

УДК 681.5.08, 681.518.3, 681.518.5

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ПИТАНИЕМ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Д. Н. Скоробогатов, М. Н. Кондауров, В. Р. Козак

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

*E-mail: D.N.Skorobogatov@inp.nsk.su*

Приведено описание системы управления набором прецизионных высоковольтных источников питания, находящихся под разными потенциалами, реализованной для установки электронного охлаждения. Рассматриваются вопросы выбора архитектуры, надёжности при работе под высоким потенциалом в условиях помех и высоковольтных разрядов. Анализируются структура построения, аппаратные и программные средства, использованные в этой системе.

*Ключевые слова:* беспроводная система управления, установка электронного охлаждения, контроллеры, стандарт ZigBee.

**Введение.** Одним из направлений деятельности Института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН является создание установок электронного охлаждения [1, 2] (среди физиков обычно именуемых кулерами). Электронное охлаждение применяется для снижения эффективной температуры пучка тяжёлых частиц (ионов или протонов). Снижение температуры происходит за счёт обмена энергиями этих частиц с пучком относительно холодных электронов в специальном прямолинейном участке вакуумной камеры ускорителя. Одной из недавно изготовленных Институтом установок такого типа является кулер для ускорителя COSY (Forschungszentrum Juelich, Германия) [3]. Существенная особенность этой установки — достаточно большое максимальное напряжение (2 МВ) на ускорительной колонне. Для системы электронного охлаждения требуется поддержание напряжения на ускорительной колонне со стабильностью  $10^{-5}$  и возможностью регулирования в широких пределах. В ранее созданных в ИЯФ СО РАН кулерах использовались различные способы получения высокого напряжения, такие как высоковольтный умножитель для энергий до 100 кэВ, динамитрон для энергии 300 кэВ [4]. Эти схемы имеют ряд недостатков, что ограничивает их применение для напряжений более 1 миллиона вольт. Так как требования к точности и стабильности энергии довольно высоки, питание ускорительной колонны сделано из включённых последовательно прецизионных регулируемых источников питания с относительно небольшим напряжением — 60 кВ. Кроме высокого напряжения система питания должна обеспечивать ток в соленоидах, поддерживающих магнитное поле сопровождения пучка. Суммарно колонна состоит из 33 секций [3], каждая секция представляет собой регулируемый высоковольтный источник напряжения для ускорительной колонны и источник тока для поддержания магнитного поля сопровождения пучка. Общий вид колонны изображён на рис. 1, *a*. Конструктивно электроника секции состоит из четырёх регулируемых преобразователей и управляющего контроллера. Внешний вид электроники секции показан на рис. 1, *b*. Питание секциям подаётся от высокочастотного каскадного трансформатора, имеющего обмотки отбора мощности. Секции работают

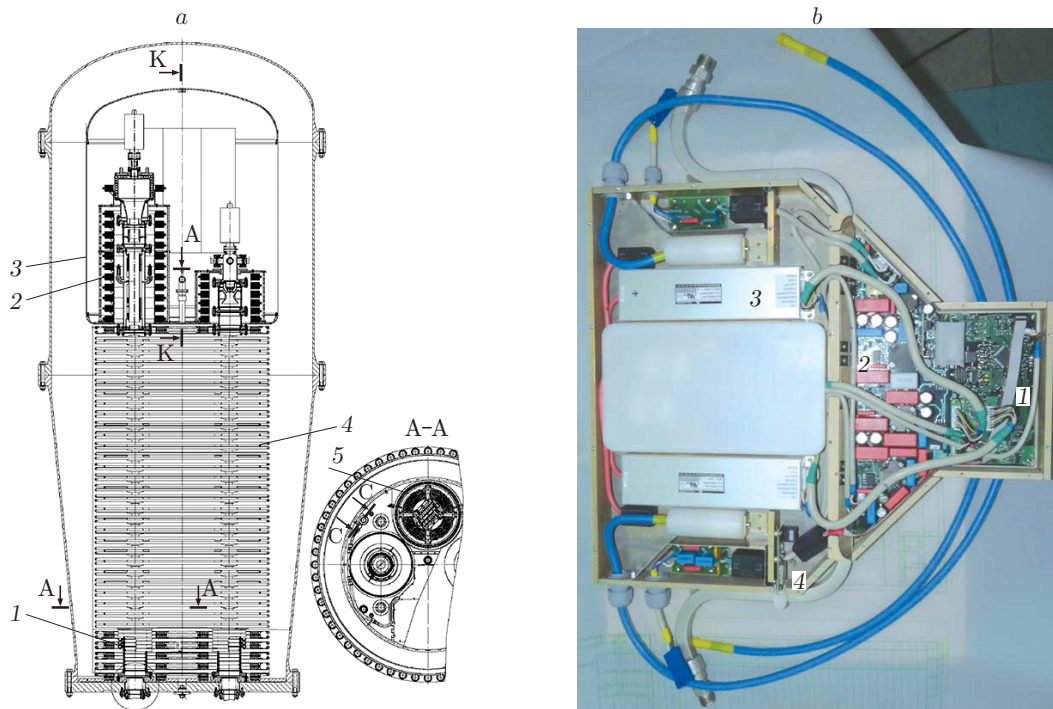


Рис. 1. Элементы высоковольтной колонны: *a* — колонна (1 — ускорительная трубка, 2 — соленоид, 3 — высоковольтный терминал, 4 — ускорительная секция, 5 — каскадный трансформатор); *b* — электронный блок секции с открытой верхней панелью (1 — плата контроллера, 2 — плата преобразователей, 3 — высоковольтный преобразователь, 4 — приёмопередающий модуль)

в составе системы, включены во внешнюю цепь обратной связи, имеют набор задаваемых извне параметров и набор считываемых значений для контроля. Для работы с такой распределённой системой питания требовалось спроектировать систему управления.

**Постановка задачи.** Назначением системы управления подобным устройством является обеспечение управления и контроля всей установкой, при этом должна быть возможность расширенного доступа к каждой структурной единице (секции) в отдельности в процессе наладки и настройки. Ограничение на выбор физической реализации системы управления накладывает то, что в высоковольтной колонне несколько десятков секций находятся под разными потенциалами, достигающими 2 МВ. Кроме всего прочего необходимо учесть наличие сильного магнитного поля в 500 Гс вблизи управляемых устройств. Система должна иметь гальваническую развязку и сохранять работоспособность в условиях сильных электромагнитных помех. Электрические разряды не должны приводить к выходу из строя элементов системы, а время на восстановление после пробоев должно быть минимальным. Для повышения надёжности установки необходимо сохранить контроль над установкой в случае выхода из строя одной или нескольких секций в составе колонны. Существенным критерием является простота реализации системы управления и её монтажа на установке. Важно отметить такую особенность создаваемой установки, как высокое давление рабочей среды — секции работают в среде SF<sub>6</sub> (элегаз) под давлением до 8 атм. Это дополнительно увеличивает требования к надёжности системы, так как в случае аварии демонтаж установки для доступа к высоковольтной колонне дорогостоящий и затратный по времени. Скорость передачи информации может быть невелика, необ-

ходимо передавать опорные напряжения для преобразователей, осуществлять аварийное выключение и отслеживать состояние секций, по оценкам трафик не должен превышать 10–20 Кбод.

Итак, при выборе аппаратной реализации системы управления учитывались следующие критерии:

- работа под потенциалами до 2 МВ;
- возможность работы с несколькими десятками устройств под разными потенциалами;
- устойчивость к электромагнитным помехам;
- высокая надёжность системы;
- простота реализации аппаратной части системы и программного обеспечения;
- требования к скорости: возможность опроса всех секций с периодом 10–30 с, наличие широкоэмиттерных запросов для одновременного включения/выключения всех секций.

**Возможные варианты решения задачи.** Наиболее часто для обеспечения связи на высоковольтных установках применяются оптоволоконные линии. Преимущества очевидны: дешевизна, доступность, высокая скорость передачи данных, устойчивость к электромагнитным помехам. В нашем случае были предложены два способа реализации системы связи на оптоволоконных линиях: параллельный и последовательный. Рассмотрим первый способ. Для этой системы необходимы 33 комплекта приёмопередатчиков под потенциалом земли и 33 пары оптоволокна, размещённые по колонне, по одной паре к каждой высоковольтной секции. Следует учесть, что величина высоковольтного зазора между секциями 20 мм при напряжении 60 кВ. При такой большой напряжённости электрического поля велика вероятность пробоя по поверхности оптоволокна, поэтому необходимо искусственно удлинять линию, укладывая оптоволокно, например, по спирали. Всё это приводит к тому, что реализовать данную систему на практике довольно сложно, наличие большого количества разъёмных соединений скажется на надёжности системы.

Во втором способе реализации нужно последовательно соединить секции между собой оптоволоконном. Длина линий связи уменьшается существенно. Однако в случае выхода из строя одной из нижних секций колонны пропадает связь со всеми верхними секциями, что крайне нежелательно.

Рассмотрен вариант с применением безволоконных инфракрасных приёмопередатчиков. По сравнению с оптоволоконными линиями преимущества очевидны: нет необходимости прокладывать оптоволокно по высоковольтной колонне, что существенно упрощает монтаж системы связи на установке. Но такой способ тоже не лишён недостатков — требуется обеспечить нахождение приёмника и передатчика в пределах прямой видимости или в условиях надёжного прохождения отражённого сигнала. Для высоковольтной колонны, находящейся в резервуаре под давлением, это потребует размещения приёмопередатчиков в местах, подверженных действию электрических разрядов при высоковольтных пробоях, что, в свою очередь, скажется не лучшим образом на надёжности системы. Может потребоваться дополнительная громоздкая защита, усложняющая реализацию.

Следующий рассмотренный вариант — беспроводная линия связи по радиоканалу. Самые распространённые примеры — Wi-Fi, Bluetooth. Стандарт Bluetooth больше всего подходит для организации линии связи точка—точка или небольших сетей до семи устройств, а Wi-Fi требует применения относительно дорогостоящего оборудования и достаточно больших затрат на реализацию программной части системы связи. Нами был выбран стандарт ZigBee, на первый взгляд не предназначенный для этих целей. Изначально он разрабатывался для систем типа «умный дом». Но при ближайшем рассмотрении он очень хорошо подошёл для организации распределённой системы связи в разработанной

установке. Отметим преимущества этого стандарта применительно к рассматриваемому случаю:

- беспроводной канал связи, простота монтажа на установке;
- частота радиоканала 2,4 ГГц, что обуславливает хорошую помехозащищённость системы;
- самоорганизующаяся сеть, что также упрощает работу с системой (допустимое количество узлов в сети исчисляется сотнями);
- дешевизна и доступность готовых решений на рынке;
- малый размер модулей, доступность модулей со встроенной антенной;
- достаточно простой модемный протокол, упрощающий разработку программного обеспечения как для управляющей машины, так и для микроконтроллеров в оконечных устройствах;
- каждый модуль может выполнять функции ретранслятора, таким образом организуя доступ к элементам, не имеющим прямой видимости с управляющим узлом.

Единственным существенным недостатком этого стандарта является сравнительно невысокая скорость передачи данных, предусмотренная максимальная скорость 250 Кбод. Но в нашей системе требуемый трафик невелик и скорость передачи данных имеет менее важное значение по отношению к остальным критериям выбора.

Необходимо упомянуть такую характеристику модулей, как дальность связи. Стандарт ZigBee опирается на стандарт IEEE 802.15.4, который в диапазоне 2,4 ГГц обеспечивает дальность действия около 30 м в пределах прямой видимости. В нашем случае прямая видимость между модулями практически отсутствует, но максимальное расстояние от приёмника до передатчика не более 3 м. Проведённые предварительные испытания модулей с использованием закрытых стальных сосудов показали, что в подобных металлических конструкциях стандарт ZigBee обеспечивает уверенную связь.

**Предложенное решение.** Из многообразия модулей стандарта ZigBee были выбраны модули, производимые компанией "Telegesis" [5]. Выбор обусловлен тем, что эта компания достаточно давно на рынке и выпускает линейку модулей для разных условий эксплуатации. Кроме модулей оконечных устройств компания производит большое количество готовых модулей для подключения к ПК по стандартным интерфейсам, таким как USB, и выпускает специальные стартовые наборы, что существенно ускоряет и упрощает разработку и отладку оборудования. В оконечных устройствах были применены модули со встроенной антенной. Связь между управляющим ПК и приёмопередатчиком осуществляется через гальванически развязанный интерфейс RS-485.

Внешний вид высоковольтной секции с открытой крышкой показан на рис. 2, *a*. Место установки приёмопередатчика обозначено стрелкой. Приёмопередающий модуль приведён на рис. 2, *b*. Так как необходимо обеспечить связь с внутренним пространством закрытого металлического сосуда под давлением, приёмопередатчик управляющего узла размещён в конструктивной нише на фланце сосуда высокого давления под защитным экраном, что исключает влияние электрических пробоев. На этом же фланце размещён герметичный разъём для ввода линии связи в сосуд по интерфейсу RS-485. Суммарно система связи объединяет в сеть 43 оконечных устройства и один управляющий узел. Кроме 33 ускорительных секций в сеть включены десять источников питания, обеспечивающих магнитное поле в элементах высоковольтного терминала установки, также находящегося под потенциалом до 2 МВ. Для работы с сетью на основе беспроводных модулей в системе управления имеется комплект программного обеспечения. Комплект состоит из серверной части, работающей на головном ПК, и микропрограммы в управляющем контроллере каждой секции. Микропрограмма осуществляет управление преобразователями,

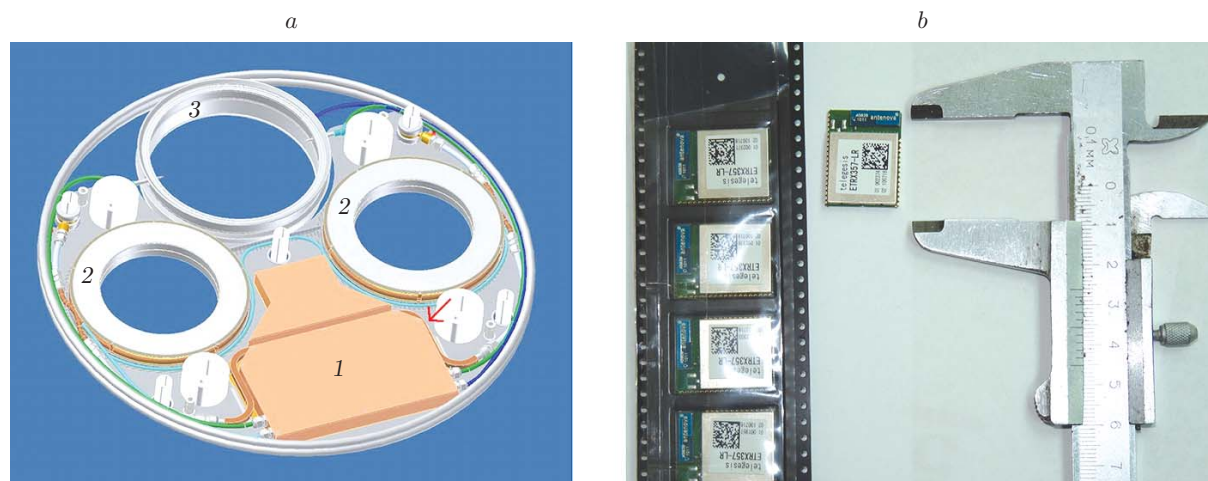


Рис. 2. Элементы секции колонны: *a* — высоковольтная секция с открытой верхней панелью (1 — блок электроники, 2 — соленоиды, 3 — место размещения каскадного трансформатора); *b* — приёмопередающий модуль

отслеживание параметров секции в реальном времени, обработку цепей обратных связей преобразователей.

Контроллер имеет десять каналов АЦП (из них два 24-разрядные, остальные 12-разрядные), четыре выхода 10-разрядного ЦАП на основе широтно-импульсной модуляции и один выход 18-разрядного прецизионного ЦАП. Прецизионный 18-разрядный ЦАП выдаёт опорное напряжение для двух высоковольтных преобразователей, обеспечивающих регулируемое напряжение от 0 до 60 кВ с погрешностью  $10^{-5}$ . Для обратной связи использованы два канала 24-разрядного АЦП, по одному каналу на высоковольтный преобразователь. Остальные 12-разрядные АЦП и 10-разрядные ЦАП на основе широтно-импульсной модуляции осуществляют обратную связь предварительного стабилизатора напряжения, источника тока соленоидов и стабилизатора напряжения 24 В, необходимого для питания высоковольтных преобразователей. Точность этих преобразователей составляет  $10^{-3}$ . Кроме регулируемых напряжений и токов отслеживаются такие параметры, как температура корпуса секции, входное питающее напряжение, температура соленоидов секции. Серверная часть включает в себя сервер, организующий сеть и опрашивающий оконечные устройства, интерфейсную программу для работы с колонной, а также программу, позволяющую работать с одной секцией в расширенном режиме, менять настройки и производить отладку отдельного оконечного устройства. Общий вид интерфейсной программы для работы с колонной приведён на рис. 3. В верхней части интерфейса выведена гистограмма, показывающая распределение высокого напряжения по секциям в киловольтах. Первые десять секций не имеют высокого напряжения и используются только для поддержания магнитного поля. Вверху слева в окошке дано суммарное значение ускоряющего напряжения, для изображённого момента времени оно составляет 1000,002 кВ при выставленном значении 1000 кВ. Средняя гистограмма отражает распределение токов утечки высокого напряжения по высоковольтным источникам в миллиамперах. Нижняя гистограмма показывает распределение токов в соленоидах магнитной системы в амперах. Имеется возможность вывести гистограммы с распределением и других измеряемых величин в модулях, таких как напряжения или температуры в соленоидах. Слева приведены опорные величины напряжений и токов и дополнительные: напряжение и ток магниторазрядных насосов в высоковольтном терминале, время опроса секций, максимальная температура в соленоидах.

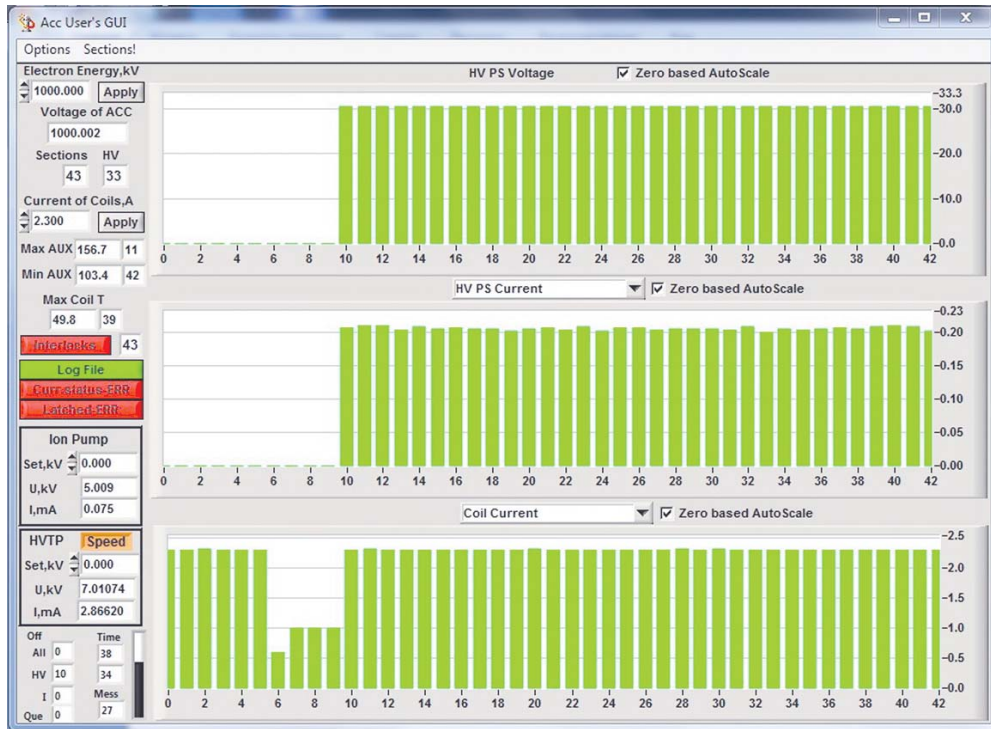


Рис. 3. Интерфейсная программа для работы с колонной

Программно-аппаратный комплекс обеспечивает управление системой питания ускорительной колонны, общее число управляемых устройств 43 (33 из которых находятся в ускорительной колонне и десять под потенциалом высоковольтного электрода). Период опроса всех устройств в цикле со сбором данных занимает около 30 с, при этом имеются быстрые запросы (например, установка высокого напряжения), время обработки которых порядка 5 с. В случае высоковольтных пробоев перебои в связи составляют доли секунды. Если не возникает перебоа в питании, то времени на восстановление после разряда не требуется.

**Заключение.** В данной работе приведён пример реализации системы управления большим количеством устройств, находящихся под разными потенциалами в высоковольтной установке. Сформулированы требования к системе управления, рассмотрены сложности и особенности создания такой системы, предложен вариант решения поставленной задачи. Описанная система управления реализована на изготовленной в ИЯФ СО РАН установке электронного охлаждения, отлажена и испытана в рабочих условиях. Система устойчива к многократным высоковольтным пробоям и обеспечивает необходимые скорость и надёжность передачи данных. В процессе наладки были получены требуемые параметры ускоряющего напряжения, стабильность составляет  $10^{-5}$ . Остальные величины регулируются с точностью  $10^{-3}$ . Опыт реализации системы связи показал правильность принятых решений и позволяет рекомендовать использование беспроводных модулей стандарта ZigBee для организации связи в высоковольтных установках при небольшом трафике. В настоящее время установка эксплуатируется в ускорительном центре COSY.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. 170, вып. 5. С. 473–493.

2. Будкер Г. И., Скринский А. Н. Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц // УФН. 1978. **124**, вып. 4. С. 561–595.
3. Reva V., Alinovsky N., Batrakov A. M. et al. The first commission results of the high voltage magnetized cooler for COSY // Proc. of COOL'11. Alushta, Ukraine. THIOA02. P. 37–42.
4. Behtenev E., Vocharov V., Bublely V. et al. Commission of electron cooler EC-300 for HIRFL-CSR // Proc. of EPAC 2004. Lucerne, Switzerland. P. 1419–1421.
5. **ETRX357** ZigBee module // Telegesis Ltd. URL: [http://www.telegesis.com/downloads/general/ETRX35x\\_Product\\_Brief.pdf](http://www.telegesis.com/downloads/general/ETRX35x_Product_Brief.pdf) (дата обращения: 23.09.2013).

*Поступила в редакцию 23 сентября 2013 г.*

---