

## СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ НА МИШЕНИ

*Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача<sup>1</sup>, Н. И. Лебедев, А. А. Фатеев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются результаты разработки нового для систем сканирования пучка в ОИЯИ направления, которое характеризуется рядом особенностей. Отклоняющие магниты имеют обмотки с большой величиной ампер-витков, работающие на сравнительно низких частотах ( $\leq 20$  Гц) для сохранения величины реактивной мощности в разумных пределах. Источники питания обмоток используют системы обратной связи для формирования токов заданной формы и амплитуды. Приведены основные конструктивные особенности и параметры опытного образца магнита, а также результаты разработки и испытания электронной схемы питания магнита током заданной формы. Представлены результаты расчетов распределений плотности различных ионов на мишени для одного из каналов циклотрона У-400М, полученных с использованием параметров разработанных сканеров.

The paper deals with the results of the development of new scanning system at JINR, which is characterized by the following features. Bending magnets have windings with a large quantity of ampere-turns operating at relatively low frequencies ( $\leq 20$  Hz) to save the reactive power within reasonable limits. Power supplies of the windings use the feedback system to generate currents of the given shape and amplitude. The basic design features and parameters of the magnet prototype, as well as the results of development and testing the electronic circuit for supply of the magnet by the current with the predetermined shape are presented. The calculation results of the density distributions of the different ions on the target in one of the beam lines of the cyclotron U-400M are presented. The parameters of the new scanners were used in these calculations.

PACS 29.27 EG

### ВВЕДЕНИЕ

В выводных каналах ускорителей заряженных частиц для ряда научных и прикладных целей применяются отклоняющие устройства с периодическим воздействием на пучок — сканеры [1, 2]. Использование сканеров позволяет снизить локальные перегревы мишеней, а также обеспечить равномерную засветку стационарных и движущихся мишеней.

Отклонение заряженных частиц происходит в электрических или магнитных полях. Электрические поля обычно используются для частиц с относительно невысокой энергией или для отклонений на небольшие углы [3]. При этом, как правило, частоты

---

<sup>1</sup>E-mail: kazacha@dubna.ru

сканирования довольно высокие и достигают нескольких килогерц. Ограничения по амплитудам воздействующих полей возникают из-за явлений пробоя.

Более распространенными являются магнитные сканеры, которые условно можно разделить на две группы:

— воблеры — магниты с синусоидальным током в обмотках и сдвигом токов в магнитах по фазе или частоте;

— линейные сканеры — магниты с запиткой от инверторов напряжения (обычно двуполярный меандр), формирующих в обмотках токи пилообразной формы.

Несколько систем сканирования такого типа было изготовлено для каналов ускорителей, созданных в ЛЯР ОИЯИ (У-400, У-400М [4], ДЦ-60 [5], ИЦ-100 [2], ДЦ-110 [3]), и эксплуатируется в настоящее время.

Эти сканеры работают в диапазоне частот 80–200 Гц и формируют магнитные поля амплитудой до 400 Гс. Дальнейшее увеличение магнитных полей при таких частотах представляется затруднительным из-за высокой реактивной мощности. Снижение же частоты без изменения подхода к системе питания приводит к нелинейностям токов и снижению эффективности. Предел по низким частотам определяется постоянной затухания обмоток магнитов  $\tau = L/R$ .

Для разработанных новых сканеров было проведено моделирование процесса получения однородного распределения плотности ионов на неподвижной мишени канала, предназначенного для тестирования микросхем пучками тяжелых ионов [4]. Поскольку на первом этапе эксплуатации новой системы сканирования предполагалось использование системы питания сканеров от инверторов напряжения, в процессе моделирования ток в обмотках сканеров считался линейным и учитывались нелинейные эффекты для случая, когда  $\tau = 75$  мс.

## 1. НИЗКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ

Настоящая работа посвящена развитию нового для систем сканирования в ОИЯИ направления, которое характеризуется следующими особенностями:

— отклоняющие магниты обладают обмотками с большой величиной ампер-витков, работающими на сравнительно низких частотах ( $\leq 20$  Гц) для сохранения реактивной мощности в разумных пределах;

— источники питания обмоток используют системы обратной связи для формирования токов заданной формы и амплитуды.

Такой подход позволяет в режиме реального времени регулировать в широких пределах как геометрические параметры облучаемой области, так и однородность засветки, что, в свою очередь, расширяет области применения таких систем. В частности, большие перспективы открываются для ускорительных радиологических установок.

Ограничения существенны только для быстро движущихся мишеней (рулонных пленок).

## 2. ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ

В процессе проведения работ по магнитному сканеру была разработана техническая документация на изготовление макета магнита. На рис. 1 показана 3D-модель конструкции магнита.

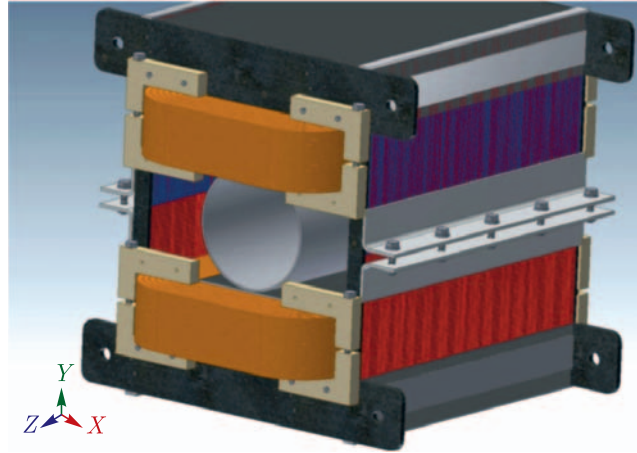


Рис. 1. 3D-модель конструкции магнита

Был также изготовлен и успешно испытан полномасштабный макет магнита. Магнитопровод набран из шихтованного железа. Пластины, формирующие поперечное распределение магнитного поля, установлены с зазорами для прохождения охлаждающего воздуха. Обмотки магнита также имеют воздушные зазоры для принудительного воздушного охлаждения. Магнитное поле в зазоре магнита связано с током в катушках соотношением  $B = 43 \text{ Гс/А}$ . Предварительные эксперименты показали возможность достичь среднего тока в обмотках магнитного сканера 30 А, что для пилообразного тока соответствует амплитуде 50 А.

### 3. ГЕНЕРАТОР ТОКА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Для формирования тока произвольной формы в индуктивной нагрузке в данной работе использован метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющий управлять амплитудой напряжения (тока) на нагрузке. Сквозность управляющих сигналов периода управления импульсного коммутатора определяется амплитудой разностного сигнала между амплитудой входного и амплитудой сигнала обратной связи с датчика тока нагрузки. Частота тактового генератора произвольной формы много выше частоты входного сигнала.

На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема электронной аппаратуры для формирования тока произвольной формы в индуктивной нагрузке L.

Аппаратура состоит из следующих основных частей:

- задающего синтезатора формы и амплитуды управляющего сигнала (Synth);
- тактового генератора пилообразной формы (Clock);
- усилителя сравнения, задающего форму тока сигнала и сигнала с измерителя тока в обмотке магнита (Comp);
- широтно-импульсного модулятора (PWM);
- мостового преобразователя постоянного напряжения в импульсное переменное (Bridge);
- измерителя тока на базе датчика Холла в обмотке магнита (Sensor);
- источника питания постоянного напряжения (PS).

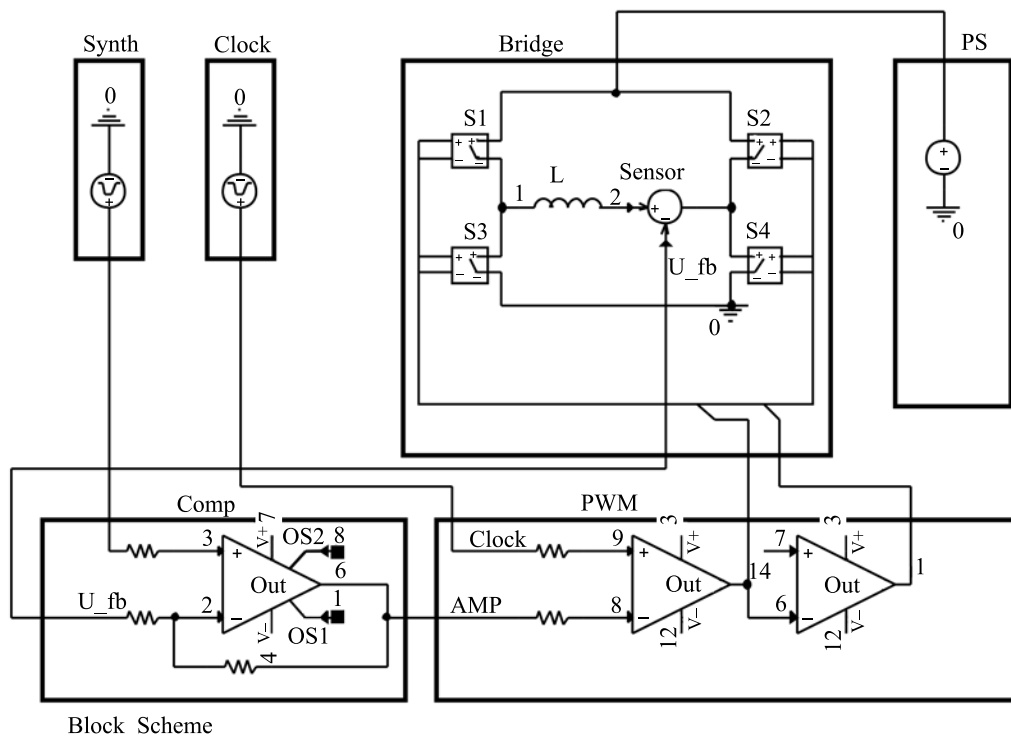


Рис. 2. Упрощенная структурная схема электронной аппаратуры

Для оценки величин рабочих токов и напряжений на элементах схемы, а также выбора элементной базы для аппаратуры и выбора схемы источника питания была разработана упрощенная схема PSpice-модели устройства для моделирования происходящих процессов (рис. 3).

На рис. 4 представлены результаты моделирования генерации тока в индуктивной нагрузке L1 (нижняя кривая) при управлении генератором произвольной формы (Input) (верхняя кривая). Рисунок иллюстрирует тот факт, что форма и амплитуда тока в индуктивной нагрузке L1 соответствуют параметрам входного сигнала и синтезатора частот с коэффициентом преобразования  $\sim 30$  A/V относительно входного сигнала «Input».

Синтезатор частот определял вначале пилообразный ток в нагрузке с амплитудой 30 А с частотой 10 Гц, затем постоянный положительный и отрицательный ток  $+3,25/-3,25$  А, формирование синусоидального напряжения с амплитудой 15 А со смещением по постоянному току  $+3,25$  А и частотой 11 Гц и пилообразный ток с ограничением в нагрузке с амплитудой 30 А и частотой 10 Гц.

Следует отметить, что для питания данной аппаратуры не требуется стабилизированный регулируемый источник питания, так как система обратной связи обеспечивает стабилизацию амплитуды тока в нагрузке в соответствии с амплитудой входного сигнала с синтезатора.

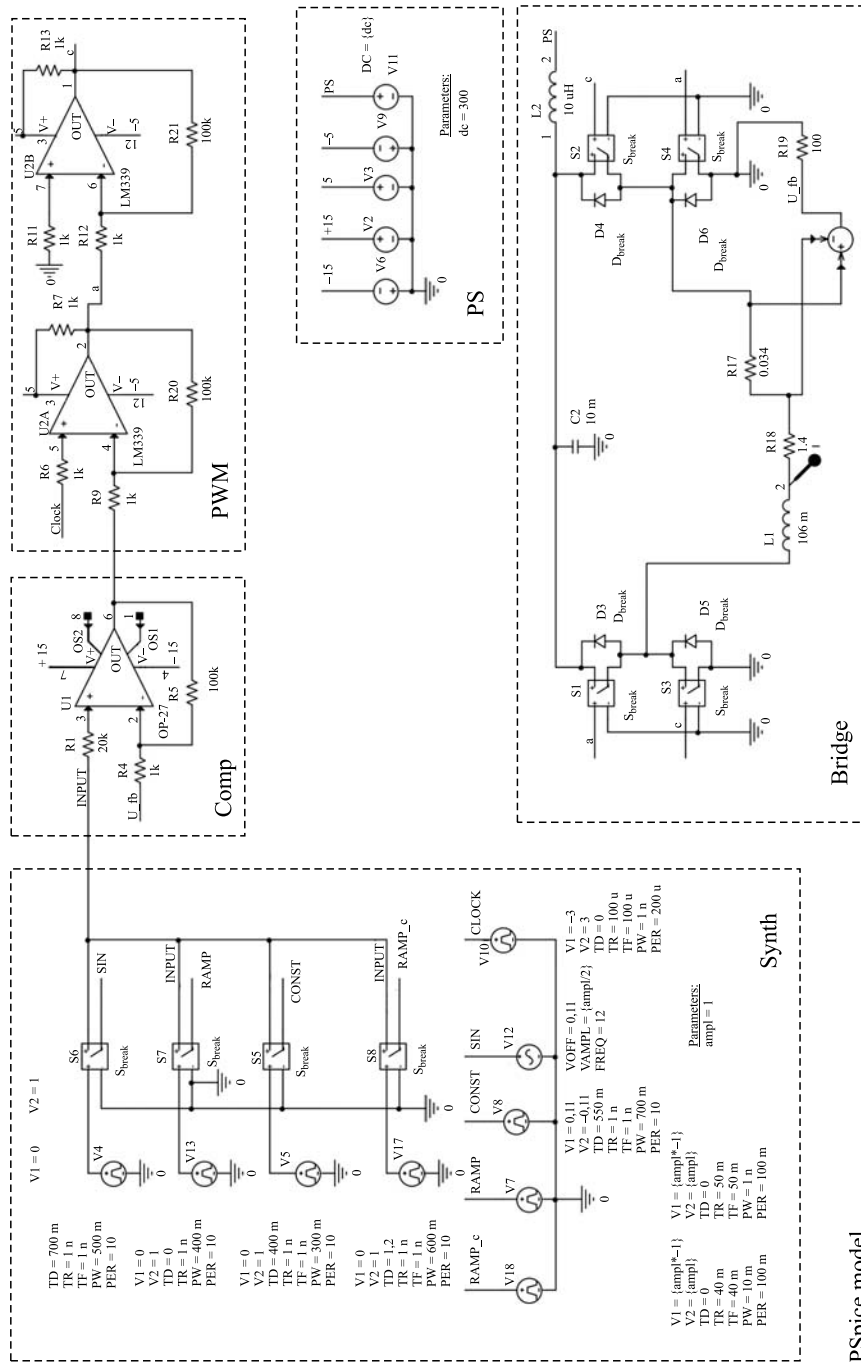


Рис. 3. Вариант PSpice-модели схемы аппаратуры питания

PSpice model

В соответствии с вышеописанным подходом был разработан, изготовлен и испытан на реальной нагрузке полномасштабный образец генератора тока произвольной формы.

На рис. 5–9 представлены осциллограммы тока в обмотках магнита при генерации токов различной формы.

Рабочее напряжение источника питания 250 В, частота повторения 10 Гц, детектор тока в индуктивности — датчик Холла (чувствительность детектора 34 мВ/1 А).

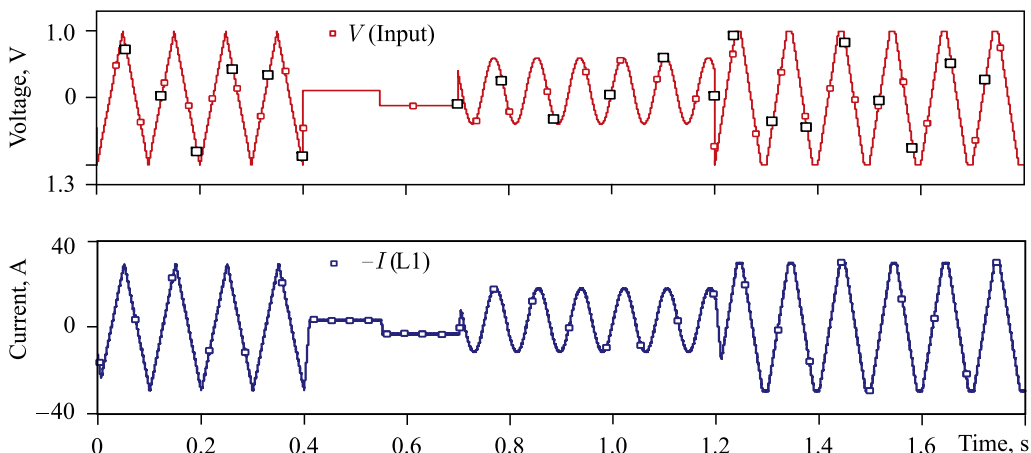


Рис. 4. Результаты моделирования генерации тока в индуктивной нагрузке

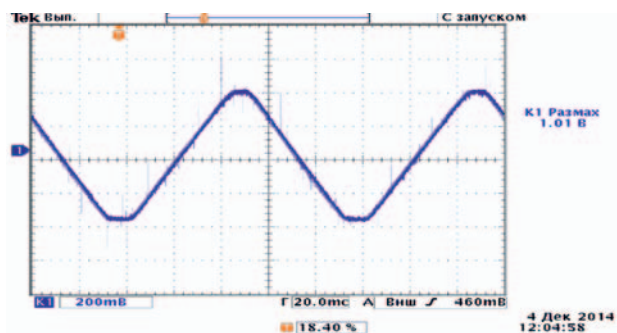


Рис. 5. Форма тока — «трапеция». Оптимальна для сканирования пучков «средних» размеров

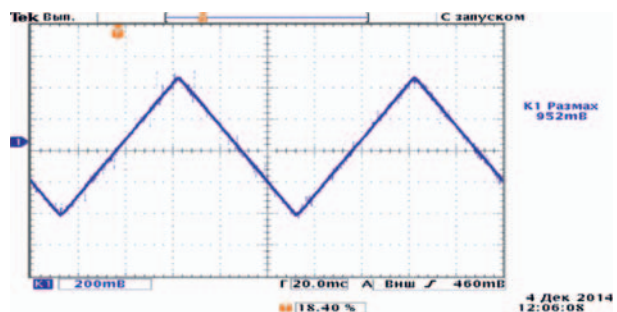


Рис. 6. Форма тока — «пила». Оптимальна для сканирования пучков «малых» размеров

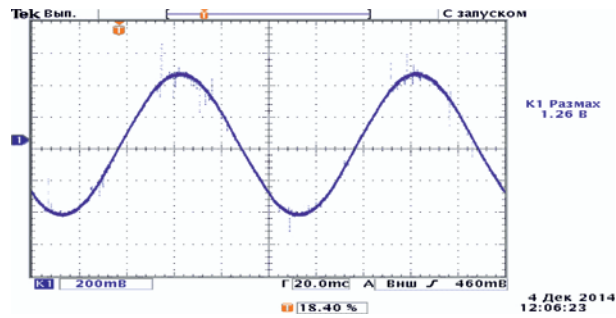


Рис. 7. Форма тока — «синусоида». Оптимальна для сканирования пучков «больших» размеров по эллиптическим траекториям

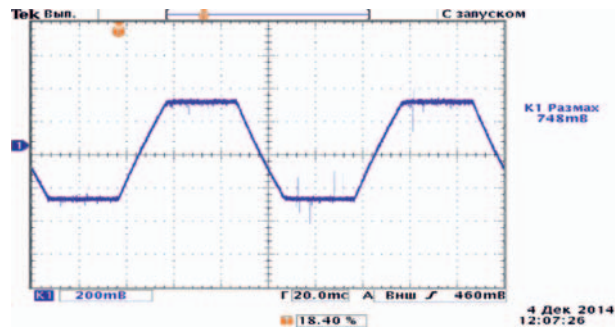


Рис. 8. Форма тока — «широкая трапеция». Минимальный фронт определяется напряжением питания

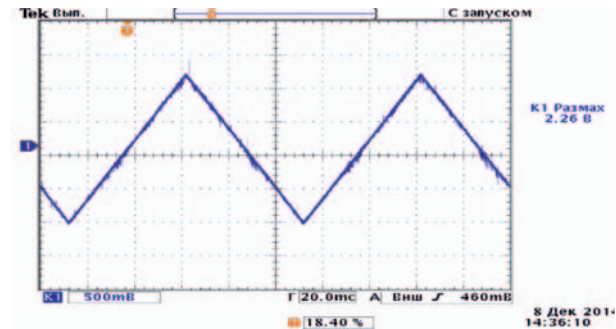


Рис. 9. Максимальная достигнутая амплитуда пилообразного тока ( $I = 15$  А/дел., что соответствует 600 Гс/дел.)

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ КАНАЛА ЦИКЛОТРОНА У-400М ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ НОВЫХ МАГНИТНЫХ СКАНЕРОВ

Проведено моделирование работы новой системы сканирования в канале, предназначенном для облучения микросхем тяжелыми ионами. Схема конечной части канала с новыми сканерами приведена на рис. 10.

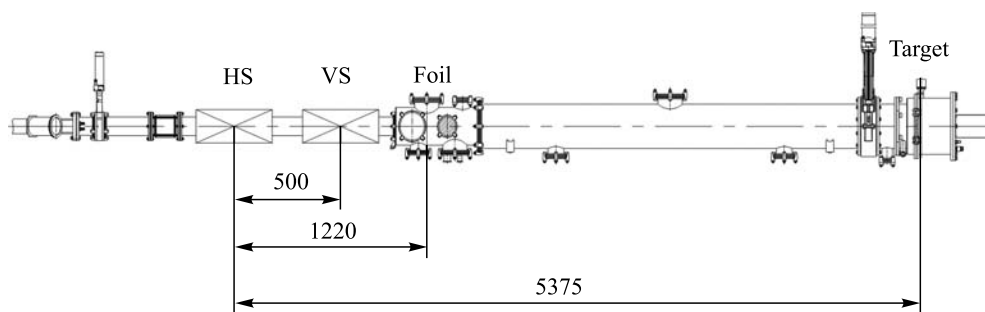


Рис. 10. Схема канала: HS — горизонтальный сканер; VS — вертикальный сканер; Foil — деградер

Параметры новой системы сканеров следующие:

- амплитуда индукции магнитного поля  $B_0$  до 1500 Гс;
- длина сканеров 30 см;
- частота горизонтального сканера  $f_x = 10$  Гц;
- частота вертикального сканера  $f_y = 11$  Гц.

Размер облучаемой неподвижной мишени  $200 \times 200$  мм. Неоднородность полученного распределения частиц на мишени не должна превышать величины  $\pm 5\%$ .

После прохождения системы сканеров энергия пучка ионов уменьшается до требуемого значения на фольге деградера, приводящей к увеличению углового разброса частиц.

При моделировании считалось, что пучок имеет гауссово распределение плотности. Среднеквадратичный размер пучка на мишени  $\sigma$  рассчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_f^2}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_0$  — среднеквадратичный размер пучка на мишени при выключенных сканерах и убранной фольге деградера. В соответствии с экспериментальными данными диаметр пучка на мишени  $4\sigma_0$  равен 8 см. Величина  $\sigma_f$  соответствует возрастанию среднеквадратичного размера пучка, связанного с дополнительным угловым разбросом частиц, который появляется после прохождения фольги деградера. Величина  $\sigma_f$  зависит от энергии пучка, материала и толщины выбранной фольги и изменяется в пределах от  $\sim 2,2$  до  $\sim 11$  см [6]. Параметры пучков ионов, а также материал и толщина фольги деградера приведены в табл. 1.

В расчетах использовались линейные (с пилообразной формой токов (рис. 9)) сканеры и учитывалась нелинейность токов в обмотках сканеров. Индуктивность обмотки сканера составляла 105 мГн, а эквивалентное сопротивление цепи равнялось 1,4 Ом. Соответственно, постоянная времени  $LR$  цепи составляла 75 мс.

На рис. 11 представлена рассчитанная траектория движения центра масс (ЦМ) пучка на мишени для случая № 1 ( $^{40}\text{Ar}^{16+}$ ) в табл. 1. Она соответствует однократному облучению мишени за время  $T_0 = 1$  с. На рис. 12 показана траектория, определенная без учета нелинейности токов в обмотках сканеров. При сравнении рисунков можно говорить о существенном влиянии нелинейностей на движение ЦМ.



Таблица 1. Параметры пучков ионов, материал и толщина фольги деградера

№	Тип иона	Энергия, МэВ/нуклон	$B\rho$ , Тл · м	Материал/толщина фольги, мкм	Размер пучка на мишени $4\sigma$ , см
1	$^{40}\text{Ar}^{16+}$	6,4	0,912	Ta/9	34,8 см
2	$^{40}\text{Ar}^{16+}$	6,4	0,912	Ta/12,5	45,2
3	$^{209}\text{Bi}^{58+}$	3,8	1,012	Al/6	11,2
4	$^{20}\text{Ne}^{9+}$	5,0	0,715	Al/20	16,2
5	$^{40}\text{Ar}^{16+}$	4,85	0,793	Al/15	14,1
6	$^{40}\text{Ar}^{16+}$	4,85	0,793	Al/18	15,8
7	$^{84}\text{Kr}^{30+}$	5,55	0,95	Al/18	13,8
8	$^{132}\text{Xe}^{42+}$	4,8	0,992	Al/10	11,9

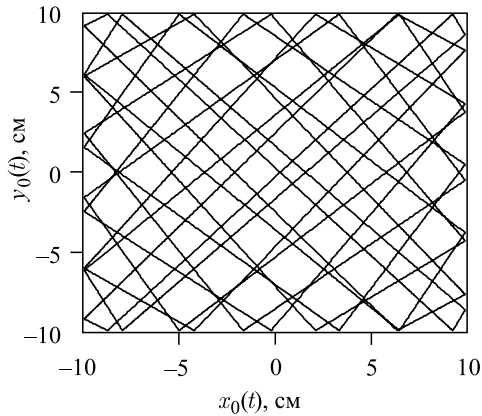


Рис. 11. Траектория движения ЦМ пучка на мишени

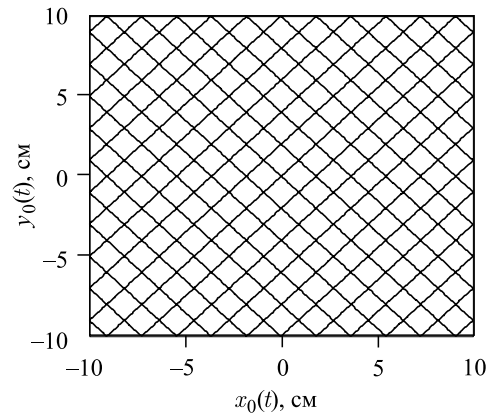


Рис. 12. Траектория движения ЦМ пучка на мишени без учета нелинейности

Для того чтобы обеспечить требуемую однородность облучения, амплитуда  $A$  колебаний ЦМ должна удовлетворять соотношению

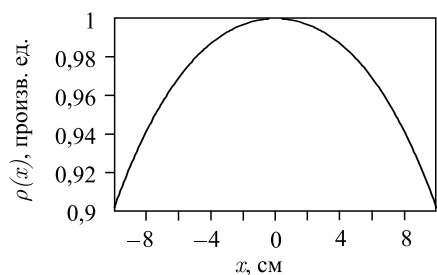
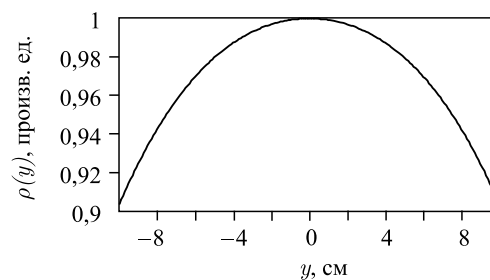
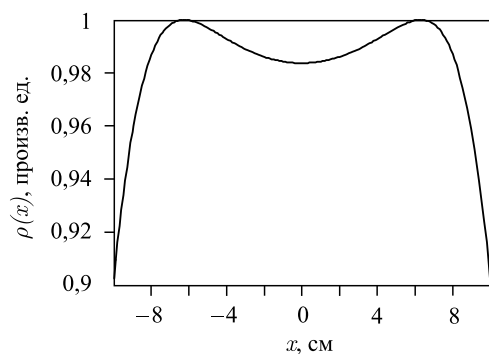
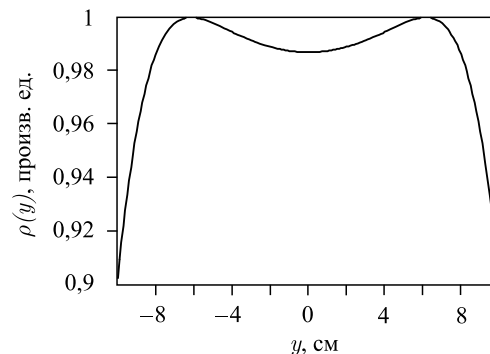
$$A \cong \sigma + a, \tag{2}$$

$2a$  — размер области облучения.

На рис. 13 и 14 показаны рассчитанные горизонтальное  $\rho(x)$  и вертикальное  $\rho(y)$  распределения частиц на мишени для случая №1 в табл. 1. Требуемые амплитуды магнитных полей линейных сканеров  $B_{0x} = 1118$  Гс,  $B_{0y} = 1243$  Гс.

В случае №2 ( $^{40}\text{Ar}^{16+}$ , табл. 1) диаметр пучка на мишени  $\cong 45$  см, тогда для получения линейными сканерами распределения частиц с нужной неоднородностью требуются еще большие амплитуды магнитных полей в сканерах:  $B_{0x} = 1215$  Гс,  $B_{0y} = 1345$  Гс. В этом случае распределения частиц на мишени совпадают с распределениями, показанными на рис. 13 и 14.

На рис. 15 и 16 приведены рассчитанные горизонтальное  $\rho(x)$  и вертикальное  $\rho(y)$  распределения частиц на мишени для случая №3 ( $^{209}\text{Bi}^{58+}$ ) в табл. 1.

Рис. 13. Распределение частиц при  $y = 0$ Рис. 14. Распределение частиц при  $x = 0$ Рис. 15. Рассчитанное распределение частиц при  $y = 0$ Рис. 16. Рассчитанное распределение частиц при  $x = 0$ 

Распределения частиц с требуемой однородностью амплитуды магнитных полей  $B_{0x} = 899$  Гс,  $B_{0y} = 1000$  Гс линейными сканерами получаются меньше, чем в случаях № 1, 2, что связано с меньшим размером пучка.

В случаях №№ 4–8 (см. табл. 1) распределения частиц на мишени совпадают с распределениями, показанными на рис. 15 и 16, но для каждого из них требуются свои величины амплитуд индукции магнитного поля сканеров. В табл. 2 приведены результаты расчетов для всех рассмотренных случаев.

Таблица 2. Результаты расчетов

Элемент	$W$ , МэВ/нуклон	$B\rho$ , Тл·м	$\sigma$ пучка на мишени, см	Материал/ толщина фольги, мкм	Макс. амплитуды колебаний ЦМ пучка $A_x/A_y$ , см	Амплитуда магнитного поля в сканерах $B_{0x}/B_{0y}$ , Гс	Потери, %
$^{40}\text{Ar}^{16+}$	6,4	0,912	8,7	Ta/9	19,7/19,9	1118/1243	67
$^{40}\text{Ar}^{16+}$	6,4	0,912	11,3	Ta/12,2	21,4/21,56	1215/1345	68
$^{209}\text{Bi}^{58+}$	3,8	1,01	2,8	Al/6	14,2/14,38	899/1000	46
$^{20}\text{Ne}^{9+}$	5,0	0,716	4,2	Al/20	14,7/14,9	658/733	37
$^{40}\text{Ar}^{16+}$	4,85	0,793	3,5	Al/15	13,9/14,0	688/768	37
$^{40}\text{Ar}^{16+}$	4,85	0,793	3,95	Al/18	14,4/14,7	716/804	37
$^{84}\text{Kr}^{30+}$	5,55	0,95	3,4	Al/18	13,8/13,9	820/1103	37
$^{132}\text{Xe}^{42+}$	4,8	0,992	3,0	Al/10	13,3/13,4	827/916	37

Реальные пучки ионов могут иметь распределение плотности частиц по сечению пучка, не совпадающее с гауссовым. Например, в пучке может образоваться кластер диаметром  $\sim 4$  см, в котором содержится значительная часть частиц. Расчеты показали, что для такого пучка и для частот  $f_x = 10$  Гц и  $f_y = 11$  Гц не удастся получить требуемый уровень однородности распределения  $\rho(x, y)$ . Это объясняется влиянием нелинейностей, искажающих движение ЦМ пучка (см. рис. 11, 12). Отметим, что использование предлагаемой в данной работе системы питания сканеров позволит устранить нелинейности и получать требуемую однородность распределения и для пучков диаметром  $\sim 4$  см.

При использовании схемы питания сканеров от инверторов напряжения эта задача может быть решена при увеличении частот сканеров до  $f_x = 20$  Гц и  $f_y = 21$  Гц. Однако увеличение в два раза частоты работы сканеров приведет к росту мощности потерь, что нежелательно.

Альтернативный путь решения задачи заключается в переходе на частоты  $f_x = 10$  Гц и  $f_y = 11,5$  Гц. Время полного однократного облучения мишени  $T_0$  определяется из следующего соотношения:

$$T_0 = \frac{N_x}{f_x} = \frac{N_y}{f_y}. \quad (3)$$

Здесь  $f_x$  и  $f_y$  — частоты колебаний токов в горизонтальном и вертикальном сканерах соответственно;  $N_x$  и  $N_y$  — минимально возможные целые числа. Эти величины связаны равенством

$$N_x T_x = N_y T_y, \quad (4)$$

где  $T_x$  и  $T_y$  — периоды колебаний токов в горизонтальном и вертикальном сканерах. Подставляя в (4)  $f_x = 10$  Гц и  $f_y = 11$  Гц, получаем, что  $N_x = 10$ ,  $N_y = 11$  и в соответствии с (3)  $T_0 = 1$  с.

Для случая, когда  $f_x = 10$  Гц и  $f_y = 11,5$  Гц, получаем, что  $N_x = 20$ ,  $N_y = 23$ , а  $T_0 = 2$  с. На рис. 17 показано движение ЦМ пучка диаметром 4 см на мишени для частот  $f_x = 10$  Гц и  $f_y = 11,5$  Гц.

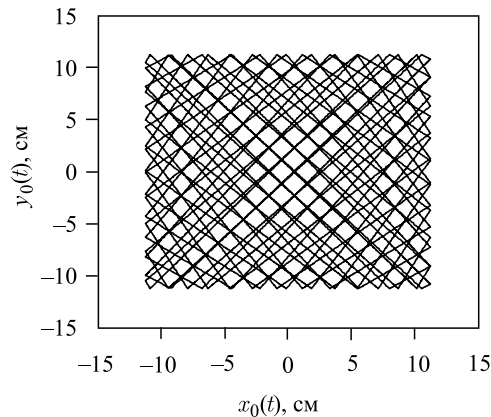
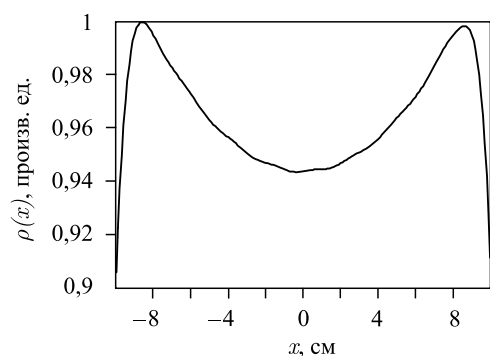
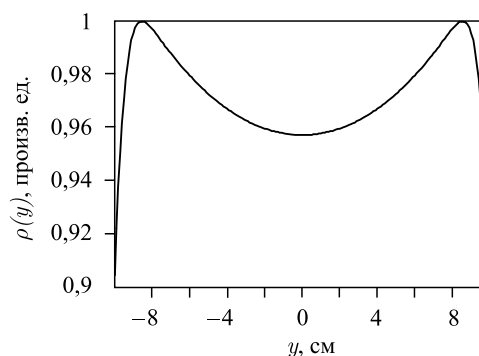


Рис. 17. Траектория движения ЦМ пучка на мишени

Рис. 18. Рассчитанное распределение частиц при  $y = 0$ Рис. 19. Рассчитанное распределение частиц при  $x = 0$ 

На рис. 18 и 19 представлены рассчитанные горизонтальное  $\rho(x)$  и вертикальное  $\rho(y)$  распределения частиц на мишени. Из рисунков видно, что небольшое изменение частот сканеров позволяет получить требуемую однородность распределения частиц на мишени, однако время однократного облучения увеличивается при этом в два раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана концепция конструкции сканирующего магнита с полем 1500 Гс.
2. Изготовлен и успешно испытан полномасштабный макет магнита.
3. Разработан вариант схемы генератора тока произвольной формы, работающего на индуктивно-резистивную нагрузку (обмотку магнита).
4. Экспериментальная схема испытана на реальную нагрузку с индуктивностью  $L = 106$  мГн и сопротивлением  $R = 1,4$  Ом при различных формах выходного тока и амплитуде тока до 33 А.
5. Проведено моделирование схемы сканирования ионных пучков на мишени размером  $200 \times 200$  мм. Требуемая неоднородность пучка  $\pm 5\%$  достигается для размеров пучков на мишени при диаметре сечения пучка, меньшем 45,2 см.
6. Требуемая амплитуда индукции магнитного поля не превышает 1300 Гс и находится в допустимом проектном диапазоне.
7. Рабочая частота горизонтального сканера  $f_x = 10$  Гц и вертикального —  $f_y = 11$  Гц.
8. Небольшое изменение частот сканеров ( $f_x = 10$  Гц,  $f_y = 11,5$  Гц) позволяет получить требуемую однородность распределения частиц на мишени при уменьшении диаметра пучка до 4 см.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gikal B. N. et al. Analyses of Methods for Obtaining of a Uniform Particle Distribution on a Target When It Is Irradiated with a Krypton Ion Beam Extracted from the Implantator IC-100. JINR Commun. P9-2002-240. Dubna, 2002.
2. Gikal B. N. et al. Raster System for Heavy Ion Beam // Phys. Part. Nucl. Lett. 2005. V.2, No.3. P.187–189.

3. *Gikal B.N. et al.* Development, Creation and Start Up of DC-110 Heavy Ion Cyclotron Complex for Industrial Production of Track Membranes // *Part. Nucl., Lett.* 2014. V. 11, No. 2(186). P. 233–253.
4. *Fateev A. et al.* Ion Scanning System in Beam Line U-400M Cyclotron for Electronic Compound Testing // *Proc. of Rus. Accel. Conf. (RUPAC-2010)*, Protvino, Russia, 2010. P. 387–389.
5. *Gikal B.N. et al.* Beam Line for Applied Investigations of Low Energy Ion Beams of Cyclotron DC-60. *JINR Commun.* P9-2006-38. Dubna, 2006.
6. *Tarasov O.B., Bazin D.* LIZE++, Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2008. V. 266. P. 4657–4664.

Получено 8 мая 2015 г.