

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ НА 30 Мэв

М. В. Карпов, Е. П. Овчинников, Б. С. Ратнер

Описывается устройство, предназначенное для стабилизации максимальной энергии в спектре тормозного излучения 30 Мэв синхротрона. Проверка работы устройства измерением выхода фотоядерных реакций показала, что максимальная энергия остается постоянной в пределах ± 30 кэв.

В ряде физических исследований, проводимых на синхротроне, требуется с большой точностью поддерживать постоянство максимальной энергии $E_{\gamma m}$ в спектре тормозного излучения. Стабильность значения $E_{\gamma m}$ особенно существенна, например, при изучении кривых возбуждения различных фотоядерных реакций. Непостоянство $E_{\gamma m}$ заметно увеличивает разброс экспериментальных точек в начале кривой возбуждения, где выход сильно зависит от $E_{\gamma m}$.

В последнее время на нескольких бетатронах [1]—[4] и др. осуществлена система стабилизации энергии. В настоящей статье описана система стабилизации энергии, разработанная для 30 Мэв синхротрона Физического института им П. Н. Лебедева АН СССР. Нестабильность $E_{\gamma m}$ непосредственно определяется колебаниями напряженности магнитного поля на синхротронной орбите в момент выключения высокочастотного напряжения. В свою очередь эти колебания связаны с нестабильностью амплитуды и частоты магнитного поля, а также с нестабильностью момента выключения высокочастотного напряжения. Неопределенность в энергии $E_{\gamma m}$ за счет указанных причин составляет обычно 2—3%. Перед авторами была поставлена задача разработать устройство, поддерживающее постоянство энергии с точностью не менее 0,5%.

Как известно, энергия $E_{\gamma m}$ в синхротроне определяется следующим соотношением:

$$E_{\gamma m} = \sqrt{(300HR)^2 + (m_0c^2)^2} - m_0c^2, \quad (1)$$

где $E_{\gamma m}$ —в электрон-вольтах, H —напряженность магнитного поля на синхротронной орбите в эрстедах в момент выключения высокочастотного напряжения; R —радиус синхротронной орбиты в сантиметрах; m_0c^2 —масса покоя электрона ($\sim 0,51$ Мэв).

Если в зазор магнита синхротрона поместить катушку, то e_i —наведенная в ней э.д.с.—будет связана с максимальной энергией $E_{\gamma m}$ следующим соотношением:

$$E_{\gamma m} = \sqrt{\left(\frac{R}{A} \int_0^t e_i dt\right)^2 + (m_0c^2)^2} - m_0c^2, \quad (2)$$

где t —время выключения генератора высокой частоты, отсчитываемое от момента, когда магнитное поле принимает нулевое значение, и A —постоянная, зависящая от геометрии катушки. Из выражения (2) следует, что интеграл от э.д.с. катушки пропорционален $E_{\gamma m}$ с большой точностью при $E_{\gamma m} \gg m_0c^2$. Применяя после интегрирования э.д.с. пороговую схему (амплитудный дискриминатор), можно получить импульс напряжения, когда энергия $E_{\gamma m}$ превышает любое заданное значение. Если этот импульс использовать для выключения генератора высокой частоты, то тем

тора определяется постоянством его коэффициента передачи (k_p) и точностью интегрирования, которая зависит от эквивалентной постоянной времени τ . Нестабильность коэффициента передачи интегратора при соотношении $\frac{k_0}{k_p} \approx 4000$ практически полностью определяется непостоянством RC цепочки обратной связи. Небольшие изменения коэффициента усиления интегратора (k_0) почти не сказываются на величине коэффициента передачи и точности интегрирования; поэтому достаточен лишь технический контроль величины k_0 .

В схеме усилителя постоянного тока предусмотрены меры, повышающие стабильность его работы. К их числу относятся питание накала ламп постоянным током через барретор и введение цепи автоматической регулировки уровня постоянного напряжения на выходе интегратора. Эта цепь состоит из фильтра низкой частоты, дифференциального усилителя (Л-8, Л-9) и управляющего катодного повторителя (Л-3). Работа интегрирующей схемы контролируется проверкой коэффициента усиления схемы (k_0) и постоянства потенциала на выходе интегратора с помощью компенсационного вольтметра с нормальным элементом. Перегрузка усилителя постоянного тока при изменении режима работы ускорителя устраняется ступенчатой регулировкой сигнала на входе интегратора. Сигнал от интегратора передается через катодные повторители (Л-7, Л-10) на два амплитудных дискриминатора, один из которых определяет момент включения генератора высокой частоты, а другой — момент выключения. Первый дискриминатор (Л-12) и следующий за ним усилитель служат только для частичной стабилизации интенсивности пучка γ -квантов.

В устройстве стабилизации применены дискриминаторы на электровакуумных диодах, как наиболее стабильные в работе. Недостаток этих диодов, заключающийся в «сползании» анодных характеристик со временем, в значительной мере ослаблен применением питания цепи накала стабилизированным током. Нестабильность дискриминаторов, вызванная старением ламп и изменением контактной разности потенциалов, компенсируется дополнительным диодом. Эта компенсация повышает стабильность дискриминаторов примерно в 10 раз.

Основное внимание уделено повышению стабильности работы устройства, задающего момент выключения генератора высокой частоты. В дискриминаторе очень важна стабильность, точность повторения первоначальных значений коэффициента деления потенциометра, при помощи которого устанавливается напряжение записывания диодов (опорное напряжение), определяющее энергию E_{ym} . Эта задача решена изготовлением специального проволочного потенциометра высокой точности. Опорное напряжение на потенциометре дискриминатора поддерживается с точностью $\pm 0,005\%$ при помощи высокостабильного выпрямителя с нормальным элементом [5]. Этот же выпрямитель определяет опорное напряжение дифференциального усилителя (Л-9). Сетевое напряжение подводится ко всем выпрямителям устройства от феррорезонансного стабилизатора. Сигналы, выделенные дискриминирующими диодами, поступают на два широкополосных усилителя с элементами ограничения и дифференцирования, где они формируются в остроконечные импульсы отрицательной полярности с фронтом менее одной микросекунды. Каждый усилитель имеет коэффициент усиления, равный 10 000, что позволяет осуществить стабилизацию энергии до значений, соответствующих весьма малой крутизне кривой нарастания магнитного поля. Контроль коэффициента усиления формирующих усилителей, так же как и усилителя в интеграторе, производится при помощи генератора синусоидального напряжения и катодного вольтметра.

Сигналы с выхода формирующих усилителей с амплитудой 15 в поступают на триггер с двумя устойчивыми состояниями и запускают его. Триггерный каскад создает прямоугольный импульс с амплитудой 100 в, причем фронт и спад этого импульса строго соответствуют заданным мгновенным значениям магнитного поля на орбите синхротрона. Этот импульс поступает на модулятор генератора высокой частоты.

Требуемая высокая точность работы всей схемы стабилизации заставляет применять высокостабильные источники питания и соответствующие элементы контроля.

Основные нестабильности, как уже отмечалось, возникают в амплитудных дискриминаторах из-за сдвига вольтамперной характеристики диодов и изменения опорного запирающего напряжения. Увеличение ам-

плитуды сигнала, поступающего с интегратора, уменьшает относительную ошибку. Поэтому во всех режимах работы ускорителя полностью используется линейная характеристика интегратора, что позволяет получить на его выходе сигнал с амплитудой 60 в. Временные сдвиги в широкополосном формирующем усилителе при коэффициенте усиления $k=10\,000$ не превышают 1 мксек; то же самое относится ко всему последующему тракту устройства.

Проверка работы системы стабилизации осуществлялась способом, подобным описанному в работе [2], по выходу реакции $\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$ на крутой части кривой возбуждения. Образцы из меди, выполненные в виде колец диаметром и высотой 28 мм и толщиной стенки 0,2 мм, помещались в пучок γ -квантов с максимальной энергией 13,1 Мэв. Доза облучения фиксировалась интегрирующей ионизационной камерой (монитор) с наружным свинцовым колпачком, предохранявшим камеру от электронов и мягкого рассеянного излучения. На этот колпачок помещался медный образец (рис. 3). Активность, наведенная в образце за счет реакции $\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$ ($T=10$ мин.) регистрировалась счетчиком АС-2, окруженным γ -счетчиками. Последние были включены в схему антисовпадений. Время облучения составляло 10 мин., перенос образца—2 мин. и измерение—5 мин. Чувствительность монитора и

100 кэв приводило к изменению выхода (т. е. активности, отнесенной к дозе, регистрируемой монитором) на 10%. Таким образом, требуемая стабильность энергии ± 50 кэв могла быть проверена при имеющейся точности регистрирующей аппаратуры. В течение

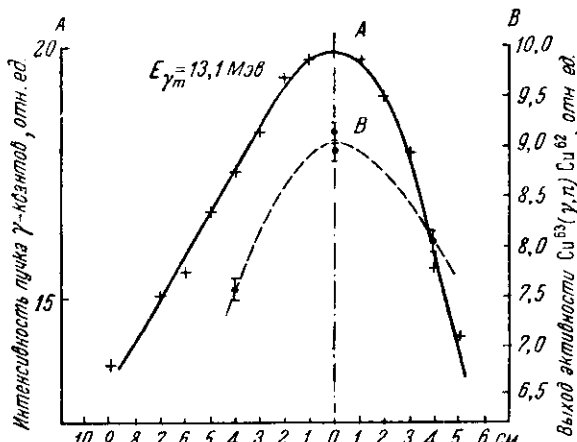


Рис. 4. Зависимость выхода реакции $\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$ при $E_{\gamma m}=13,1$ Мэв от положения образца относительно оси пучка γ -квантов.

А — угловое распределение интенсивности пучка; В — выход активности реакции (γ, n), измеренный на оси пучка и в 4 см от нее.

ние двух месяцев несколько раз в день производились измерения выхода на одной позиции потенциометра, соответствующей энергии $E_{\gamma m}=13,1$ Мэв. За это время разброс в величине выхода составил около ± 140 кэв. В течение каждого дня разброс в величине выхода был значительно меньше. Следует заметить, что нестабильность энергии при длительных измерениях наблюдалась также и авторами других работ [2], [3]. Нами было высказано предположение, что замеченный разброс в выходе активности от дня ко дню в значительной мере обусловлен недостаточной точной установкой образца и монитора по отношению к оси пучка. Специально проведенные измерения углового распределения интенсивности показали, что при данном значении энергии $E_{\gamma m}$ имеется явно выраженная зависимость выхода (γ, n) реакции от расстояния между образцом и осью пучка (рис. 4).

Угловое распределение интенсивности пучка γ -квантов не является симметричным относительно его оси, очевидно, из-за присутствия рассеянного излучения от полюсов и ярма

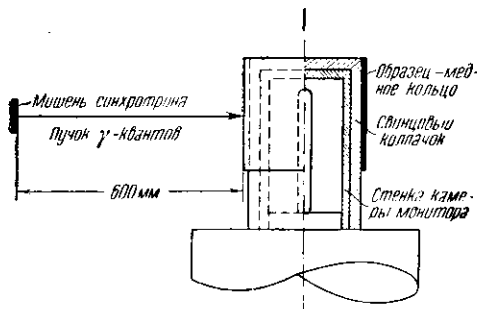


Рис. 3. Расположение образца и монитора при проверке работы системы стабилизации.

установки, регистрирующей наведенную активность, периодически контролировалась при помощи γ -препарата Co^{60} и оставалась постоянной в пределах $\pm 3\%$. Эта точность оказалась достаточной, так как на взятом участке кривой возбуждения реакции (γ, n) для меди изменение энергии $E_{\gamma m}$ всего на

магнита синхротрона. Соответственно не-симметричен также и выход реакции (γ , n). Следует полагать, что наличие рассеянного излучения, энергия которого лежит ниже порога реакции (γ , n) для меди, изменяет лишь

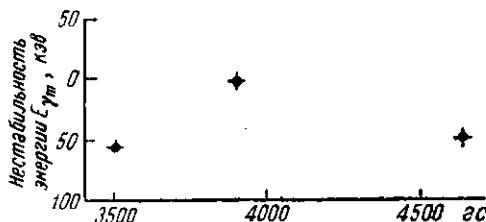


Рис. 5. Зависимость энергии $E_{\gamma m}$ от амплитуды магнитного поля синхротрона при постоянной установке потенциометра шкалы энергии.

дозу, регистрируемую монитором, и приводит к ошибкам, не связанным с системой стабилизации. Четырехдневная проверка стабильности энергии, проведенная с учетом

значении энергии. Результаты этих измерений показаны на рис. 5.

Калибровка шкалы энергии системы стабилизации проводилась измерением уже известных из данных по массам ядер порогов реакции $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$ и $O^{16}(\gamma, n)O^{15}$, а также порога реакции $Cu^{63}(\gamma, n)Cu^{62}$, приведенного в ряде работ [6]. Предварительно нулевым методом была проверена линейность потенциометра, с помощью которого должна изменяться энергия $E_{\gamma m}$. Во всех измерениях порогов образцы устанавливались в фиксированном положении, вплотную к ускорительной камере.

Доза облучения поддерживалась постоянной в пределах 5%. Образцы, содержащие углерод, были изготовлены из графита в виде цилиндрических колец (высота и диаметр—28 мм, толщина стенок—2 мм). Образцы облучались в течение 30 мин. Измерения наведенной активности указывали на присутствие в графите незначительной примеси,

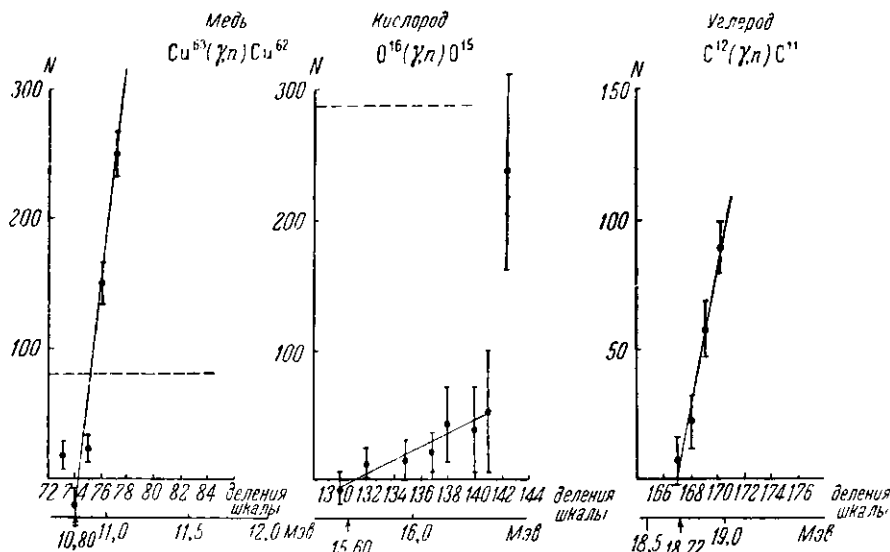


Рис. 6. Калибровка шкалы энергии системы стабилизации.

По оси абсцисс отложены деления шкалы и соответствующие им значения $E_{\gamma m}$ в МэВ. По оси ординат отложена наведенная активность в образцах за вычетом фона счетчика, который представлен пунктирными горизонтальными прямыми. (В случае измерения порога реакции $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$ фон составлял 323 импульса за 20 мин.) Стрелки обозначают пороги реакций.

этого обстоятельства, показала, что энергия $E_{\gamma m}$ остается постоянной в пределах ± 30 кэВ.

Для проверки чувствительности устройства стабилизации к изменению амплитуды магнитного поля были проведены измерения выхода реакции $Cu^{63}(\gamma, n)Cu^{62}$ при заданном

дающей активностью с полупериодом около 5 мин. Поэтому для точек у порога ($E_{\gamma m} = 18,72$ МэВ) измерялась активность в интервале времени от 11 до 31 мин. после конца облучения (полупериод для β -активности C^{11} равен 20,5 мин.).

Порог реакции $O^{16}(\gamma, n)O^{15}$ ($E_{\gamma m} = 15,6$ Мэв) определялся при помощи плексигласовых колец, имевших те же размеры, что и графитовые кольца. Время облучения составляло 4 мин. Измерение активности проводилось в течение 2—5 мин. после конца облучения. Фотонейтронный порог для меди (Cu^{63}) измерялся с помощью медных колец указанных выше размеров. Время облучения составляло 5 мин. Во избежание регистрации активности за счет реакции $Cu^{65}(\gamma, n)Cu^{64}$ ($T = 12$ час.) бралась разность активностей, полученных за интервалы 2—7 мин. и 30—35 мин.

Результаты измерений порогов приведены на рис. 6. Ввиду того, что точное определение порога для кислорода в наших условиях было затруднительным из-за очень медленного нарастания кривой активности у порога, за калибровочные точки были взяты пороги для меди и углерода. При этом порог реакции $Cu^{63}(\gamma, n)Cu^{62}$ взят равным 10,80 Мэв, что является средним из четырех результатов [6].

При такой калибровке ход кривой активности $O^{16}(\gamma, n)O^{15}$ у порога не противоречит расчетному значению порога, равному 15,60 Мэв.

Поступила в редакцию 4 V 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. V. von Tersch and R. L. Dody, Proc. Natl. Electron. Conf. (август 1952).
2. L. Katz, R. N. H. Haslam, R. S. Horsley, A. G. W. Cameron and R. Montalbetti, Phys. Rev. 95, 464 (1954).
3. Spicer and Penfold, Rev. Sci. Instr. 26, 952 (1955).
4. R. Basile et C. Schuhe, J. Phys. Rad. 16, 372 (1955).
5. Детали и элементы радиолокационных станций. Изд. «Советское радио», 1952, т. II, стр. 315.
6. G. C. Baldwin and H. W. Koch, Phys. Rev. 67, 1 (1945); McElhinney, Hansen, Becker, Duffield and Diven, Phys. Rev. 75, 542 (1949); Sher, Halpern and Mann, Phys. Rev. 84, 387 (1951); M. Birnbaum, Phys. Rev. 93, 146 (1954).