

$$\begin{cases} D_n + t_1 \cdot \dot{D}_r = D_1 \\ D_n + t_2 \cdot \dot{D}_r = D_2 \end{cases} \Rightarrow \dot{D}_r = \frac{D_1 - D_2}{t_1 - t_2} \Rightarrow D_n = D_1 - t_1 \cdot \dot{D}_r = D_2 - t_2 \cdot \dot{D}_r,$$

где, D_n – доза, полученная детектором во время выхода источника на режим; t_1, t_2 – время работы источника; \dot{D}_r – мощность дозы источника на режиме; D_1, D_2 – суммарная доза, накопленная дозиметром за время t_1, t_2 , соответственно.

Малые размеры детекторов влияют на точность их показаний. Для решения этой проблемы проведена калибровка каждого из них [5] при помощи специализированной клинической дозиметрической установки высокой точности UNIDOS-E [6]. Полученные результаты позволили не только оценить работоспособность отдельных дозиметров, но и ввести поправочные коэффициенты для каждого из них.

Предложенная методика опробована на измерении распределения дозовых полей нескольких источников рентгеновского и гамма-излучения, основанных на рентгеновских трубках, электронных ускорителях бетатронов и линейных электронных ускорителях. Небольшие размеры дозиметров позволили добиться высокой пространственной точности измерений. Полученные поправочные коэффициенты для каждого из детектирующих элементов повысили достоверность измерений.

Список использованных источников

1. Штейн М.М. и др. Частотно-импульсные рентгеновские аппараты // Контроль. Диагностика – 2007 – № 2 – С. 24–27
2. Паспорт ЖБИТ2.805.006РЭ: «Дозиметры термолуминесцентные ДТЛ-02». – Версия_2_05.10.2012 – 13 с.
3. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Dose rate spatial distribution produced by the pulsed X-ray source in the radiographic examination // Advanced Materials Research – 2015– Vol. 1084 – PP. 598–601
4. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Radiation dose measurement technique of the X-ray source in the process of stabilization // Advanced Materials Research– 2015 – Vol. 1085– PP. 478–481
5. Miloichikova I. A., Ruchjeva V. A., Shuvalov E. N., Stuchebrov S. G. Depth dose distribution of the bremsstrahlung generated by the betatron OB-4 in different environments // XXIV Russian Particle Accelerator Conference: Proceedings, Obninsk, October 6-10, 2014–Novosibirsk: BINP–2014 – PP. 266–268
6. RTW [Электронный ресурс]/UNIDOS E Universal Dosemeter–URL: http://www.ptw.de/unidos_e_dosemeter_ad0.html?&cId=3 (дата обращения: 01.07.2015)

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА

Сухарников К.В., Рычков М.М.

Томский политехнический университет

Введение

Бетатроны, разрабатываемые в Томском политехническом университете, пользуются спросом и поставляются на промышленные предприятия и в медицинские учреждения России и за рубеж [1]. Бетатрон — циклический индукционный ускоритель электронов. Благодаря своей простоте, компактности и низкой стоимости, он является весьма востребованным прибором на рынке, выдерживая конкуренцию со стороны других типов ускорителей.

Основным элементом бетатрона является электромагнит, который выполняет функции электронно-оптической и ускоряющей систем. Для ускорения электронов и управления траекторией их движения используются электрические и магнитные поля. Естественно предположить, что одной из причин, вызывающих нарушение нормальной работы ускорителя, является отклонение профиля поля в рабочем зазоре электромагнита бетатрона от расчетных значений. Контроль и корректировка управляющего поля является важной задачей при проведении настроечных, профилактических работ с бетатронами, направленной на поддержание требуемых характеристик излучения.

Наиболее простым методом измерения переменного во времени магнитного поля является индукционный метод. Ранее предпринимались попытки измерения динамики поля, но они делались в основном для диагностики управляющего поля: определения положения равновесной орбиты и энергии электронов в процессе ускорения.

Во всех случаях измерения проводились без учёта работы систем контрактора и смещения электронов с равновесной орбиты для их сброса на мишень. До недавнего времени регистрирующая аппаратура просто не позволяла зафиксировать такие резкие изменения поля.

Целью данной работы является исследование управляющего магнитного поля малогабаритного бетатрона с целью изучения динамики положения равновесной орбиты в момент смещения.

Задачи работы: формирование наиболее оптимального метода сбора данных, создание алгоритма обработки результатов измерения и интерпретация полученных результатов.

Теоретическая часть

В качестве зонда для измерения поля внутри зазора электромагнита бетатрона обычно используется измерительный диск с зафиксированными в нём витками проводника (см. рис. 1). Принцип индукционного метода описывается уравнениями Максвелла, в частности, законом индукции Фарадея (1).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

В этом же законе лежит ключ к построению устройства: используя теорему Стокса и условия аксиальной симметричности поля бетатрона, после интегрирования по времени, получаем зависимость:

$$\Phi(r, t) = \langle B_z(r, t) \rangle \cdot S = \int_0^t \varepsilon(r, t) dt \quad (2)$$

где $\Phi(r, t)$ – поток вектора магнитной индукции в круге радиуса r , $\langle B_z(r, t) \rangle$ – усреднённое по радиусу значение вектора магнитной индукции на радиусе r , S – площадь, охватываемая проводником радиусом r , $\varepsilon(r, t)$ – ЭДС проводника радиусом r . Далее индекс z при B будем опускать, как и явные зависимости каждой величины от радиуса и времени.

Из (2) следует, что для нахождения функции Φ необходимо проинтегрировать ЭДС с каждого измерительного вика.

Радиус равновесной орбиты находится из условия Видероз, названное по имени его первооткрывателя [2]. Это условие описывает постоянство равновесной орбиты:

$$B(r_0) = \frac{1}{2} \langle B(r_0) \rangle \quad (3)$$

где $B(r_0)$ – значение вектора магнитной индукции на равновесном радиусе r_0 , а $\langle B(r_0) \rangle$ – среднее значение магнитной индукции внутри равновесной орбиты r_0 .

По условию (3) для определения радиуса равновесной орбиты помимо функции $\langle B(r) \rangle$ необходимо знать распределение по радиусу вертикальной составляющей вектора магнитной индукции $B(r)$. Воспользуемся взаимосвязью вектора магнитной индукции и векторного магнитного потенциала A (в формулах используется проекция A_θ) :

$$B = \frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial r}$$

$$\langle B \rangle = \frac{2A}{r} \quad (4)$$

Для средней (медианной) плоскости ($z = 0$), где устанавливается измерительный диск из выражения (2) с учетом (4) получаем:

$$A = \frac{\Phi}{2\pi r} \quad (5)$$

Таким образом, для определения качества поля бетатрона необходимо:

1. Проинтегрировать сигналы с измерительных витков в течение заданного времени (времени ускорения).
2. По измеренным значениям восстановить функцию $A(r)$. Это можно сделать с помощью полиномиальной интерполяции или сплайн-интерполяции [8]. Современные математические пакеты позволяют восстанавливать функцию по точкам с высокой точностью.
3. Минимум функции $A(r)$ будет наблюдаться в точке, соответствующей равновесной орбите [3].

Предложенная методика диагностики поля отличается от общепринятой [4], предполагает применение современных математических пакетов для обработки результатов измерений.

Экспериментальная часть

В качестве зонда для измерения магнитного поля в межполюсном зазоре электромагнита бетатрона использовался измерительный диск, эскиз которого показан на рис. 1.

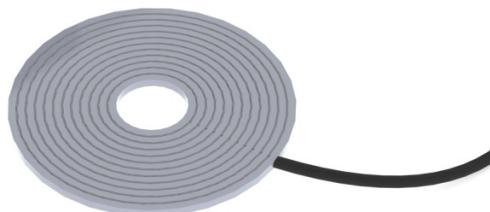


Рис. 1. Измерительный диск

В измерительном диске зафиксированы проводники, концы которых выведены в жгут в виде витых пар. В один момент времени возможна запись значений ЭДС только с одного измерительного витка. Для измерения напряжения на витках использовался цифровой осциллограф WP 725Zi, который записывал показания с двух витков: измеряемого в данный момент и опорного, единого для всех витков. Цель данного подхода – исключение погрешностей, связанных с колебаниями амплитуды поля от одного периода к другому. Такой метод измерения уже применялся в приборе, описанном в [5] и показал свою эффективность при испытании бетатронов.

Записанные массивы данных для измерительного и опорного витка с шагом 2 нс передавались на ПК для обработки.

Шаг 1. Выравнивание фазы осциллограмм во времени. Напряжение с каждого витка записано в разный момент времени. В данном случае имеет место дисперсия момента срабатывания триггера осциллографа. Этот эффект необходимо было устранить на раннем этапе.

Шаг 2. Проводится коррекция пульсаций амплитуды питающего напряжения от импульса к импульсу на основе данных с опорного витка для каждого измеренного значения.

Шаг 3. Численное интегрирование каждого массива данных. Результатом является величина, равная потоку через плоскость, ограниченную радиусом витка, см. (2).

Шаг 4. Данные обрабатываются в соответствии с формулой (5).

В случае, если мы имеем 12 измерительных витков с радиусами r , результатом выполнения предыдущих шагов будет массив M с размерностью $N \times 13$, где N – количество отсчётов каждого сигнала. Первый столбец $M_{N,1}$ – временная координата.

Шаг 5. В необходимый момент времени t_0 из строк массива можно получить срез $A(t = t_0) = f(r)$.

Шаг 6. Интерполируя значение и находя минимум полученной функции, можно определить положение равновесной орбиты.

Повторяя шаги 5 и 6 с определённым временным интервалом, можно построить график положения равновесной орбиты. На рис. 2 приведён график в момент работы системы смещения синфазно с напряжением на витке с радиусом 5 см.

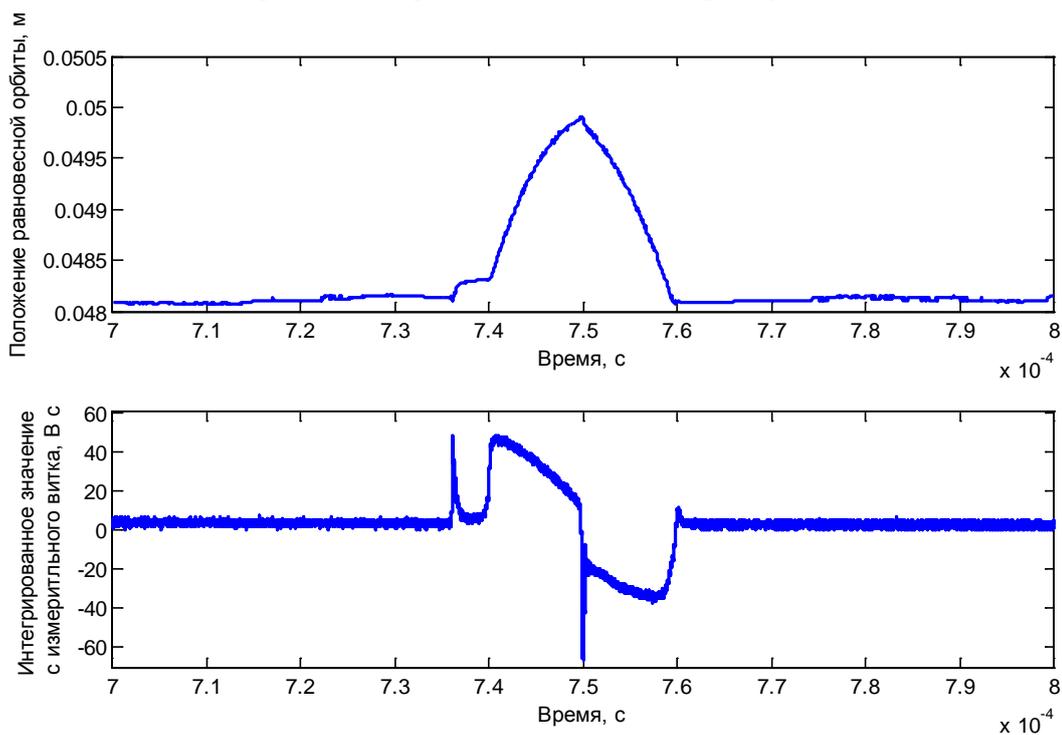


Рис. 2. Результаты обработки данных

Заключение

По результатам можно сделать вывод о том, что диагностика магнитного поля в межполюсном зазоре в момент работы системы смещения технически возможна. Использование измерительного диска с меньшим шагом позволило бы получить более точную картину поля.

Противоречивость полученного результата заключается в том, что, несмотря на то, что видимое расширение равновесной орбиты действительно происходит, радиус увеличивается лишь на величину порядка 2 мм. Что не соответствует теоретическому представлению о процессах, протекающих в момент сброса электронов на мишень в малогабаритных бетатронах. Поэтому полученные результаты требуют уточнения. В

дальнейшем необходимо отказаться от разделённого во времени измерения значений с витков, вместо этого планируется использовать многоканальный измеритель, в котором значения будут регистрироваться одновременно. Это позволит исключить из процедуры диагностики шаги 1 и 2 и значительно повысит точность измерений.

Повышение точности также позволит изучить динамику поля в момент работы контрактора, системы, увеличивающей эффективность захвата электронов в процесс ускорения.

Список использованных источников

1. Чахлов В.Л. и др. Разработка, организация и применение малогабаритных источников рентгеновского и электронного излучений // Известия Томского политехнического университета–2008– Том 312– № 2–С. 23–32
2. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов - бетатрон– Москва: Госатомиздат–1961–351 с.
3. Родимов Б.Н. Теоретические основы получения больших токов в бетатроне : Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Томск, 1966– 339 с.
4. Носков Д.А. Потенциальная функция фокусирующих сил магнитного поля бетатрона и её практическое применение при настройке ускорителей // Известия ТПИ–1957– Том. 87– С. 151–155
5. Сухарников К.В., Рычков М.М. Анализатор магнитных полей бетатронов // Приборы и техника эксперимента– 2015– С. 132–133

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Торгаев С.Н.^{1,2,3}, Тригуб М.В.^{1,2}, Евтушенко Г.С.¹

¹Томский политехнический университет

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

³Томский государственный университет

Введение

На сегодняшний день многие научно-технические задачи связаны с необходимостью визуального контроля различных объектов и процессов, экранированных мощной широкополосной фоновой засветкой, в режиме реального времени. Примерами таких процессов могут быть – высокотемпературный самораспространяющийся синтез, взаимодействие мощных потоков энергии с поверхностью, сварка, плазма разряда и т.д. Визуализация таких процессов возможна при использовании активных оптических систем с усилителями яркости, например, лазерного монитора [1–3].

Активные оптические системы, построенные на основе усилителей яркости на парах металлов, обладают рядом достоинств. Такими как высокая спектральная яркость излучения, высокое усиление в узком спектральном диапазоне (2-5 пм), работа в импульсно-периодическом режиме. Для визуализации быстропротекающих процессов необходимо использовать высокочастотный усилитель яркости. Типичная частота следования импульсов излучения усилителей яркости на парах металлов, например, на парах бромида меди, составляет порядка 10-30 кГц. Ограничение частот следования импульсов генерации связано с рядом плазмохимических процессов, протекающих в активном теле усилителя яркости. В ряде работ [4,5] было показано, что получение высоких частот следования импульсов генерации возможно при работе усилителя яркости в режиме пониженного энерговыделения в разряд. В этом случае отрицательное влияние накопительных эффектов в плазме разряда частично нивелируется. Обеспечение такого