

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.
ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«Система медленного контроля детектора iDREAM»

Выполнил студент

413 группы

Связов Максим Олегович

Научный руководитель

к.ф.-м.н., с.н.с.

Чепурнов Александр Сергеевич

Допущен к защите _____

Зав. Кафедрой _____

Москва 2020

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Обзор литературы.....	4
XENON100.....	4
RENO.....	7
Borexino.....	10
Глава 2 Детектор iDREAM.....	11
Шина CAN и протокол CANOpen.....	11
Нейтронный метод мониторинга ядерных реакторов.....	13
Описание устройства детектора.....	14
Средства первичной обработка сигнала.....	17
Глава 3 Разработка системы медленного контроля iDREAM.....	18
Графический интерфейс.....	24
Заключение.....	26
Библиография.....	27

Введение

Современный физический прибор, особенно в случае исследований в физике высоких энергий, представляет собой сложное устройство со множеством узлов. Возникает задача управления и координации их работы. Детектор реакторных антинейтрино iDREAM включает около пятидесяти устройств, вроде источников высокого напряжения для питания и счетчиков для обработки сигналов с фото-электронных умножителей, управление которыми представляет собой отдельную сравнительно сложную задачу.

Программное обеспечение детектора разделяется на систему сбора данных, отвечающую за получение, первичную обработку и запись научных данных эксперимента, и систему медленного контроля, отвечающую за функционирование систем детектора. Она имеет дело с относительно медленно меняющимися величинами (скорость сбора данных порядка 1 Гц), способными повлиять на физические данные и безопасность установки, вроде температуры, уровня сцинтиллятора, давления газа над ним и напряжением на ФЭУ.

iDREAM – первый промышленный антинейтринный детектор, предназначенный для мониторинга состояния ядерного реактора [20]. В отличие от прочих немногочисленных компактных нейтринных детекторов, ему предстоит эксплуатация в промышленных условиях и серийное производство. Материалы должны быть доступны, сравнительно недороги, и, по возможности, отечественного происхождения. Последнее, например, повлияло на выбор вещества органического сцинтиллятора. Программное обеспечение должно быть надежно и просто в использовании. Система медленного контроля должна опираться на проверенные промышленные решения – такими становятся использование шины CAN и протокола CANOpen. Проблема, ставящаяся в основании данного исследования – отсутствие простой и надежной системы медленного контроля, адекватной условиям промышленной эксплуатации детектора iDREAM.

Постановка задачи: написание программы, служащей для объединения и управления компонент детектора.

Требования к разрабатываемой системе:

Поскольку состояние детектора характеризует достаточно большое количество изменяющихся во времени параметров, их нужно автоматически анализировать, чтобы отлавливать нештатные ситуации, сохранять и наглядно представлять оператору. Система должна быть масштабируема, т.е. должна быть возможность запустить ее с разным количеством устройств. Кроме того, она должна быть защищена от сбоев, легко перезапускаться в нештатной ситуации и быть помехоустойчивой.

Глава 1 Обзор литературы

Приведем описание нескольких проектов, потребовавших решения сходных задач в области создания систем медленного контроля

XENON100

XENON100 – эксперимент по поиску темной материи в виде массивных слабовзаимодействующих частиц (WIMP), проходил в лаборатории LNGS, Гран-Сассо[1]. Детектор представляет собой камеру со сверхчистым жидким ксеноном, просматриваемую двумя массивами фотоумножителей, регистрирующих как стинцилляционный, так и ионизационные сигналы. Несмотря на различие в типе тела мишени, с точки зрения системы медленного контроля система похожа на детектор iDREAM, и найденные решения могут быть полезны.

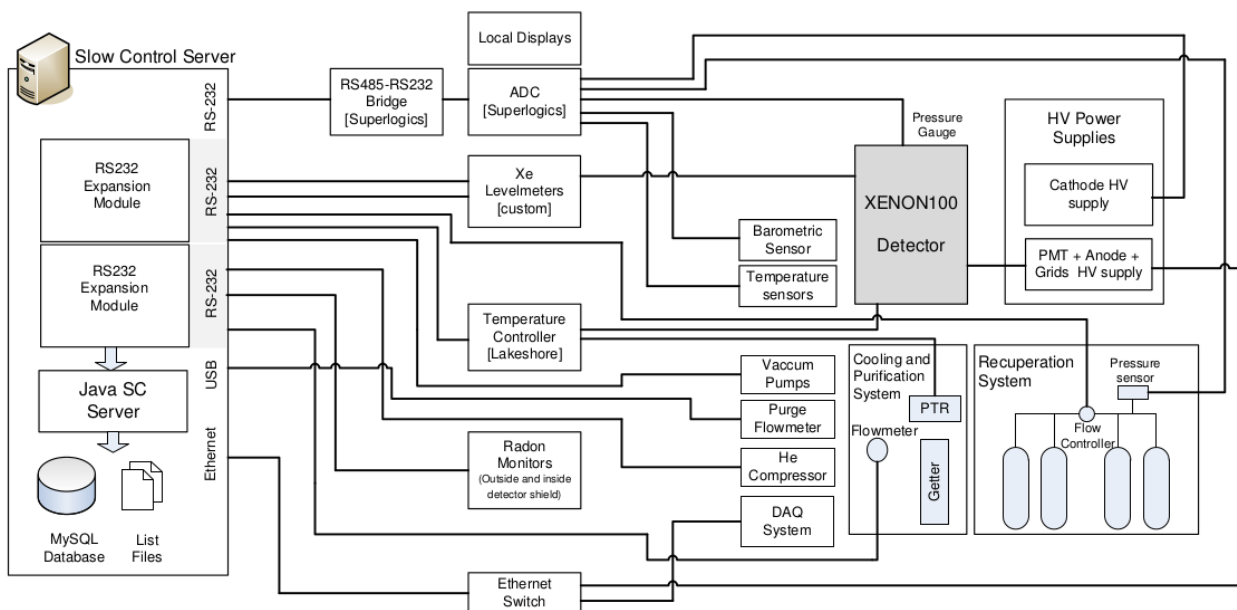


Рис 1 Блок-схема детектора XENON100 [2]

Детектор XENON100 так же, как и нейтринные эксперименты, имеет высокие требования к уровню фона, поэтому он расположен под землей. Система медленного контроля представляет собой сервер с операционной системой Gentoo Linux, расположенный в непосредственной близости с установкой, доступ человека к которому необходим только в случае нештатной ситуации, и клиентов, которые могут находиться в любой точке мира, связанных с сервером через интернет. Специфика установок, работающих с жидкими газами, является необходимость быстро реагировать на изменение таких параметров, как давление и температура, в данном случае это реализовано на аппаратном уровне, ниже, чем уровень сервера. Другой характерной проблемой, которую пришлось решать разработчикам, стало использование оборудования с разнородными интерфейсами и программным обеспечением, связанные с многоучрежденческим характером проекта. Решением стало использование стандартных протоколов и виртуальной машины JAVA.

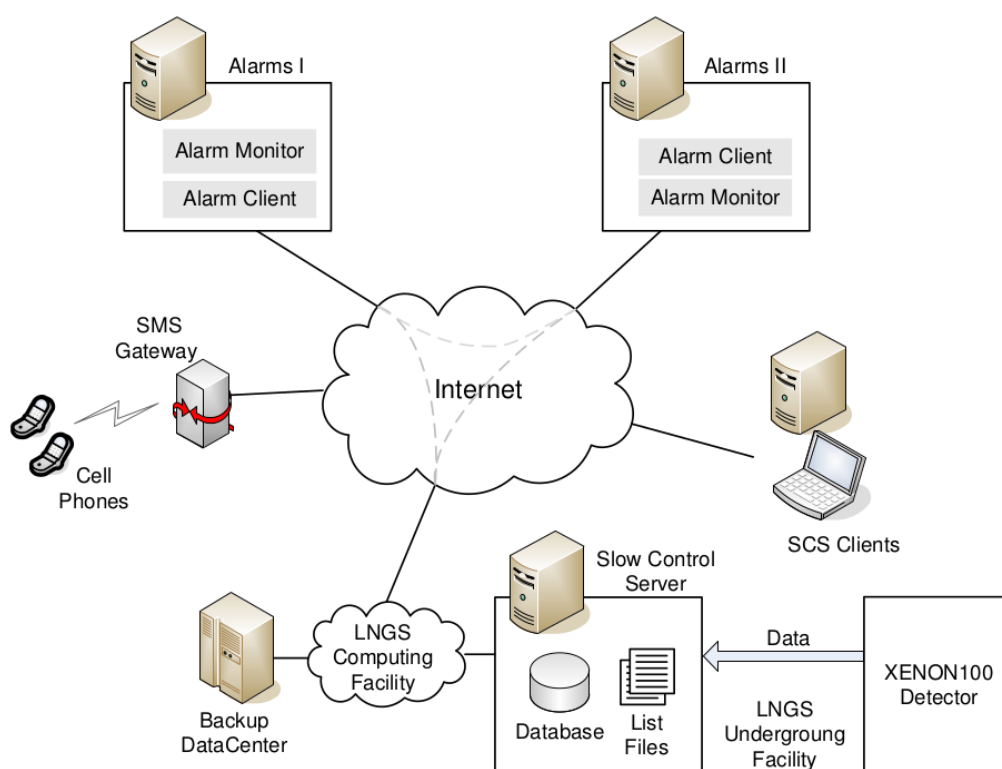


Рис 2 Схема системы медленного контроля детектора XENON100 [2]

Сервер связан с периферийными устройствами через 5 входов: три последовательных порта RS-232, через которые происходит связь с датчиками уровня, вакуумными помпами и АЦП баро- и термодатчиками, USB, через который происходит связь с расходомером по протоколу Modbus и порт Ethernet, через который осуществляется сбор данных с CAEN SY1527LC, к которому подключены 242 ФЭУ, просматривающих чувствительный объем.

Периферийные устройства опрашиваются в соответствии с таймерами, запущенными на сервере, таким образом, сеть организована по принципу master-slave. Поток данных идет независимо, и в случае выхода из строя одного из периферийных устройств работа сети в целом не нарушается. Данные с них архивируются в разветвленной файловой системе детектора и хранятся время, специально определенное пользователем. По его истечению они удаляются, чтобы избежать переполнения памяти.

Для предотвращения потери значимых данных в случае неполадки на сервере предусмотрено специальное удаленное бэкап-хранилище. К информации, хранящейся на сервере, имеют доступ через интернет клиенты, среди которых выделены два сигнальных клиента, два компьютера, которые удаленно осуществляют непрерывный мониторинг ключевых параметров состояния детектора, и в случае возникновения аварийной ситуации автоматически рассылают предупреждения на электронную почту и телефоны инженеров.

RENO

Эксперимент по проверке теории нейтринных осцилляций посредством измерения потока антинейтрино от шести реакторов Ханбитской атомной станции (Корея) парой, ближним(294 м) и дальним(1383 м), детекторов с мишенью из гадолинизированного сцинтиллятора[2]. Конструкция детектора RENO во многом сходна с конструкцией детектора iDREAM – он также состоит из внутреннего детектора(ID) и внешнего вето(OD). ID представляет собой цилиндрический сосуд из нержавеющей стали на 16 тонн гадолинизированного(0,1% Gd) жидкого сцинтиллятора. Этот объем также разделен акриловой цилиндрической перегородкой на главный и дополнительный, призванный регистрировать гамма-кванты, покинувшие главный объем. ID просматривается 354 ФЭУ Hamamatsu R7081. Его окружает со всех сторон OD, представляющий собой бак с дистиллированной водой, просматриваемый 67 ФЭУ. Толщина водяного слоя — 1,5 метра, он выполняет функции мюонного вето.

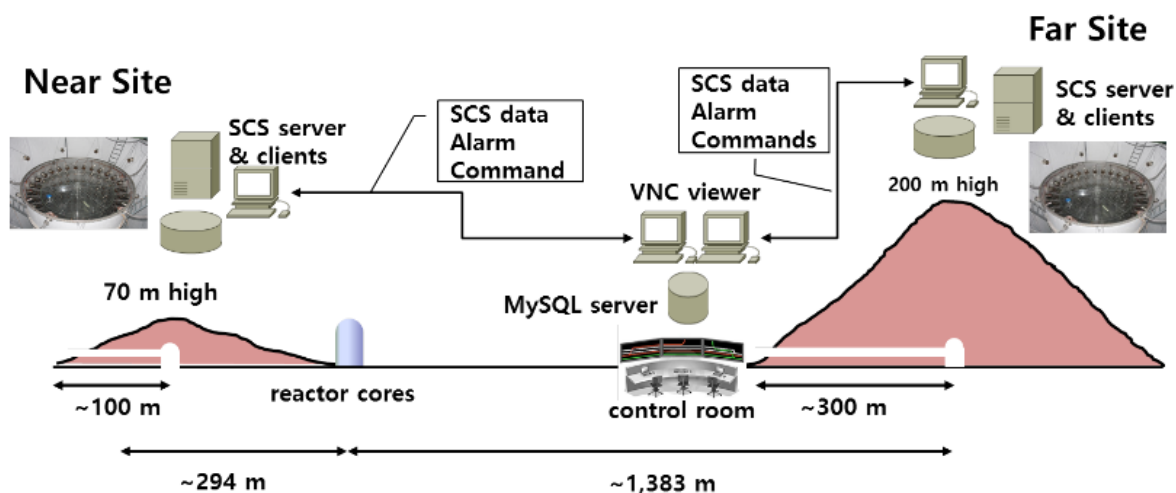


Рис 3 Принципиальная схема эксперимента RENO [3]

Все 421 ФЭУ RENO разделены на сети по 48 умножителей, на каждый из которых приходится один источник питания CAEN A1932 и делитель, так как они подключены одноканальным способом. Сбор данных происходит через одно устройство CAEN S41527LC, подключенное к серверу через OPC-сервер (Open Platform Communications), снимающий проблему соответствия протоколов.

Особенностью данного эксперимента является необходимость использования одновременно двух идентичных детекторов, и поддержания их в идентичном состоянии с помощью общей системы медленного контроля.

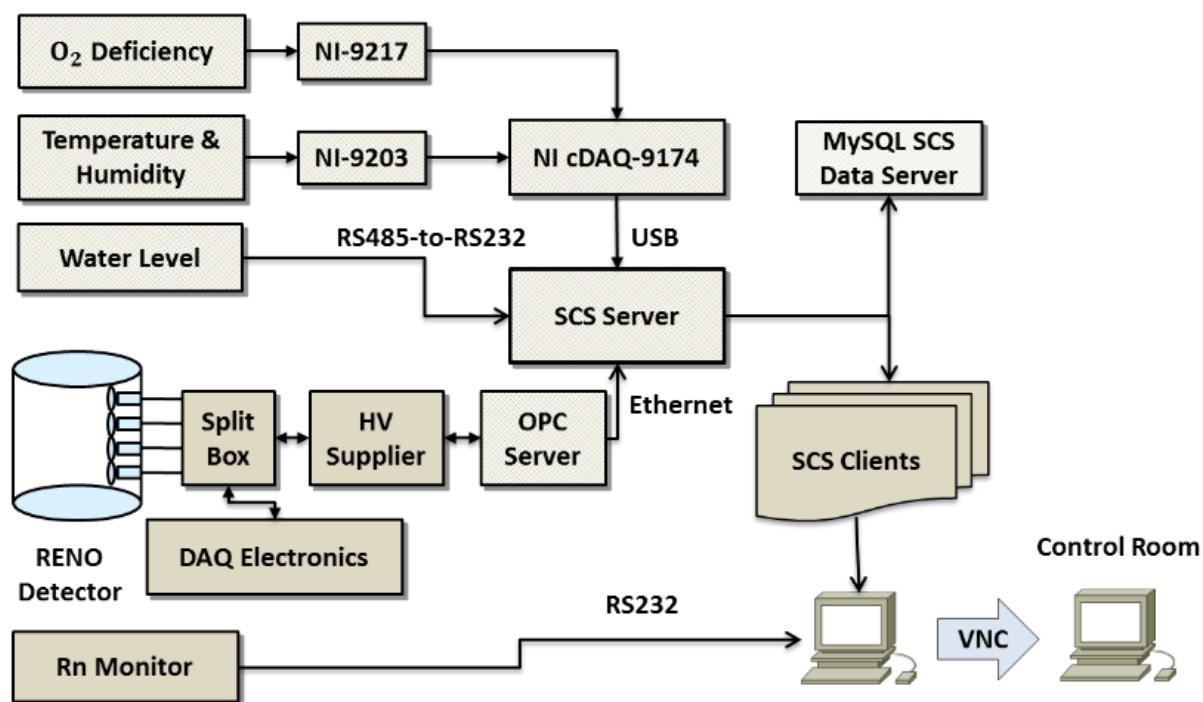


Рис 4 Схема системы медленного контроля детектора RENO [3]

Рядом с каждым детектором находится компьютер, собирающий и записывающий данные. Они выступают в роли серверов. В контрольном зале находится компьютер, который соединяется этими серверами через TeamViewer, с него происходит синхронное управление ближним и дальним детектором, кроме того, на нем же находится сигнализационная система, отлавливающая выход параметров детектора за безопасные пределы.

На клиентских машинах работают приложения, написанные в графической среде разработки LabView [6], выбранная за интуитивный интерфейс, дружелюбный к разработчику, и низкую зависимость библиотек устройств. Эти приложения предназначены для мониторинга основных параметров детектора, напрямую связанных не только с его работоспособностью, но и влияющих на собираемые им физические данные – уровень жидкости в чувствительном объеме.

Borexino

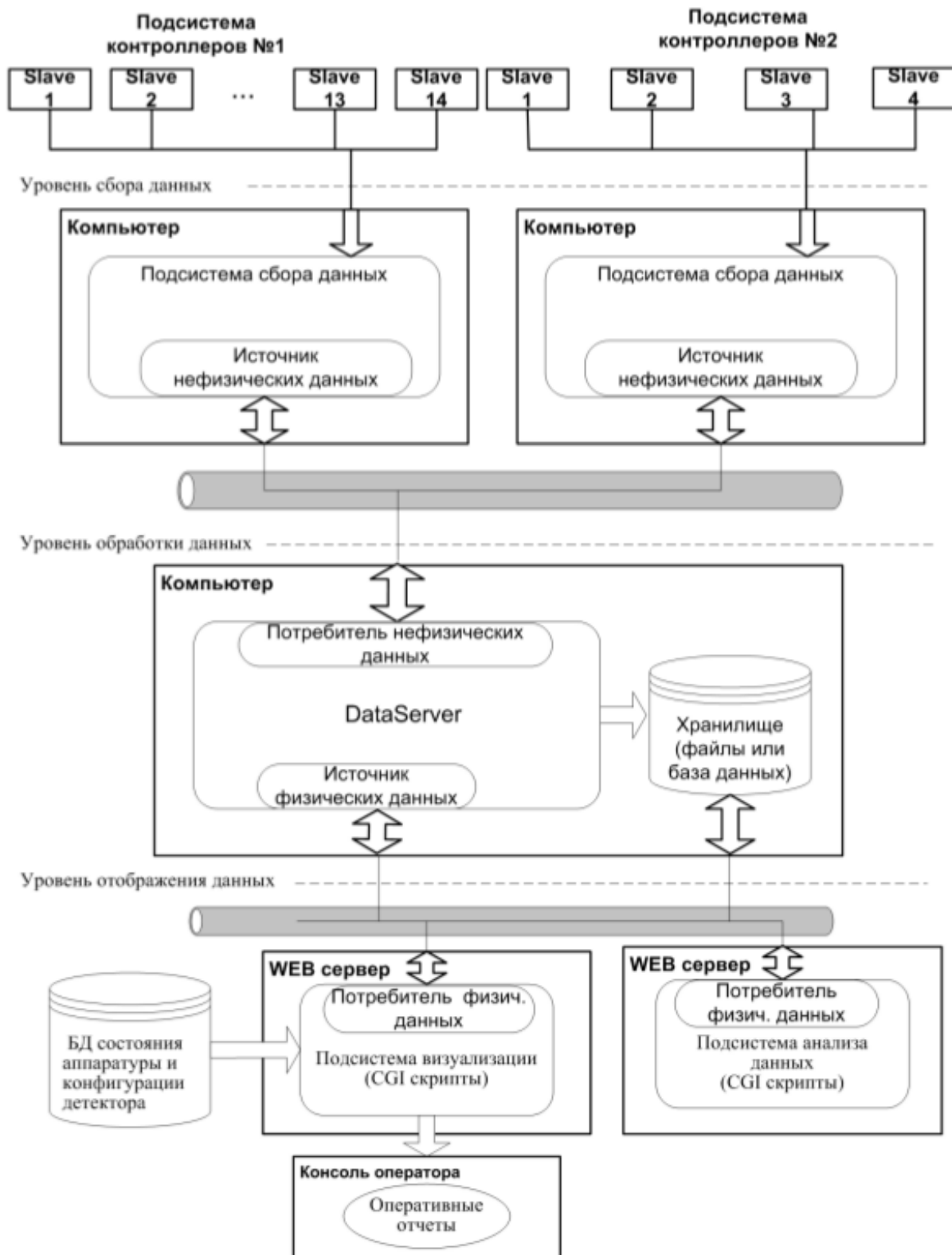


Рис 5 Блок-схема системы медленного контроля детектора Borexino [5]

Это детектор низкоэнергетичных солнечных нейтрино, представляющий собой шарообразную камеру, заполненную 270 тоннами жидкого стинтиллятора и просматриваемую 2212 ФЭУ, кроме того, еще 208 умножителей задействованы в мюонном вето [5]. Для контроля за состоянием этих фотоумножителей была создана система медленного контроля, так же использующая шину CAN под управлением протокола DeviceNet.

Такая сеть строится по принципу master-slave. В роли мастера выступает установленный на управляющем компьютере DeviceNet-mater, а в роли подчиненных устройств – счетчики частотометры, которых в данной системе используется 14 16-канальных для внутренней, основной части детектора и 4 64-канальных для внешней(вето).

Некоторые решения, использованные в системе медленного контроля детектора iDREAM, уже были частично апробированы при создании системы контроля темновых шумов детектора Borexino.

Глава 2 Детектор iDREAM

Шина CAN и протокол CANOpen

Для построения сети требуемой надежности и масштабируемости использована шина CAN [7]. Это промышленная шина, прочно удерживающая лидирующие позиции в автоматизации производства. Разработчики оценивают вероятность невыявления ошибки как $4,7 \cdot 10^{-11}$; передача сообщения сопровождается дублирующими проверками, используются так называемые дополняющие биты(bit stuffing) и контрольные суммы с отправкой подтверждения, что практически гарантирует, что сообщение рано или поздно будет доставлено без ошибки. Идеология шины CAN подразумевает ее использование для создание сетей со множеством узлов, организованных по принципу

producer-consumer, поэтому столкновение кадров разрешаются (collision resolving) посредством арбитража, вместо отлавливания столкновений (collision detection), как действует, например Ethernet, использующийся SCS XENON100. Она лучше подходит для соединения малого количества устройств. Выгодным отличием сети CAN становится свойственная сетям с арбитражом кадров отсутствие падения скорости передачи в случае одновременной отправки сообщений. Последнее особенно актуально, так как системе медленного контроля детектора нужно одновременно, с одной стороны, получать данные с массива однородных элементов, а с другой обеспечивать связь нескольких устройств разного назначения. Все узлы iDREAM'a соединяются с помощью шины CAN, отвечая требованию простоты, единообразия и надежности, необходимых промышленному детектору. Если же в каком-то из узлов происходит сбой, в том числе и в управляющем компьютере, засбоившее устройство можно перезагрузить, не вмешиваясь в работу остальных узлов сети.

Однако разработка не начинается на основе базовой спецификации шины CAN, без привлечения одного из популярных протоколов верхнего уровня. Протокол верхнего уровня отвечает за распределение имен в сети, способ обращения к узлам, реализация возможностей, не предусмотренных в базовой спецификации CAN-сети, вроде передачи сообщений, превосходящих 8 байт. Наибольшим распространением в автоматизации производственных и экспериментальных процессов получили протоколы верхнего уровня DeviceNet, использованный при создании системы контроля темновых шумов Borexino, и CANopen. Для данной задачи был выбран протокол CANopen, имеющий большее распространение в Европе, в то время как DeviceNet по происхождению и по преимущественному распространению американский протокол.

Коммуникации по протоколу CANopen предшествует конфигурация узлов сети. На этом этапе сеть функционирует в режиме master-slave, но по окончании конфигурирования она переходит в режим producer-

consumer. Соответственно, двум режимам функционирования соответствует два типа кадров, которые могут передаваться по CAN шине, коммуникационный PDO и конфигурационный SDO.

Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов

В реакциях деления, происходящих в ядерном топливе, образующиеся ядра-продукты являются нейтронизбыточными, и испытывают бета-распад, при котором образуются антинейтрино. Таким образом, измерение потока антинейтрино позволяет судить о количестве распадов в реакторе, а, следовательно, и о выделяемой энергии. Измерение антинейтринных спектров потенциально позволяет дает информацию о процессах, происходящих в реакторе, однако, расшифровка этих спектров сложна. Детектирование антинейтрино происходит сцинтилляционным методом. Используется реакция обратного бета-распада протона с выделением позитрона, аннигиляция которого рождает пару гамма-квантов и нейтрон, который затем захватывается ядрами вещества сцинтиллятора, рождая еще один гамма-квант. Эти гамма-кванты регистрируются ФЭУ, просматривающими объем детектора.

$$p + \bar{\nu}_e = n + \bar{e}$$

Основными преимуществами нейтринного метода дистанционного контроля являются возможность установки детектора в безопасной зоне, за радиационной защитой реактора, и принципиальная нефальсифицируемость собираемых данных, что позволяет использовать его для контроля за наработкой оружейного плутония. Все это становится возможным благодаря чрезвычайно высоким проникающим способностям антинейтрино.

Описание устройства детектора

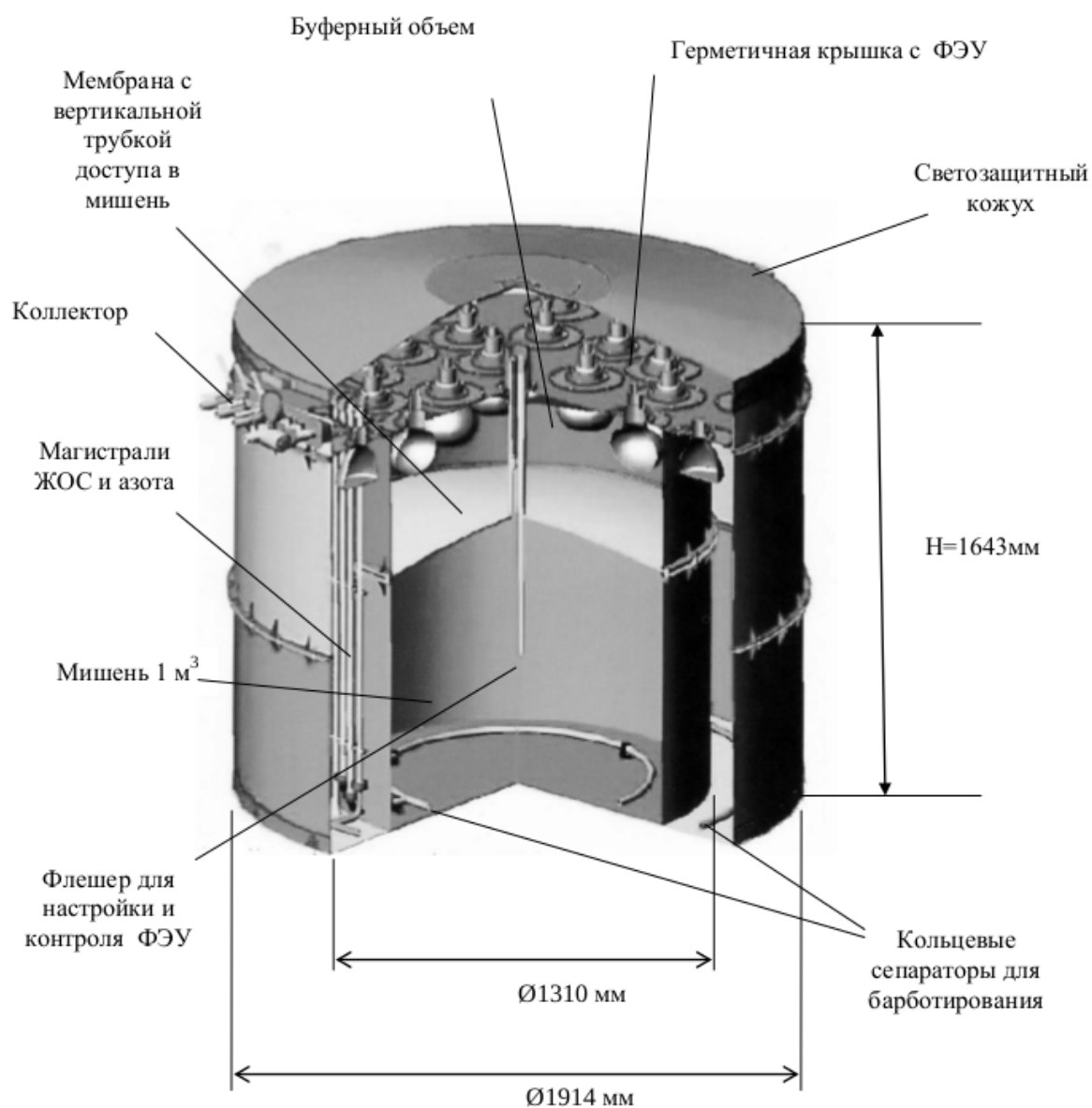


Рис. 1
К стр. 3

ВМУ. Физика. № - 2015
К статье Чепурнова А.С.

Рис 6 Устройство детектора iDREAM [1]

Детектор iDREAM представляет собой два разборных цилиндрических

бака из нержавеющей стали, образующих двуслойную конструкцию. Они заполнены жидким органическим сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола с добавкой соединений гадолиния и гамма-шифтера. Есть мишень объемом в 1 м³, в которой, собственно, происходит реакция рассеяния нейтрино, просматриваемая шестнадцатью ФЭУ, и боковой объем, просматриваемый двенадцатью ФЭУ, служащий для захвата гамма-квантов, покинувших мишень. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной крышкой на две части, над мишенью находится пространство, заполненное ЛАБ, служащее пассивной защитой от гамма фона материала ФЭУ и увеличения светосбора. Внутренняя поверхность баков покрыта светоотражающим составом. На дне баков проложены кольцевые трубки для барботирования сцинтиллятора.

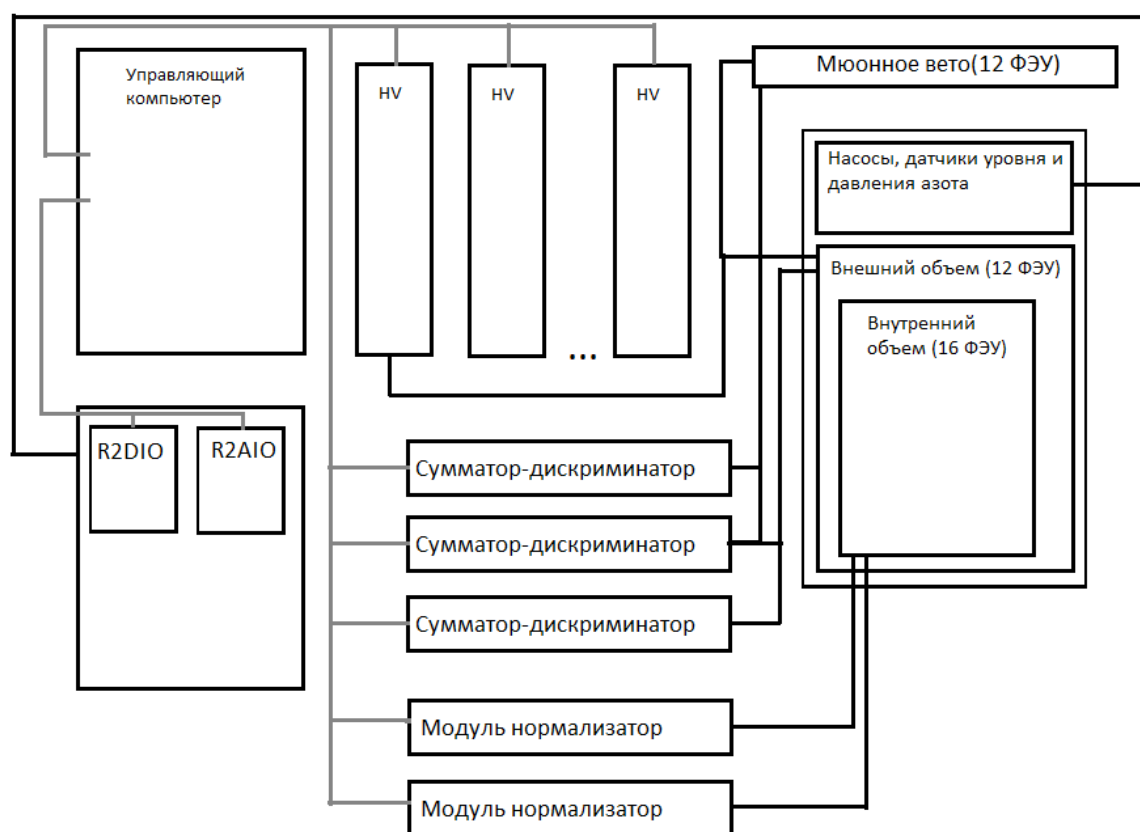


Рис 7 Блок-схема детектора iDREAM

Нейтринные события происходят гораздо реже фоновых, даже в таком

мощном потоке, как излучается атомным реактором, поэтому детектор нуждается в качественной радиационной защите. От нейтронного и гамма фона экранирует пассивная защита, представляющая собой свинцовые и бетонные блоки. Однако есть еще мюоны космических лучей, которые тоже обладают весьма высокой проникающей способностью и создают сильную засветку детектора. Для борьбы с этим видом шумов используется активная защита – мюонное вето. Оно представляет собой вспомогательный детектор, состоящий из тонких акриловых сцинтиллирующих пластин, просматриваемых шестью ФЭУ каждая, закрывающих детектор. Они включены с ним в систему антисовпадений – сигнал, полученный с детектора в момент срабатывания пластины вето, не учитывается.

Всего в детекторе используется сорок ФЭУ. Умножители могут быть подключены одно- и двухканальным способом. В первом случае по одному кабелю подается и постоянное напряжения питания ФЭУ, и снимается сигнал. В таком случае модуль нормализации сигналов, в одном корпусе соединяющий восьмиканальный счетчик и восемь источников постоянного напряжения. Кроме того, в нем находится схема-делитель, изолирующая счетчик от питающего напряжения. Таким образом подключены 16 ФЭУ внутреннего объема. Вторым способом подключены двенадцать ФЭУ внешнего объема – по одному кабелю к ним подается напряжение питания от таких же источников, смонтированных в отдельных корпусах, а по другому передается сигнал на восмиканальные счетчики. Еще 12 ФЭУ задействованы в пластинах мюонного вето, они так же подключены двухканальным способом. Эти устройства – модули-нормализаторы, счетчики и источники питания соединены шиной CAN в одноранговую сеть, по которой они обмениваются данными с компьютером управления через CAN-компьютер, являющийся шлюзом между CAN-шиной и USB-шиной, подключающейся непосредственно к компьютеру. CAN-компьютер CANbus-USB вмонтирован в корпус источников высокого напряжения и модулей нормализаторов сигналов. Кроме того, в

детекторе использованы насос, датчики давления и уровня жидкости, для заполнения чувствительных объемов жидким сцинтиллятором, контроля его уровня и давления азота над ним. Их подключение к компьютеру выполнено через два модуля для ввода/вывода аналоговых и цифровых данных, R2AIO и R2DIO, так же соединенных в CAN-сеть.

Средства первичной обработка сигнала

Модуль-счетчик, он же сумматор-дискриминатор, имеет восемь аналоговых входов и восемь цифровых выходов, принимающих сигнал с ФЭУ, аналоговых выход, выдающий их сумму, восемь цифровых выходов, передающий битовую карту сработки ФЭУ и цифровой выход, сигнализирующий о превышении порога дискриминатора. Событие на самом низком уровне обрабатывается следующим образом. В сцинтилляторе происходит вспышка, какие-то ФЭУ ее видят, и сигнал приходит в блок сумматора-дискриминатора (или нормализатора, по сути, представляющего собой то же самое, с дополнительными устройствами, названными выше). Блок сумматора-дискриминатора хранит для каждого канала пороговое значение, с которым сравнивает полученный сигнал. В случае его превышения фиксируется факт получения. Он записывается в память устройства, и количество этих сигналов (счет) периодически транслируется в CAN-сеть. Кроме того, информация о получении сигналов передается через цифровые выходы. Сигнал со всех восьми входов суммируется, и так же передается через аналоговый выход. Конечно, на практике сигнал с ФЭУ поступает постоянно, так как в его колбе постоянно присутствует некоторый ток, называемый темновым шумом, в следствие автоэмиссии электронов, распадов в самом ФЭУ, снятия возбуждения в остаточных атомах газа и др. Нужно выделить из непрерывного сигнала события регистрации частицы. Это достигается, во-первых регулировкой порога дискриминатора, во-вторых требованием, чтобы сигнал пришел синхронно с нескольких ФЭУ, то есть схемой совпадений. На каждое

событие система отвечает отправкой пакета информации в виде суммарного сигнала, несущего информацию о спектре частицы и битовой карты сработавших ФЭУ, если речь идет о ФЭУ детектора, и в виде одного цифрового импульса, фиксирующего только факт сработки пластины целиком, если речь идет о ФЭУ мюонного вето.

Глава 3 Разработка системы медленного контроля iDREAM

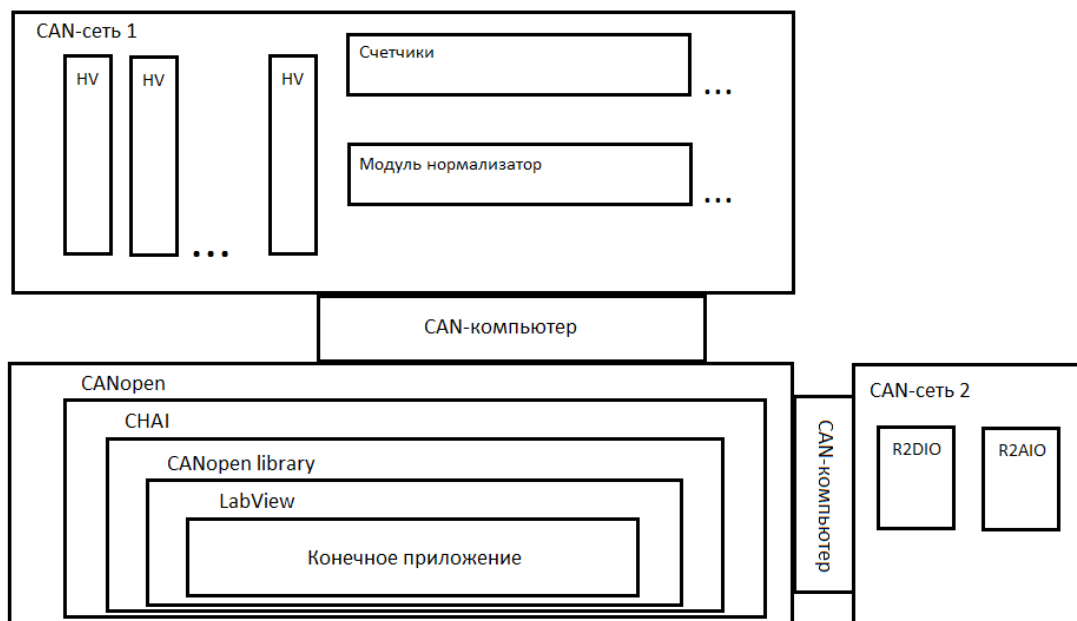


Рис 8 Схема системы медленного контроля iDREAM

Программа, реализующая систему медленного контроля написана в среде разработки LabView на графическом языке G. Как писалось выше, его основными преимуществами, обусловившими его широкое

распространение в автоматизации как физического эксперимента, так и производственных процессов, является его интуитивная понятность и простота. Все CAN-устройства, использованные в детекторе iDREAM, поставляются вместе с драйвером CHAI, осуществляющим соединение на программном уровне компьютера со шлюзом в CAN сеть, и библиотекой, содержащей функции, необходимые для инициализации устройств CAN сети, отправки SDO кадров, настройки и осуществления обмена PDO.

Специфика задачи управления детектором, сводящаяся к загрузке конфигураций систем детектора, сбору с них данных, их визуализации и мониторингу для фиксации выхода за границы штатного режима функционирования предполагает ориентированность программы на обработку событий, источником которых может быть с одной стороны сеть, а с другой – приборная панель, служащая для взаимодействия с пользователем. Обработка событий производится в LabView с помощью специальной структуры «producer-consumer» (не путать с одноименным режимом организации сети устройств). Эта структура, представляющая собой генератор событий, соединенный очередью с циклом их обработчика. такая конструкция, легла в основу всей программы.

Для построения программных абстракций физических частей детектора были созданы кластеры, соответствующие в языке G объектам объектно ориентированных языков, кластер единичного ФЭУ и кластеры, объединяющие отдельные ФЭУ в группу умножителей внутреннего, внешнего объемов и умножителей мюонного вето. Все устройства одной CAN сети содержатся в одном массиве, что делает их количество легко изменяемым, а следовательно, система получается гибкой и масштабируемой. Основным функциям систем медленного контроля – инициализации сети, формированию и загрузке конфигураций и сбору данных отвечают специальные подприборы.

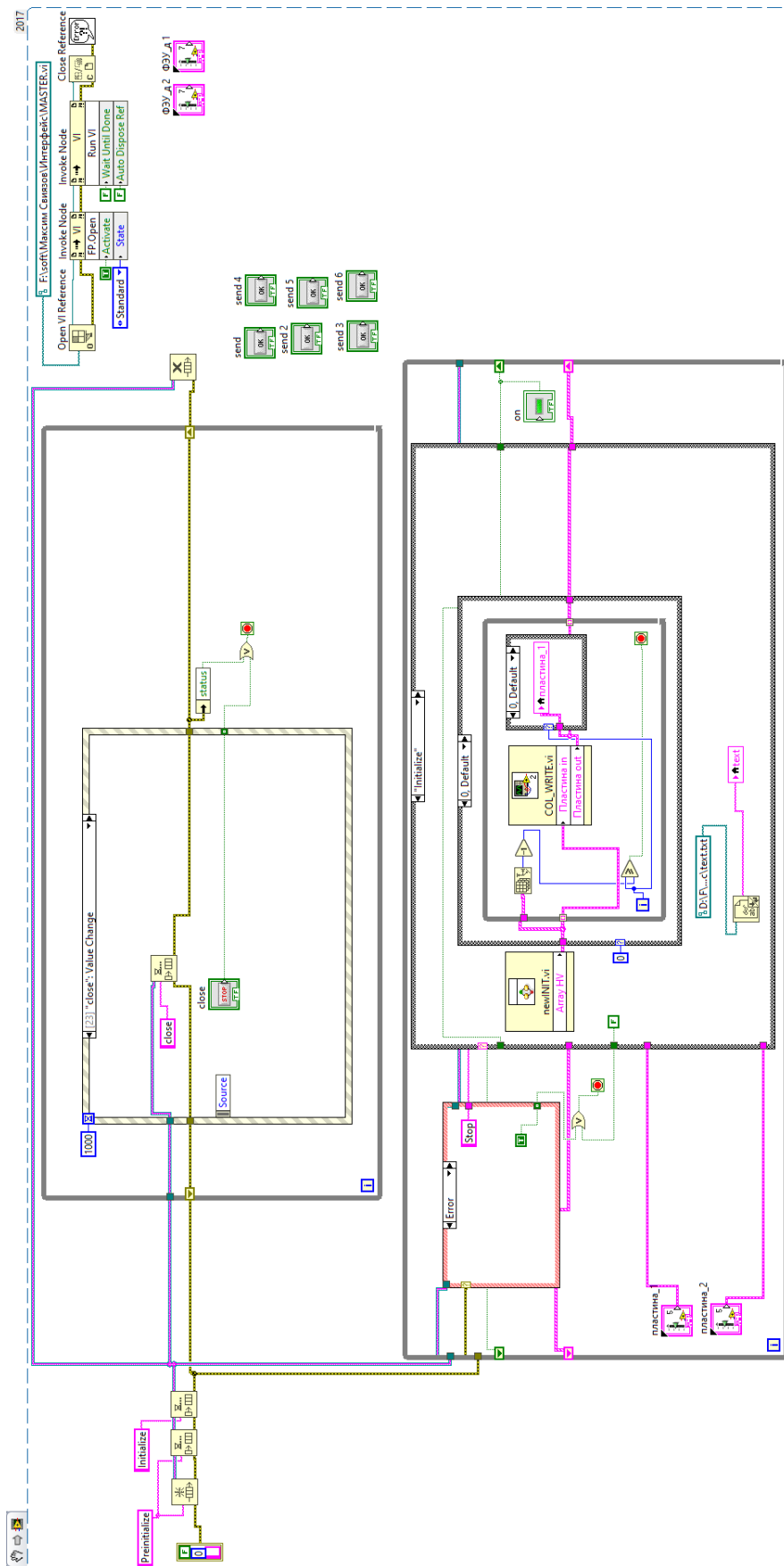


Рис 9 Базовая структура producer-consumer программы SCS

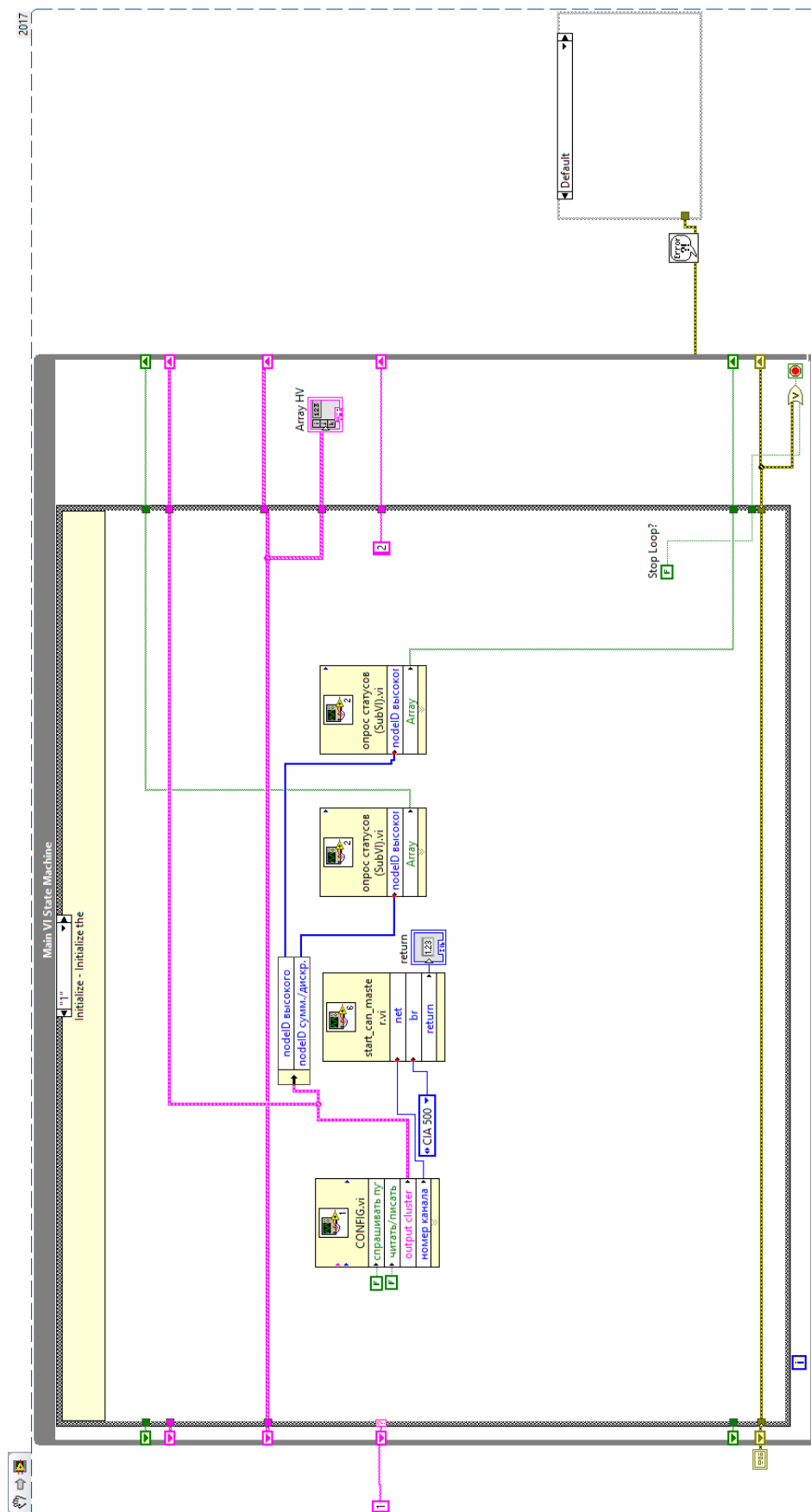


Рис 10 Виртуальный подприбор для инициализации устройств CAN сети блоков высокого напряжения и счетчиков (CAN сеть 1)

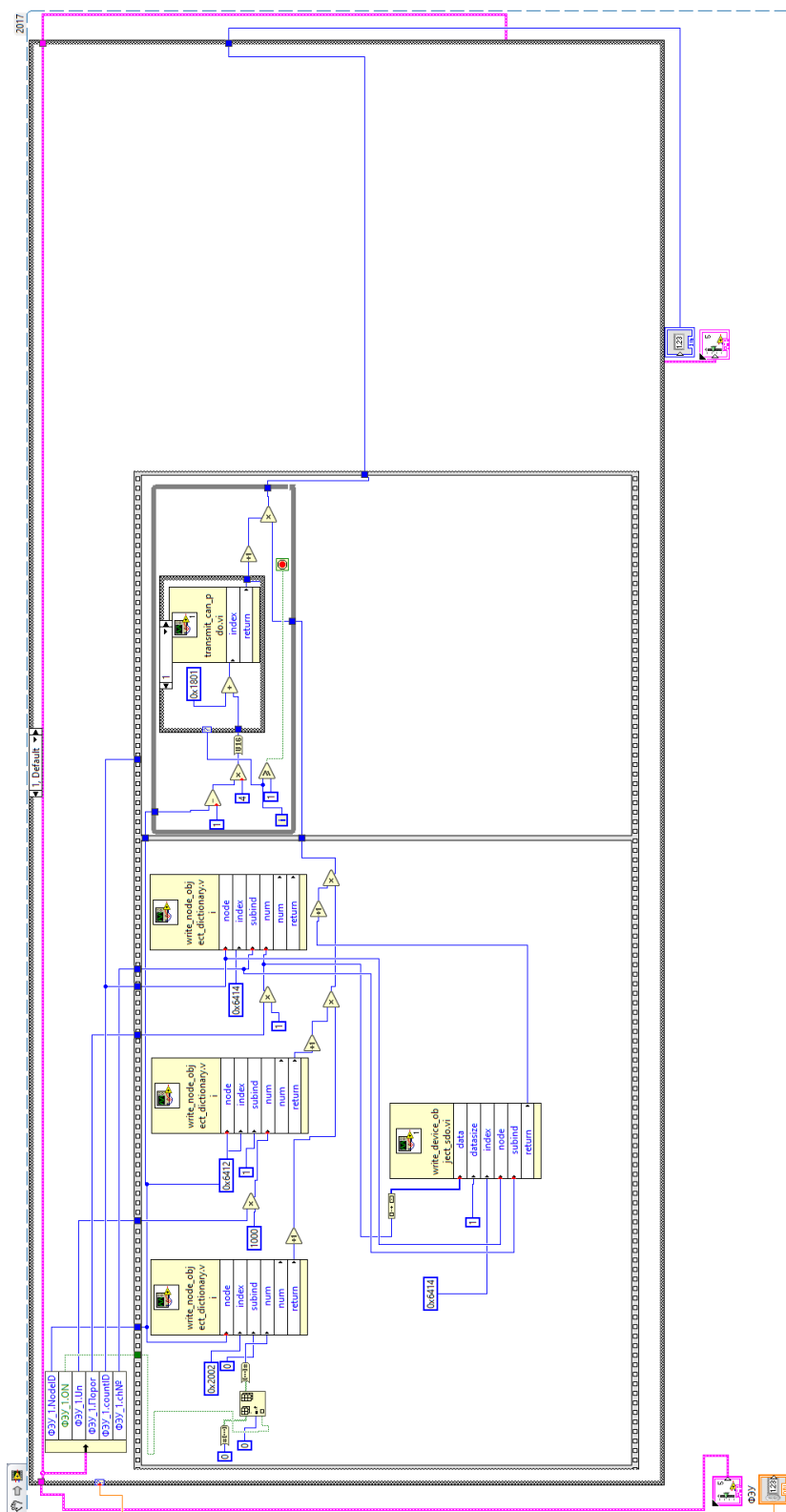


Рис 12 Виртуальный подбор для записи конфигураций SCS

Графический интерфейс

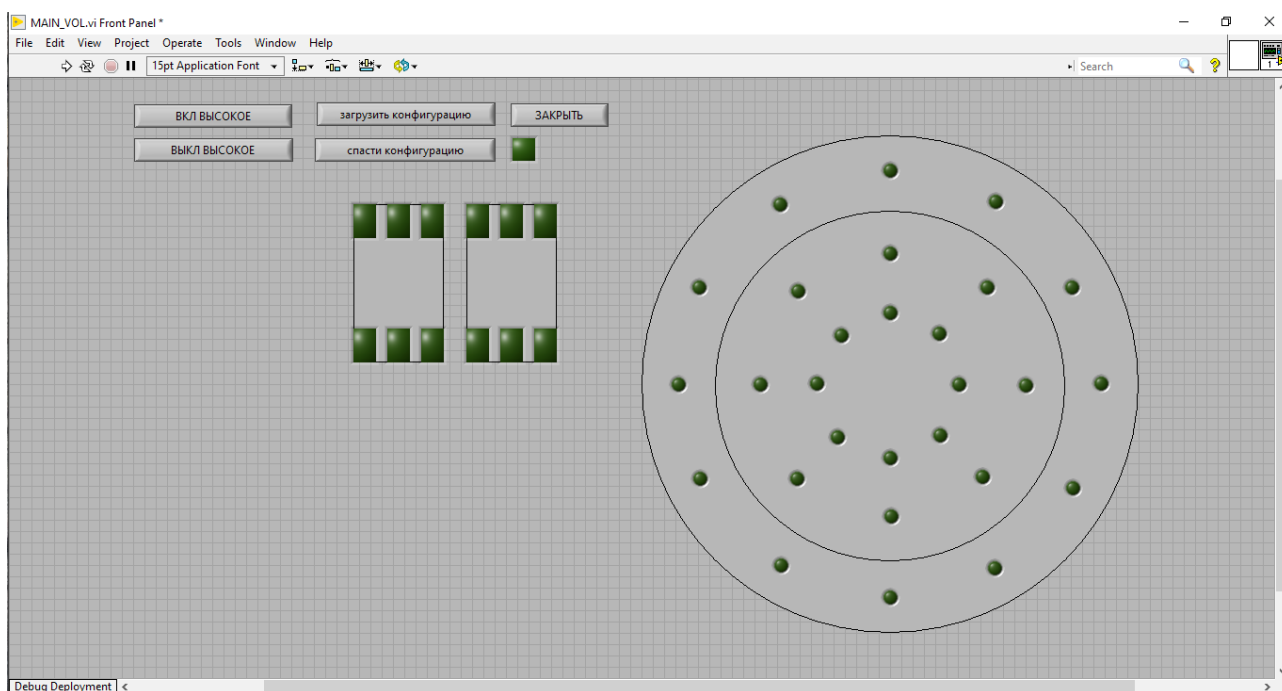


Рис 13 Вид приборной панели ВП, контролирующего сеть источников высокого напряжения и счетчиков

Приборная панель виртуального прибора, отвечающего за счетчики и блоки питания высокого напряжения, схематично изображает фотоэлектронные умножители детектора в виде светодиодов, отражающих статус прибора. По клику мышкой становится видимым поля данных кластера, отображающие текущие счет и напряжение на умножителе. Повторный клик отображает дополнительные поля, содержащие информацию о пороге дискриминатора, токе через умножитель и температуре в блоке питания. Кроме того, выводятся поля, поддерживающие ввод данных, такие как поле задания напряжения и адресов узлов. Это позволяет упростить правку конфигурационных файлов, которые могут создаваться как в ручную,

так и простым сохранением выставленной конфигурации устройств. Включение умножителей может производиться и вручную, по отдельности.

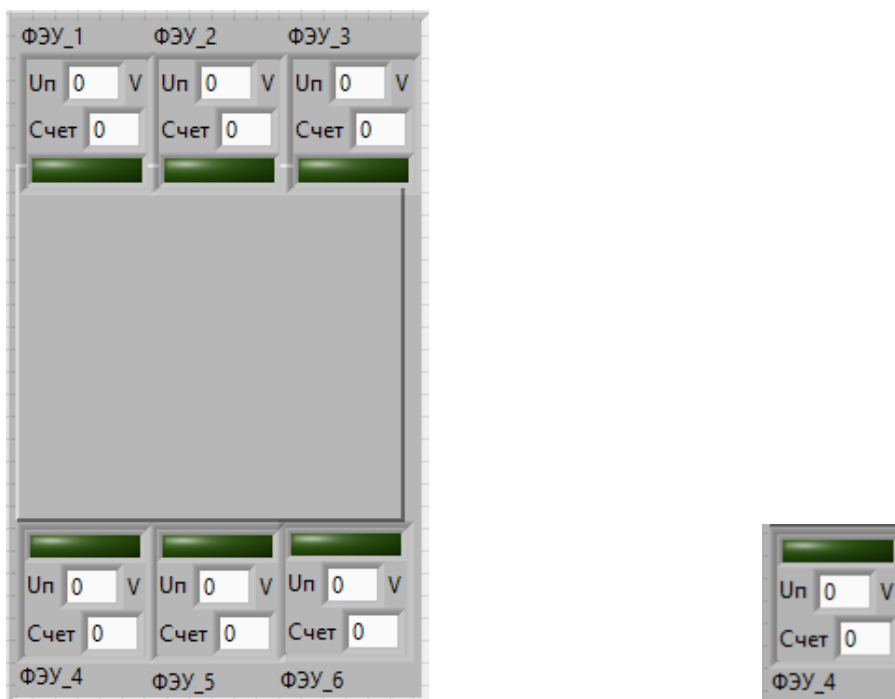


Рис 14 Кластеры ФЭУ и пластины мюонного вето

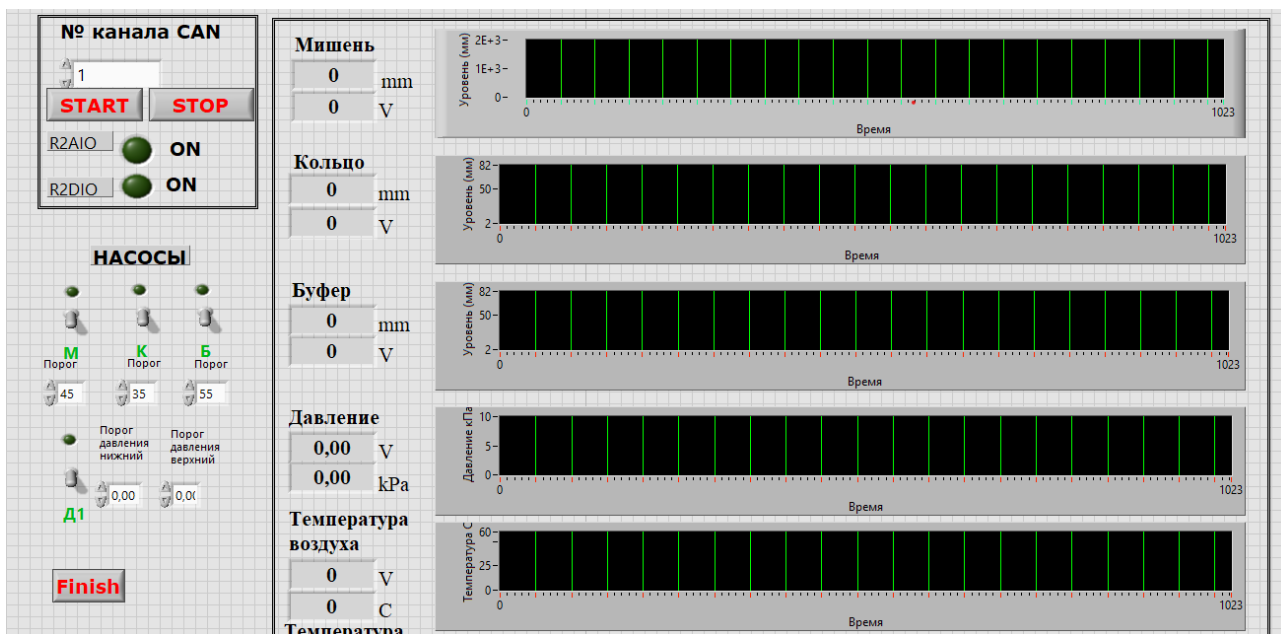


Рис 15 Вид приборной панели ВП, контролирующего сеть насосов, датчиков давления и уровней

Данные счета, напряжения тока и температуры обновляются с частотой раз в секунду, с такой же частотой происходит их сохранение в файл с логом.

Второй виртуальный прибор контролирует сеть датчиков уровней стинтиллятора, температуры, давления и управляет насосами. Данные визуализируются в виде графиков.

Заключение

Выбранные средства позволили реализовать приложения, с помощью которых можно производить запуск, настройку и остановку детектора, применять, создавать и редактировать конфигурации, запускать модули вместе (для штатной работы) и по отдельности, что необходимо, когда детектор строится, проходит настройку и испытания.

Создана система медленного контроля промышленного детектора ректорных антинейтрино iDREAM, которая позволит внедрить в производство стабильный надежный в эксплуатации прибор, способный производить мониторинг состояния ядерного реактора

Библиография

- [1]Чепурнов А.С., Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов — история и текущее состояние вопроса.
- [2] E. Aprile и другие по алфавиту, The distributed Slow Control System of the XENON100 Experiment, Astropart. Phys. (2012)
- [3]J. H. Choi и другие по алфавиту, Slow Control Systems of the Reactor Experiment for Neutrino Oscillation, arXiv:1307.0908(2015)
- [4] A. Bellerive Review of solar neutrino experiments // Int. J. Mod. Phys. 2004. A19. P. 1167-1179.
- [5]Орехов Д.И. Исследование спектра и интенсивности темновых шумов ФЭУ детектора Борексино
- [6]<http://www.ni.com/labview/>
- [7] <https://can-cia.org/>