0.0007	0.0005	0.0006
0.1040	-0.0027	-0.0014	-0.0014	0.0018	-0.0012	-0.0000	0.0000
0.1134	-0.0026	-0.0013	-0.0015	0.0015	-0.0013	-0.0003	-0.0000
0.1258	-0.0026	-0.0016	-0.0017	0.001	-0.0015	-0.0006	-0.0005
0.1391	-0.0025	-0.0017	-0.0017	0.0007	-0.0016	-0.0008	-0.0008

Із таблиці видно, що відносні відхилення не перевищують 0.01, чого достатньо для поставлених цілей (див. Розділ 1).

Розділ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

4.1. Техніка вимірювання

Зовнішній вигляд коректорів приведено на Рисунку 4.1. Виміри основані на одночасному вимірюванні магнітуди поля у 7 точках за допомогою матриці датчиків Холла. Датчики розміщуються на немагнітній штанзі і переміщуються вздовж траєкторії електрона у прискорювачі. Таким чином виявляється карта поля, чого достатньо для отримання величини ефективної довжини коректора.



Рисунок 4.1 – Вид коректора з матрицею на дюралевій штанзі по центру апертури

Зважаючи на велику апертуру вакуумпровода зазор коректора 12мм передбачає великі відстані вивалу поля (приблизно 200 мм) в обидві сторони. Тому довжина траси протягування датчиків обрано 400мм з розміщенням коректора у центрі цього діапазону. Виміри здійснювалися з інтервалом 5мм в

області близької до ярма і 10 мм на віддаленні більше 100мм від края коректора. Відносний приріст (спад) поля від виміру до виміру не перевершував 10% відносно попереднього виміру.

Обмотки коректорів запитувалися струмом 15А.

4.2. Сила коректорів

Результати вимірів поля ілюструються Рисунком 4.2, на якому приведена мапа поля. На Рисунку 4.3 приведено розподіл поля вздовж траєкторії пучка. Такий розподіл дає чисельну характеристику ефективної довжини коректора (див. (1.6), (1.7))

$$L_{ef}=0.166 \text{ м}$$

З урахуванням вимоги до сили коректора сформульованої у розділі 1 (1.7), магнітуда поля повинна складати:

$$B_0=120.6 \text{ Гс.}$$

Така величина поля досягається при струмі збудження:

$$I=18.7 \text{ А}$$

Ця величина декілька більша, ніж закладена у 2-мірних розрахунках коректора (16.4 А), що пов'язано з 3-мірним розсіянням поля у реальному магніті.

$$B_0=96\text{Гс}$$

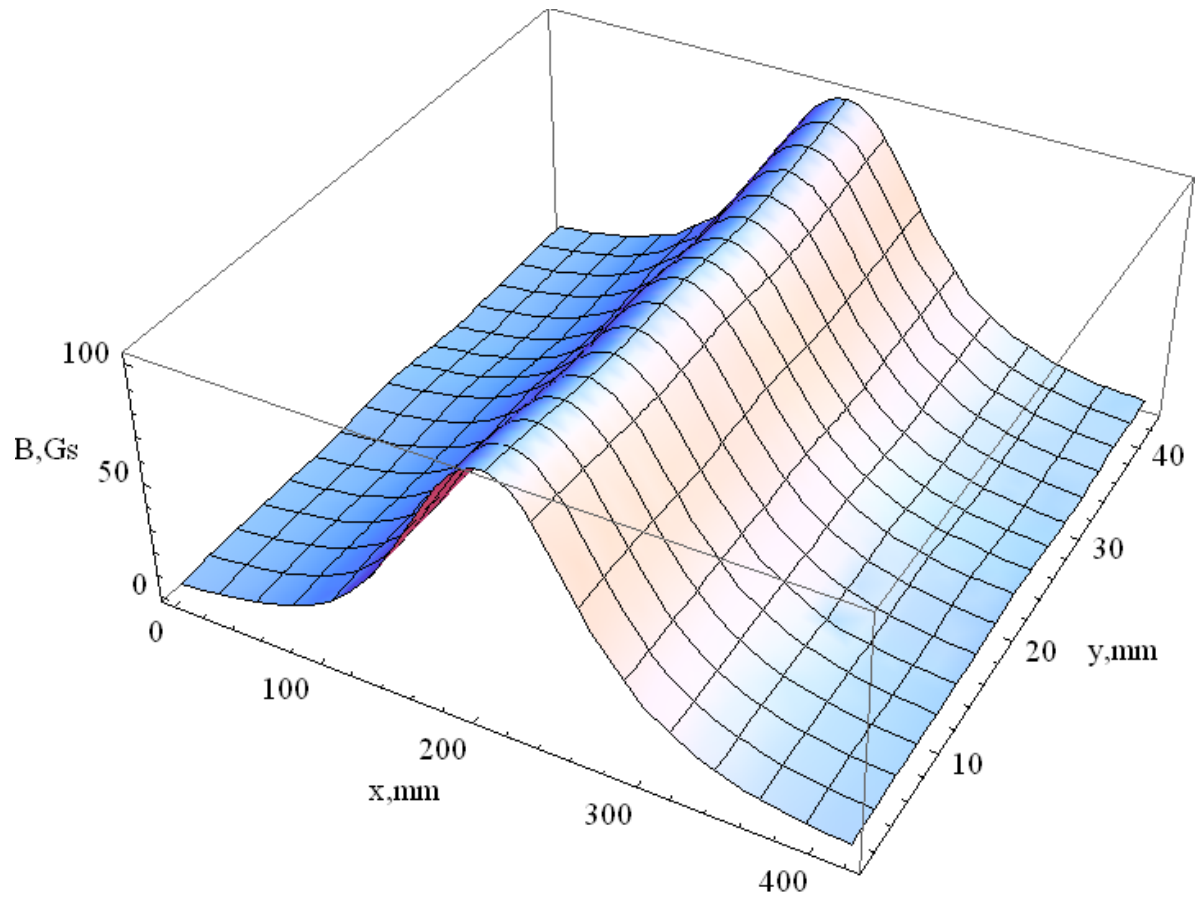


Рисунок 4.2 – Розподіл поля у медіанній площині коректора.

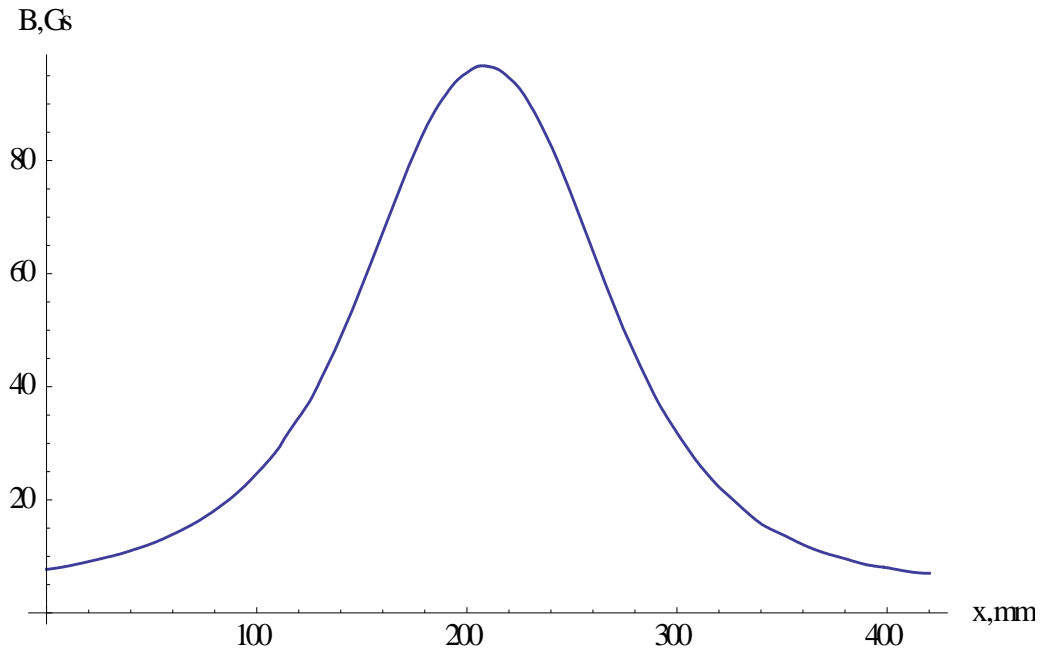


Рисунок 4.3 – Розподіл поля у медіанній площині вздовж траєкторії електрона.

ВИСНОВКИ

Ця робота є частиною створення системи контролю та управління положенням пучка електронів на нейтронно-створювальній мішені підкритичної збірки джерела нейтронів. В якості виконуючої частини обрано дипольні двохкоординатні коректори.

В ході цієї роботи проведено розрахунки вимог до магнітів та конструкції магнітів.

Були проведені вимірювання основних магнітооптичних властивостей, а саме ефективної довжини, необхідної магнітуди поля, а також визначено (уточнено) силу струму для збудження коректорів.

Отримані в роботі результати показали реалізуємість корекції орбіти в прискорювачі 100MeV 100кВт джерела нейтронів ННЦ ХФТІ.

Введення описаної корекції орбіти підсилить безпеку при експлуатації прискорювача та поліпшить керованість всієї системи провідки пучка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. CERN Accelerator School. Basic Course of General Accelerator Physics. CERN-2005-004, 2005.
2. Гладких П.И., Карнаухов И.М., Муратов В.И. Введення в оптику пучків заряджених частинок та фізику прискорювачів. Навчальний посібник Харків, 2006.
3. CERN Accelerator School. General Accelerator Physics. CERN-85-19-V1, 1985.
4. Карташев В.П., Котов В.И. Основы магнітної оптики пучків заряджених частинок. М., Энергоатомиздат, 1984.
5. A. Zelinsky, O. Bezditko, P. Demchenko, et al. NSC KIPT neutron source on the base of subcritical assembly driven with electron linear accelerator // Proceedings of IPAC 2013. 2013, p. 3481-3483.
6. A. Zelinsky, M.I. Ayzatskiy, B.V. Borts, et al. NSC KIPT neutron source // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”. 2012, N 3, p. 3-9.
7. A. Zelinsky, Y. Chi, S. Pei, et al. Design studies on 100 MeV/100 kW electron linac for NSC KIPT neutron source on the base of subcritical assembly driven by linac // Proceedings of IPAC11. 2011, p. 1075-1077.
8. A. Zelinsky, O. Bezditko, O. Gordienko, et al. 100 MeV/100 kW accelerator adjustment for the NSC KIPT neutron source physical start up // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”. 2020, N 5, p. 135-142.
8. The MAD-X Program (Methodical Accelerator Design), Version 5.07.00. User’s Reference Manual. CERN, 2021.
9. Electron and ion optics. Mikolos Szilgyi University of Arizona Tucson, Arizona Plenum press New York and London, 640p.

10. I.M. Karnaukhov, A.O. Mytsykov, A.V. Rezaev, V.E. Rudenko, D.V. Tarasov, A.Yu. Zelinsky. LINEAR ACCELERATOR MAGNETIC SYSTEM OF THE NSC KIPT SUBCRITICAL ASSEMBLY “NEUTRON SOURCE”, ISSN 1562-6016. Problems of Atomic Science and Technology. 2024. №3(151)
11. <https://www.metrolab.com/wp-content/uploads/2021/06/PT2026-Key-specifications-v1.2.pdf>