

Способы фокусировки в трубках с прострельным анодом

И. М. Баранов¹, Е. Д. Холопова², А. Ю. Атаян³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ibaranov86@gmail.com, ²wkholopova@gmail.com, ³adelinaataan@gmail.com

Аннотация. Дан сравнительный анализ достоинств и недостатков различных систем фокусировки микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным анодом. Приведены результаты макетирования комбинированной фокусирующей системы.

Ключевые слова: микрофокусная рентгеновская трубка, электромагнитная система фокусировки

I. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновские трубки с прострельным анодом являются одним из быстроразвивающихся классов источников рентгеновского излучения. Возможность расположить объект исследования в буквально в нескольких миллиметрах от фокусного пятна открывает широкие возможности применения данного класса трубок в рентгеновской терапии, съемки с большим коэффициентом прямого геометрического увеличения, рентгеноструктурном анализе и др.

II. АНАЛИЗ СИСТЕМ ФОКУСИРОВКИ

Для получения требуемых размеров фокусного пятна в подобных трубках используются различные системы фокусировки – на постоянных магнитах, с использованием электромагнитов и смешанные. Применение трубок с прострельным анодом позволяет рационально использовать длину пролетной трубы и удобно расположить на ней фокусирующую систему.

Использование традиционных систем с постоянными магнитами [1] в настоящее время ограничено по двум основным причинам:

- увеличение мощности трубок, требующее увеличения тока трубки, не позволяет достаточно эффективно фокусировать пучок электронов при токах более 1 мА;
- необходимость изменения напряжения в ходе эксплуатации трубки (например, при просвечивании объектов различной толщины и плотности) требует механического перемещения фокусирующей системы с постоянным магнитом, что конструктивно не всегда обосновано.

С другой стороны, использование электромагнитов [2] подразумевает как необходимость повышенного энергопотребления источника излучения в целом, так и обеспечение эффективного теплоотвода (в связи с тем, что обмотки катушек интенсивно греются в ходе работы).

Весьма перспективным представляется использование комбинированной системы, включающей в себя один или несколько постоянных магнитов, обеспечивающих «основную» составляющую фокусировки, и дополнительной системы с электромагнитом относительно небольшой мощности, обеспечивающей поддержание фокусного пятна малых размеров в широком диапазоне изменяемых напряжений [3]. Пример такой системы для электронного микроскопа представлен на рис. 1.

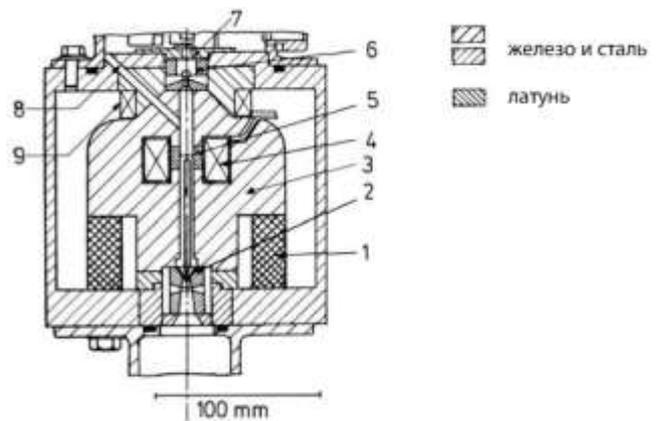


Рис. 1. Упрощенная модель гибридной фокусирующей системы для электронного микроскопа: 1 – постоянный магнит; 2 – полюсные наконечники проектора; 3 – тело объектива; 4 – электромагнитная катушка; 5 – зазор для воздействия электромагнита; 6 – полюсные наконечники объектива; 7 – стэнд для пробы; 8 – канал насоса; 9 – вспомогательная электромагнитная катушка

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МАКЕТИРОВАНИЯ

Сферы применения рентгеновских трубок с прострельным анодом (рентгеновская микроскопия, дифрактометрия методом широко расходящегося пучка и т.п.) подразумевает необходимость варьирования рабочего напряжения трубки в достаточно широких пределах (от 10–15 до 100–150 кВ). Как известно (рис. 2), предельно допустимый ток для рентгеновской трубки при заданном напряжении определяется количеством тепла, которое может быть рассеяно на аноде рентгеновской трубки.

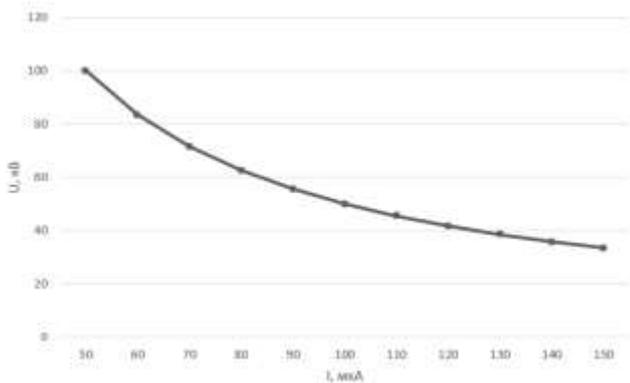


Рис. 1. Ограничение тока трубки из-за мощности

Эта особенность связи тока и напряжения трубки приводит к определенным сложностям в настройке работы фокусирующей системы. Например, для трубки БС-16 (рис. 3) с рассеиваемой мощностью в 5 Вт при напряжении 50 кВ ток может составлять 100 мкА, тогда как при предельном напряжении 150 кВ ток не превышает 30 мкА.

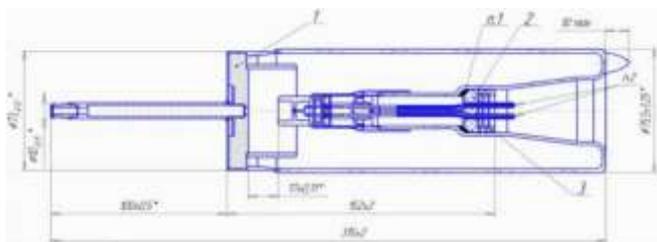


Рис. 2. Рентгеновская трубка БС-16

Поэтому в электромагнитной фокусирующей системе при минимальных напряжениях, подаваемых на трубку, требуется больший ток в обмотках, так как плотность тока электронного пучка выше, и электроны в пучке «расталкиваются» сильнее. С другой стороны, при больших напряжениях трубки кроссовер смещается про оси пучка, что также может привести к расфокусировке трубки. Поэтому величина напряжения, подаваемого на обмотки фокусирующей катушки, имеет ярко выраженную нелинейную зависимость от тока и напряжения трубки.

В этом случае весьма перспективным может быть (при позволяющей реализовать эту идею длине пролетной трубы анода) последовательное расположение нескольких относительно маломощных катушек, напряжение, подаваемое на обмотки которых, будет варьироваться в зависимости от режимов работы трубки.

В качестве прототипа фокусирующей системы для БС-16 были испробованы два варианта – с одним постоянным магнитом и одним электромагнитом (рис. 4), а также с двумя электромагнитами (рис. 5).

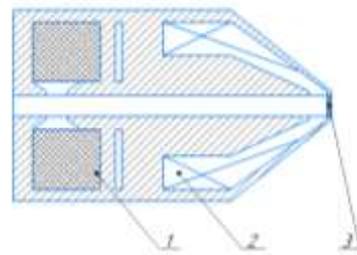


Рис. 3. Схематическое изображение прототипа фокусирующей системы: 1 – постоянный предфокусирующий магнит; 2 – обмотка фокусирующего электромагнита; 3 – расположение мишени

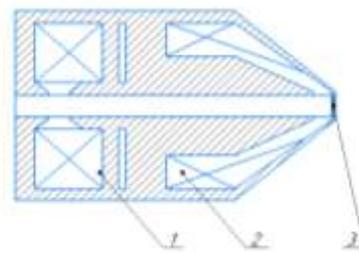


Рис. 4. Схематическое изображение прототипа фокусирующей системы: 1 – обмотка предфокусирующего электромагнита; 2 – обмотка фокусирующего электромагнита; 3 – расположение мишени

Параметры постоянного магнита, а также размеры, число витков и ток обмоток электромагнита были рассчитаны в соответствии с алгоритмами, описанными в работе [4]. На рис. 6 приведено характерное распределение поля в фокусирующей системе. Большая часть магнитной индукции располагается на концах полюсных наконечников.

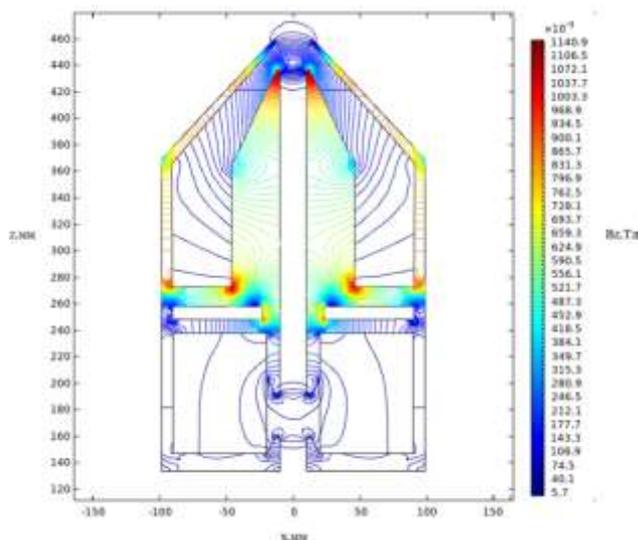


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в сечении системы

В ходе экспериментального исследования были изготовлены несколько вариантов сердечников для электромагнитов и опробовано работа электромагнитных систем с одной или двумя катушками. Полученные данные достаточно хорошо коррелируют с теорией (табл. 1).

ТАБЛИЦА I ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ОТ
ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ТРУБКИ

Напряжение трубки, кВ	50	100
Напряжение на обмотке 1 катушки (теория), В	1,24	1,85
Напряжение на обмотке 2 катушек (теория), В	5,47	7,98
Напряжение на обмотке 1 катушки (эксп.), В	1,96	2,34
Напряжение на обмотке 2 катушек (эксп.), В	6,87	9,11

^a Напряжение выбиралось из соображений достижения фокусного пятна не более 30 мкм.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проводятся испытания макета на долговременную стабильность, а также унификация системы управления электромагнитом и его источника питания с общим блоком управления источника излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. Энергоатомиздат. Ленинградское отд., 1989.
- [2] Пинес Б.Я. Острофокусные рентгеновские трубки и прикладной рентгеноструктурный анализ. Москва: Гостехиздат, 1955.
- [3] Потрахов Н.Н. Физико-технические основы современной микрофокусной рентгенодиагностики / Н.Н. Потрахов, А.Ю. Грязнов, В.Б. Бессонов, К.К. Жамова, А.В. Ободовский // Известия «ЛЭТИ». 2014. №9.
- [4] Hawkens P.W. Magnetic Electrone Lens. – West Berlin: Springet: Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 1982.