

Измерение энергетических характеристик электронов в ЛУЭ с электромагнитным сканированием

А.Е. Толстой, В.А. Шендрик
ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

Ранее сообщалось о разработке и создании в ННЦ ХФТИ ряда технологических ЛУЭ в диапазоне энергий 10...25 МэВ и импульсным током до 1 А [1]. В процессе продолжительной эксплуатации и применения этих источников первичного (электроны) и вторичного (γ -кванты) излучения на разные программы возникла необходимость повышения требований к параметрам пучков и их надёжной быстрой идентификации. При этом одной из определяющих характеристик оказалась энергия электронов выводимого из ускорителя пучка. Нами экспериментально была показана возможность определения этого параметра с помощью штатного электромагнитного сканатора [1,2]. Одним из достоинств этого способа является то, что измерения производятся в любой момент времени без прерывания технологического процесса.

Наш опыт разработки и эксплуатации электромагнитного разворачивающего устройства (сканатора) показал, что успешное решение поставленной задачи на требуемом уровне возможно при условии выполнения ряда работ, обычно сопровождающих создание серьёзных магнитоспектрометрических устройств.

Так, в первую очередь, выбор общей схемы и разработка конструкции [1] базировались на электрооптических параметрах пучка действующих (разрабатываемых) ускорителей, а также на первоочередных или предполагаемых облучательных программах для этих ускорителей. Был проведен предварительный расчёт магнитной оптики области развёртки пучка, выбрана форма и конфигурация ползающих элементов магнитного зазора, ширина разворота пучка, амплитуда и частота тока возбуждения; оценены пределы неоднородности зоны облучения и намечены возможные пути её коррекции и регулировки. В основу конструкции собственно магнитного блока были положены: энергия электронов $E = (10...20)$ МэВ, напряжённость магнитного поля $H = \pm (0...1000)$ Э, частота тока возбуждения $f = (1...3)$ Гц, высота рабочего зазора $d \cong 5$ см, ширина области хорошего поля $\Delta r \geq 6$ см при $\Delta H/H \leq 10^{-3}$, максимальный разворот пучка на выводном окне $\Delta \theta = \pm 20$ см.

Магнитные блоки без предварительного моделирования изготовлялись в заводских условиях, где имеется современное технологическое оборудование для штамповки и однотипной сборки пластинчатых сердечников магнитопроводов и обмоток возбуждения, рассчитанных на долговременную работу при больших уровнях радиационного излучения. Контроль качества изготовления предусматривал измерение механических и электрических характеристик: размеры и точности ползающих элементов, электросопротивление и индуктивность обмоток, их идентичность, прочность изоляции. В итоге, эти характеристики оказались близкими к проектным.

Не менее ответственным и трудоёмким был следующий этап – измерение и доводка магнитооптических характеристик на измерительном стенде, оснащённом регулируемыми источниками постоянного тока (0...40) А с устройством размагничивания нагрузки и пилообразного двуполярного тока (0... ± 25) А.

В качестве магнитоизмерительного оборудования применялись средства как заводского изготовления, так и собственных разработок:

- холловский магнитометр (типа Ш1-8) для быстрого, как правило, предварительного контроля;
- универсальный ЯМР-измеритель на проточной воде [3] для прецизионных измерений во всём диапазоне напряжённости и градиентов;
- индукционный измеритель для исследований и калибровки в переменных полях;
- безжелезная “магнитная мера” для идентификации результатов различных измерений.

Операции, которые в обязательном порядке выполняются для получения “рабочего паспорта” и установки сканатора на ускоритель:

- калибровка на постоянном токе возбуждения, $H = f(I_{\text{пост.}})$;
- калибровка на пилообразном токе; сравнение и согласование обоих результатов;
- измерение детальной топографии магнитного поля во всём пространстве разворота и вывода пучка (шаг 1 см, ЯМР – метод);
- по результатам детальных измерений – определение эффективной длины магнита на главных траекториях разворота пучка (с учётом краевых вывалов – “хвостов”);
- снятие полной топографии магнитного поля для компьютерного расчёта детальной динамики сканируемого пучка и определения однородности поля облучения по ширине развёртки;

- оформление эксплуатационного “паспорта” устройства; электрические и магнитные параметры вводятся в управляющий компьютер и используются в оперативной работе ускорителя.

Следует обратить внимание по меньшей мере на три важные особенности перечисленных работ.

Во-первых, в ходе калибровки магнита на постоянном токе необходимо каждый раз предварительно проводить (и тщательно контролировать) размагничивание устройства до уровня $H_{ост} \leq I Э$.

Во-вторых, в качестве измерительного токового прибора следует применять амперметр наивысшей точности ($\leq 0,1 \dots 0,2\%$). Полученная таким путём зависимость $H = f(I_{пост})$ станет основополагающим базисом для дальнейших разнообразных измерений как на стенде, так и на работающем ускорителе.

В-третьих, калибровка на переменном токе должна проводиться с учётом более глубоких физических особенностей. В нашем случае это, в первую очередь, низкая частота тока возбуждения электромагнита (≤ 3 Гц), а также отличие формы тока (треугольная) от общепринятой (синусоидальной). Однако даже при таком “слабом” периодическом воздействии на ферромагнитный элемент необходимо брать во внимание процессы, происходящие в сердечнике конкретного электромагнита. Эти процессы обычно именуется обобщающим термином – потери.

Как свидетельствуют специальные литературные источники, потери в магнитопроводе складываются из потерь на гистерезис, вихревые токи и потери вследствие магнитной вязкости, или магнитного последствия. Более того, потери, вычисленные на основе их разделения, оказываются меньше измеренных экспериментально; поэтому к трём видам поименованных потерь добавляют так называемые неучтённые (дополнительные) потери. Таким образом, даже в случае получения каким-либо способом функции $H = f(I_{пер})$, есть серьёзные основания сомневаться в её абсолютной достоверности.

В общем виде формула для определения энергии с помощью электромагнитного сканатора записывается [2]:

$$E_k = \sqrt{E_0^2 + \frac{k^2 I^2}{\sin^2 \varphi}} - 0,511,$$

где I – амплитуда тока (точнее, поля в магните) в момент измерения энергии. Для режима постоянного тока эта формула является “точной”. Для переменного тока с учётом вышеприведенных замечаний о нагрузке с ферромагнитным сердечником и индуктивностью ток I , вообще говоря, должен быть заменен на “нечто”, пропорциональное напряжённости магнитного поля в момент измерения энергии электронов.

Стендовые измерения магнитных характеристик сканатора на постоянном токе показывают, что в нашем случае точность измерения энергии электронов по приведенной выше формуле определяется следующими составляющими:

- эффективная магнитная длина, входящая в коэффициент k – $(160 \pm 0,5)$ мм;
- геометрия пространства развёртки [1], измеряемая мерной линейкой, – $((200 \dots 500) \pm 1)$ мм;
- величина напряжённости поля в рабочем зазоре в момент измерения энергии – $H-I \pm ?$.

Например, в режиме постоянного тока возбуждения фотометрический метод [2] может обеспечить точность измерения энергии в пределах $1 \dots 3\%$, которая зависит от погрешности измерения $I_{пост}$ и линейного положения “пятна” электронного пучка на стекле снаружи за выводным окном сканатора. Эти измерения надёжны и не представляют больших трудностей, однако, имеют существенные недостатки: необходимость прерывания технологического процесса на ускорителе и потеря “пучкового” времени. Поэтому в наших условиях этот способ применяется только для наладки и контроля аппаратуры перед выполнением наиболее ответственных программ.

Вопрос об измерении энергии на переменном токе возбуждения сканатора оказался значительно сложнее. Если в данном конкретном случае ($f \leq 3$ Гц, предварительная калибровка различными способами и т. д.) имеются сравнительно простые пути решения, то в широком плане задача получения достоверной практической зависимости $E = f(H_{пер})$ остаётся не до конца разрешенной.

На наш взгляд, выход должен быть найден путём применения несложной методики непосредственного измерения напряжённости магнитного поля, либо другой “величины”, обусловленной этим полем, причём информация о поле должна исходить из магнитного рабочего зазора и быть строго синхронизирована с моментом измерения энергии. По-видимому, только так можно исключить влияние эффекта потерь в магнитопроводе и обмотке возбуждения, а также учесть временной сдвиг между напряжением и током в индуктивно-резистивных нагрузках.

Для реализации этой идеи потребовалось создание вспомогательного устройства – “магнитной меры”, основанной на известном принципе катушек Гельмгольца (КГ). Электромагнитные характеристики КГ выбраны максимально близкими к характеристикам магнита-сканатора. Отсутствие ферромагнитного сер-

дечника в устройстве КГ даёт возможность исключить значительную часть мешающих факторов при проведении сравнительных и калибровочных измерений как на постоянном, так и на переменном токе.

Эксперименты показывают, что возможная схема калибровки типа “индукционный датчик (ИД) +КГ→ э.д.с.→ N_1 ; ИД + сканатор → э.д.с. → N_2 ; $N_1 = m N_2$ ” позволяет, в конечном итоге, производить измерение энергии электронов по величине э.д.с., наводимой во вспомогательной обмотке сканатора.

В заключение, благодарим В.А. Попенко, В.И. Татанова, В.Н. Борискина за организацию измерений на ускорителе; А.И. Косога, М.В. Отлева за помощь в конструировании и изготовлении “магнитной меры”.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Довбня, А.И. Косой, А.Е. Толстой, В.А. Шендрик. Развёртка и формирование выводимого пучка многоцелевых ускорителей ХФТИ. ВАНТ, Сер.: “Ядерно-физические исследования”, 1997, вып.1 (28), с. 114-121.
2. В.Н. Борискин, А.Е. Толстой, В.А. Шендрик. Развёртка выводимого пучка и оперативный контроль энергии технологических ускорителей. ВАНТ, Сер.: “Ядерно-физические исследования”, 1997, вып.4,5 (31, 32), с.57-59.
3. А.Е. Толстой. Переносная аппаратура для измерения неоднородного магнитного поля методом ядерной нутации. III украинская республиканская конференция по электронной оптике и её применениям. Часть II, с.220-222, Харьков, 1974.