

# ФИЗИКА КИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 621.039.66 : 533.9.08

## ПОДСИСТЕМА НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ КТМ

В.А. Кудрявцев, А.В. Шарнин

*Томский политехнический университет*

Проведен анализ возможных принципов детектирования и методов измерения нейтронов на термоядерных установках типа токамак. С учетом имеющихся требований и ограничений определен тип детектора и методика проведения измерений. Разработана структура подсистемы сбора данных с нейтронной диагностики токамака. Проработаны вопросы интеграции подсистемы сбора данных в информационно-измерительную систему термоядерной установки и синхронизации ее работы с другими подсистемами.

Термоядерные установки типа токамак являются в настоящее время наиболее перспективными по созданию и удержанию высокотемпературной плазмы магнитными полями. Выход нейтронов свидетельствует об интенсивности протекания термоядерной реакции и является важным диагностируемым параметром. Зная спектр нейтронного излучения, можно также судить о температуре ионов.

Основными термоядерными реакциями, протекающими в плазме установок типа токамак, являются D-D и D-T реакции, проходящие с образованием нейтронов с энергиями 2.4 МэВ и 14.1 МэВ соответственно. В данной статье мы будем рассматривать установки, работающие на дейтерии, в них имеют место только D-D – реакции. В данном случае выход нейтронов не превышает  $10^7$  нейтр/(с·см<sup>2</sup>). При этом для анализа протекающих в плазме процессов требуется иметь энергетическое разрешение меньше 5% и скорость счета больше  $10^5$  н/(с·см<sup>2</sup>).

При детектировании нейтронных потоков с указанными характеристиками могут быть использованы следующие типы детекторов: твердотельные детекторы Si(Li), Ge(Li); неорганические сцинтилляторы NaI(Tl), CsI(Tl), LiI(En) и органические (стильбен, толан, фенилциклогексан) [1]. Перечисленные типы детекторов регистрируют не только нейтронный поток, но и кванты жесткого рентгеновского излучения. Поэтому при проведении измерений необходимо компенсировать сигналы, вызванные жестким рентгеновским излучением. Для выполнения этой задачи на практике используется ряд методов разделения, очень часто связанных с типом используемого датчика.

При выборе в качестве детектора сцинтиллятора может быть использован метод ядер отдачи (TPR). В основе данного метода лежит рассеяние нейтронов на ядрах водорода, при котором появляется протон отдачи и происходит световая вспышка (сцинтилляция). Регистрируя с помощью фотоумножителя интенсивность вспышки света, можно определить энергию нейтрона. Следствием рассеяния нейтронов на ядрах рабочего тела детектора является возникновение ядер отдачи. Чаще всего в качестве радиатора выбирается водород (*n-p*-рассеяние). Для детектирования нейтронов средних энергий применяют сцинтилляторы, содержащие водород. При определенных условиях импульсы на выходе фотоумножителя линейно связаны со световой вспышкой. Здесь следует отметить, что связь световых выходов с энергией частицы неоднозначна, так как нейтроны и протоны рассеяния могут претерпевать вторичное рассеяние на ядрах радиатора. Данный метод позволяет получить требуемое

разрешение по скорости счета, но достичь заданного предела по точности измерений в данном случае невозможно.

Более полную информацию об энергии нейтрона можно получить, используя метод полного поглощения энергии измеряемой частицы. Данный метод основан на эффекте полного или почти полного поглощения энергии измеряемой частицы в твердотельном детекторе. Форма сигнала на выходе детектора излучения зависит не только от энергетических потерь, но и от плотности ионизации вдоль трека, т.е. форма сигнала с детектора определяется видом зарегистрированного излучения. При регистрации детектором нейтронов и жесткого рентгеновского излучения основная трудность в разделении сигналов по форме состоит в том, что сигнал на выходе детектора является суммой полезной составляющей и помехи. При использовании данного метода может быть достигнута погрешность меньше 8%.

Метод временной селекции позволяет получить большую точность по сравнению с рассмотренными выше методами. Суть метода состоит в измерении времени пролета  $t$  протоном расстояния  $l$  от первого до второго детектора. Учитывая, что энергия протонов низких энергий определяется зависимостью  $E = mv^2/2$ , получим время пролета протоном расстояния  $l$  от первого до второго детектора:  $t = l\sqrt{m/2E}$ . Данный метод позволяет полностью исключить  $\gamma$ -фон. Структура времяпролетного нейтронного спектрометра показана на рис. 1.

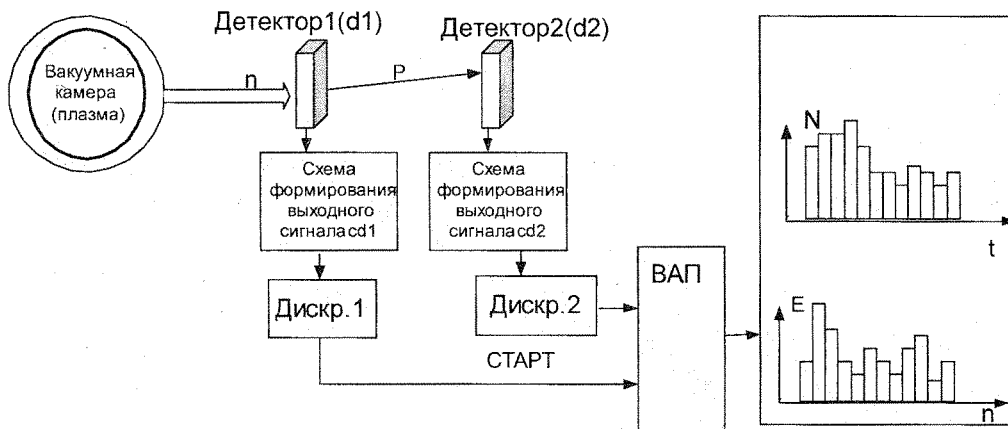


Рис.1. Упрощённая схема счётчика времени полёта d1, d2 – датчики; ВАП – преобразователь времени в амплитуду.

Нейтроны регистрируются при появлении сигналов на выходе обоих детекторов. После того, как частица проходит через первый детектор d1, (сцинтилляционный счетчик), запускается преобразователь времени в амплитуду (ВАП). Преобразование завершается после регистрации протона отдачи во втором детекторе d2 (Si(Li)–полупроводниковый диод). Амплитуда на выходе преобразователя ВАП будет при этом пропорциональна времени пролета протона отдачи.

Каждый из рассмотренных методов имеет ряд недостатков, поэтому для проведения измерений нейтронного потока целесообразно использовать другой метод (методы) или изменить имеющиеся. Поэтому при построении подсистемы сбора данных было принято решение использовать комбинированный метод. На рис. 2 представлена схема, поясняющая принцип практической реализации этого подхода.

В качестве детектора был выбран пластиковый сцинтиллятор NE102A, обладающий малым временем формирования выходного сигнала -  $4 \cdot 10^{-9}$  с, что обеспечивает требуемую скорость счета нейтронов.

Для компенсации  $\gamma$ -фона и уменьшения собственных шумов ФЭУ, используется два ФЭУ. При взаимодействии нейтрона и гамма-излучения с веществом сцинтиллятора появляется вспышка света (сцинтилляция), поэтому запуск измерения

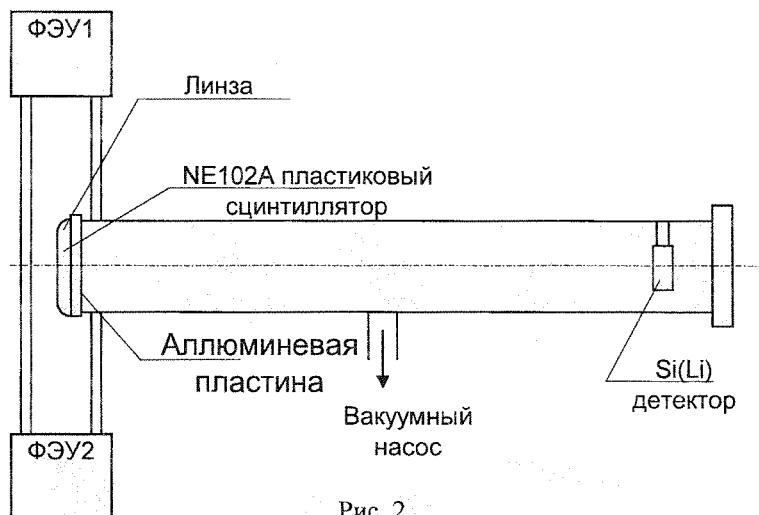


Рис. 2.

должен осуществляться лишь при регистрации попадания нейтрона в детектор 1. Для этого измеряется амплитуда сигнала и на схеме совпадений проверяется событие попадания нейтрона. В данном случае для определения события попадания нейтрона или  $\gamma$ -кванта используется разделение сигналов по форме. Принципы технической реализации данной методики будут рассмотрены ниже при подробном описании структуры измерительного канала. В качестве второго детектора был выбран полупроводниковый Si(Li) – диод, регистрирующий протоны рассеяния. При появлении сигнала на выходе Si(Li) диода производится его обработка. Энергия налетающего нейтрона определяется следующим образом:

$$E_n \cong E_p + E_{\text{сцин}}; \quad (1)$$

$$E_p = E_{\text{кинкт}} = \left( \frac{m_p}{2} \right) \left( \frac{l}{t} \right)^2. \quad (2)$$

Структура подсистемы сбора данных, реализующая комбинированный метод, представлена на рис. 3. Рассмотрим более подробно структуру и элементы данной подсистемы. Так как сигналы с детекторов имеют малую амплитуду, их необходимо усилить, для этого используется предусилитель. Основная функция предусилителя заключается в том, чтобы принять слабый сигнал с детектора, усилить его и передать по кабелю в узел обработки, который состоит из основного усилителя, формирователя импульса, дискриминатора и пересчетной схемы. Любые шумовые сигналы, генерируемые вблизи детектора или в кабеле, соединяющем его с входом предусилителя, будут усиливаться вместе с усилением полезного сигнала, что уменьшает отношение сигнал-шум.

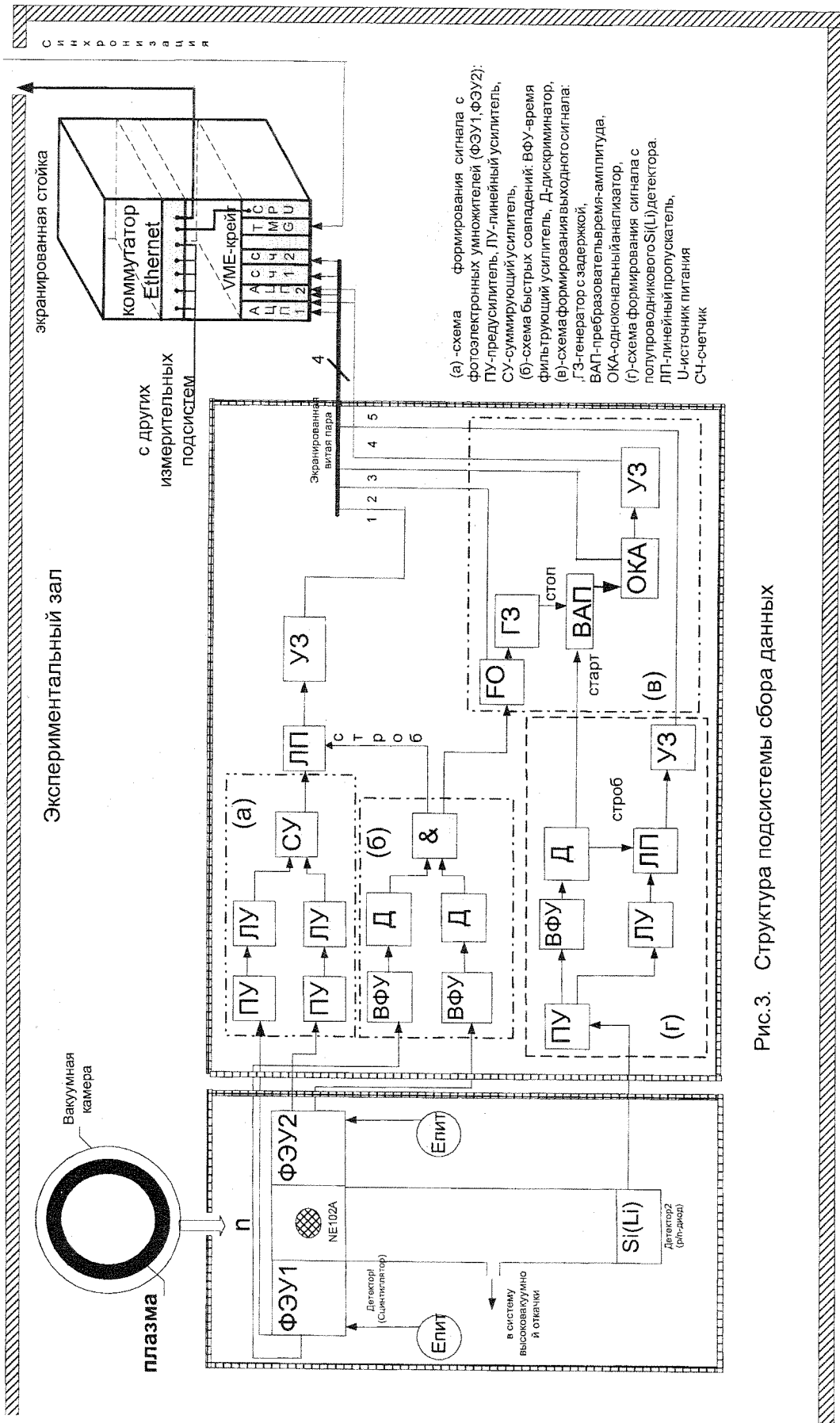


Рис.3. Структура подсистемы сбора данных

Кроме того, длинный кабель между детектором и предусилителем будет ослаблять сигнал и может вызвать серьезные проблемы согласования детектора с предусилителем. С учетом этого, сцинтиллятор, ФЭУ и предусилитель выполняются в виде монолитных блоков. Сигналы с динодов каждого ФЭУ поступают на предусилители (ПУ). Введение ПУ позволяет снизить напряжение питания ФЭУ. Компенсация разброса коэффициентов усиления ФЭУ выполняется путем индивидуальной настройки предусилителей.

Аналоговые сигналы с выхода ПУ поступают на линейные усилители (ЛУ), а далее на сумматор (СУ). После СУ включен линейный пропускатель (ЛП), управляющим сигналом для которого служит выходной импульс схемы быстрых совпадений (&). К выходу ЛП подключен усилитель с задержкой (УЗ). Аналоговый сигнал с УЗ передается по экранированным линиям связи в VME-крейт для преобразования в цифровую форму (сигнал 1).

Для компенсации  $\gamma$ -фона используется метод разделения сигналов по форме, сущность которого состоит в следующем. Времена нарастания переднего фронта выходного сигнала не зависят для органических сцинтилляторов от типа возбуждающего излучения. Различие состоит в относительной интенсивности долгоживущих компонент сигнала, соответствующих регистрации нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Нейтронам отвечает более долгоживущая компонент сигнала, поэтому их различают по полной составляющей тока с детектора.

В случае одновременного попадания в сцинтиллятор нейтрона и  $\gamma$ -кванта их разделение осуществляется при помощи анализа полной и быстрой составляющих токов [2], которые формируются время фильтрующими усилителями (ВФУ). Сигналы с выхода дискриминаторов передаются на схему быстрых совпадений (&). Формируемый схемой быстрых совпадений дискретный сигнал является и управляющим и информационным. Он поступает на линейный пропускатель (ЛП) и логический разветвитель (ЛО). Сигнал с выхода логического разветвителя передается в VME-крейт (сигнал 2).

Токовый сигнал Si(Li) – полупроводникового детектора, пропорциональный энергии падающего протона рассеяния, преобразуется предусилителем в сигнал напряжения. Затем этот сигнал дополнительно усиливается и передается по экранированной линии в VME-крейт для преобразования в цифровую форму (сигнал 5).

В рассматриваемой измерительной системе необходимо выполнить внешнюю синхронизацию запуска АЦП1 и АЦП2 с появлением сигналов на входах соответствующих усилителей с задержкой (УЗ). Запуск аналого-цифрового преобразования выполняется при высоком уровне сигнала GATE (ворота) на соответствующих входах АЦП. Сигнал GATE формируется при регистрации нейтрона и протона соответственно в первом и втором детекторах. Он появляется после завершения формирования сигналов на выходах усилителей с задержкой (УЗ) и также позволяет скомпенсировать  $\gamma$ -фон.

Аналоговые и дискретные измерительные сигналы 1, 2, ...5 передаются по экранированным линиям связи на входы модулей УСО, установленных в VME-крейте. Перечисленные сигналы содержат следующую информацию:

- сигнал №1: амплитуда импульса с первого детектора ( $E_{сцил}$ );
- сигнал №2: попадание нейтрона в 1-й детектор;
- сигнал №3: попадание нейтрона в 1-й детектор и образовавшегося протона во 2-й детектор;
- сигнал №4: сигнал запуска АЦП – GATE (ворота);
- сигнал №5: амплитуда импульса со второго детектора ( $E_{кинет}$ ).

Данные сигналы позволяют вычислить энергию регистрируемого нейтрона по формулам (1)-(2).

Исходя из требований к максимальной скорости счета  $10^5$  нейтр/(с·см<sup>2</sup>), определяемой исследуемой динамикой протекающих в плазме процессов, необходимо использовать цифровые счетчики со скоростью счета не ниже 100кГц и АЦП с периодом оцифровки меньше 10мкс, входом разрешения преобразования (GATE) и входом внешней синхронизации. Для синхронизации работы подсистемы нейтронной диагностики с другими подсистемами автоматизированной системы управления термоядерной установки используется модуль локальной синхронизации (TMG), принимающий сигналы от центрального блока синхронизации и передающий синхроимпульсы в модули УСО.

Проведен анализ возможных принципов детектирования и методов измерения нейтронов на термоядерных установках типа токамак. С учетом имеющихся требований и ограничений определен тип детектора и методика проведения измерений. Разработана структура подсистемы сбора данных с нейтронной диагностики токамака. Проработаны вопросы интеграции подсистемы сбора данных в информационно-измерительную систему термоядерной установки и синхронизации ее работы с другими подсистемами.

#### Литература

1. Прайс В. Регистрация ядерного излучения. – М.: Энергоатомиздат, 1960.
2. Цитович А. П. Ядерная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 669.87/88.002.2-154

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЛЛИЯ С ЛИТИЕМ

И.А. Тихомиров, А.А. Орлов, Д.Г. Видяев

*Томский политехнический университет*

Разработана оригинальная физико-математическая модель процесса непрерывного капельного получения галламы лития. Рассчитаны основные параметры установки для получения галламы лития заданной концентрации  $0,8 \div 1,0$  моль/л. Проведено сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Современные технологии требуют использования особо чистых материалов. Одной из наиболее сложных задач является получение чистых щелочных металлов (калия, натрия и др.). Для их разделения и очистки щелочных металлов нами разработан экологически безопасный и высокоэффективный галламно-обменный метод [1], в котором используется интерметаллическое соединение галлия с литием – галлама лития с концентрацией лития в галлии  $0,8 \div 1,0$  моль/л. Данное соединение целесообразно получать путем прямого растворения лития в галлии (в расплавах металлов).

Нами разработана конструкция установки по непрерывному получению галламы лития капельным способом [1]. Она представляет собой вертикальный цилиндрический реактор, в верхней части которого с помощью перфорированной пластины формируется капельный режим истечения жидкого расплавленного галлия. Капли галлия под действием силы тяжести движутся сначала в атмосфере инертного газа (аргона), а затем в слое расплавленного лития, образуя галламу лития нужной концентрации.