*ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 4–9*

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*УДК 621.3.038.616, 621.384.668*

# ВСТРАИВАЕМЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СКИФ

**© 2025 г. Д. А. Липовый[a, b, *], Д. В. Сеньков[a], П. Б. Чеблаков[a], А. В. Герасев[a, b], С. Е. Карнаев[a, b]**

[a] *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

[b] *Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, просп. Никольский, 1*

** e-mail: D.A.Lipovyy@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 10.12.2024 г.
После доработки 06.03.2025 г.
Принята к публикации 24.03.2025 г.

В синхротронах и накопителях заряженных частиц используется большое число устройств, обеспечивающих непрерывную циркуляцию пучков частиц по замкнутой траектории в вакуумной камере установки: это источники питания магнитной системы и генераторы высокой частоты. От источников питания магнитной системы требуется высокая точность и стабильность отработки заданных параметров (выходного тока или напряжения). Помимо этого, в случае управления состоянием установки с циркулирующими пучками (например, ускорение пучка в синхротроне) требуется также взаимная синхронизация отработки заданий всеми источниками питания. В настоящей работе представлено описание встраиваемого контроллера с аналоговым интерфейсом к управляемому устройству, обеспечивающего точность управления 100 ppm относительно полного диапазона отработки устройства и имеющего возможность синхронизации отработки по внешним тактовым импульсам, следующим с частотой до 10 кГц. Приведены примеры использования контроллера для управления различными устройствами и системами.

**DOI:** 10.31857/S0032816225030018

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительно-накопительный комплекс Центра коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" (СКИФ) состоит из инжектора электронного пучка, включающего линейный ускоритель (линак), рассчитанный на энергию 200 МэВ, бустерный синхротрон (бустер), ускоряющий частицы от 200 МэВ до 3 ГэВ, и каналы транспортировки пучка из линака в бустер и из бустера в накопитель, а также накопителя, рассчитанного на энергию электронов 3 ГэВ, на котором размещаются устройства для генерации синхротронного излучения (СИ).

Всего в составе ускорительно-накопительного комплекса насчитывается около 2500 управляемых источников питания элементов магнитных систем, для разных типов которых требуется точность и стабильность отработки выходного тока, питающего магниты, в диапазоне от 1000 ppm до нескольких единиц ppm. К управлению источниками питания предъявляется много требований. Помимо необходимой точности, стабильности и воспроизводимости управления, должны быть обеспечены:

– синхронный мониторинг всех параметров источника питания [1], позволяющий непрерывно контролировать правильность одновременной работы множества устройств комплекса;

– синхронизация отработки задания, заранее записанного в память контроллера, позволяющая синхронно управлять перестройкой элементов магнитной системы;

– минимизация потока данных между контроллером и компьютерами системы управления;

– простая интеграция контроллера с программным обеспечением системы управления;

– возможность гибкой адаптации под новые задачи управления.

В связи с наличием недорогих малогабаритных систем на модуле (system on module, SoM), имеющих мощные процессоры (на которых может полноценно работать операционная система Linux), интерфейс Ethernet для подключения к сети системы управления, а также набор различных цифровых интерфейсов для подключения электронных компонентов, было принято решение на базе такого модуля разработать процессорно-интерфейсную плату (модуль) (ПИМ) [2], с помощью которой реализовать функции, удовлетворяющие перечисленным требованиям.

Для контроллеров, применяемых на СКИФ, была выбрана система на модуле, которая включает в себя процессор, состоящий из ядер различной архитектуры (четыре ядра общего назначения и ядро реального времени) и включающий различные периферийные устройства, в том числе порт Ethernet 1 Гб/с и энергонезависимую память. Более подробно структура SoM описана в работе [2].

Поскольку SoM, а также сетевое оборудование, использующееся для подключения контроллеров к сети системы управления, относительно недороги, было принято решение разработать встраиваемый универсальный интерфейсный модуль с целью применения его индивидуально для каждого отдельного устройства, т.е. было решено не использовать многоканальные контроллеры, одновременно управляющие многими устройствами [3]. Такой подход радикально упрощает встроенное программное обеспечение (ПО), конфигурирование и интеграцию контроллеров в систему управления. Поскольку в модуле есть мощный универсальный процессор, в контроллере можно реализовать множество полезных онлайн-обработок измеренных сигналов для улучшения контроля управляемого устройства: различные усреднения и выборки, фурье-анализ и т.п.

Модуль ПИМ является универсальным интерфейсом между системой управления и частью контроллера, непосредственно взаимодействующей с силовой частью источника питания. Связь между ПИМ и силовой частью контроллера осуществляется через интерфейс SPI.

В нашей работе рассматривается одна из реализаций встраиваемого контроллера источников питания Module Power Supply Controller (MPSC). Контроллер предназначен для работы с источниками питания (или другими устройствами), для управления которыми требуется подача на их вход сигнала напряжения. На СКИФ от источников питания такого типа требуется стабильность отработки задания в пределах от 100 до 1000 ppm относительно полного размаха регулировки. Предполагается использовать несколько типов источников питания с таким управлением для элементов магнитных структур линака, бустера, каналов транспортировки пучка, а также для секступольных магнитов накопителя. Суммарное число таких контроллеров, применяемых на комплексе, более 400.

## 2. КОМПОНОВКА И РАЗМЕЩЕНИЕ КОНТРОЛЛЕРА

Контроллер выполнен в формате 3U (133.4 мм) шириной 4 HP (20.3 мм) и глубиной 160 мм. Внешний вид контроллера представлен на рис. 1.

Контроллер состоит из трех основных конструктивных элементов:

– основной аналоговой платы;

– модуля ПИМ на основной плате в виде мезонина;

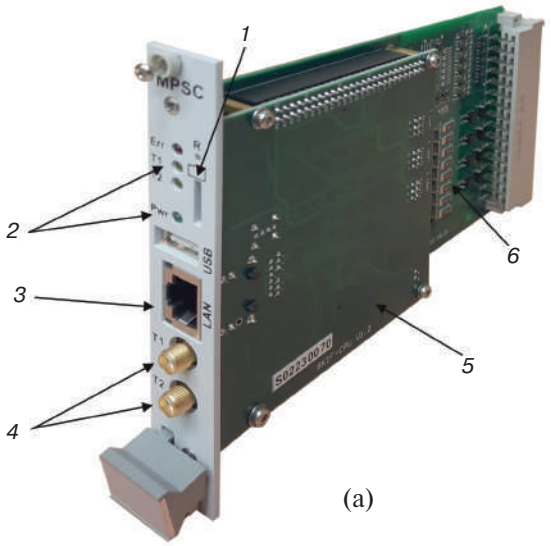
– процессорного модуля SoM на плате ПИМ.

Основная плата реализует функции аналогового и цифрового ввода/вывода: через разъем DIN 41612, расположенный в задней части платы, она подключается к электронике источника питания. Модуль ПИМ содержит разъемы внешних цифровых интерфейсов и обеспечивает стыковку сигналов между SoM и основной платой.

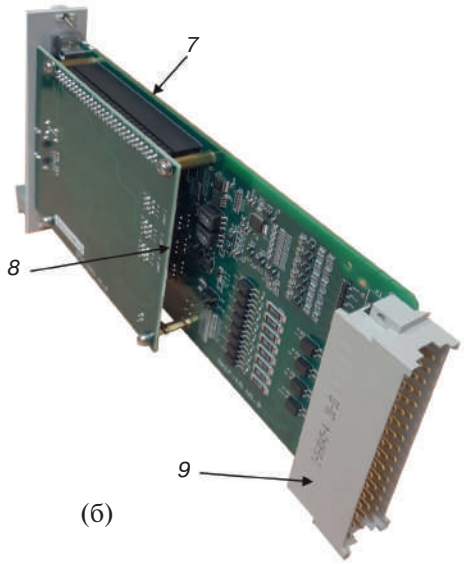
Цифровые интерфейсы, слот мкSD и индикация размещаются на передней панели, которая закреплена на основной плате. Входы синхронизации, расположенные спереди, соединены с контактами на заднем разъеме, что позволяет подавать запуски и через задний разъем, а также выводить их в случае надобности на заднюю стыковочную плату.

Пример размещения контроллера в корпусе источника питания приведен на рис. 2.

Для управления источниками питания малой мощности, компактно размещенными в одной корзине, вставляемой в стандартную радиостойку размером 19 дюймов, разработана




(а)




(б)

**Рис. 1.** Встраиваемый контроллер MPSC: **а** – вид спереди; **б** – вид сзади. *1* – слот для мкSD-карты, *2* – индикация работы, *3* – LAN-порт, *4* – входы синхронизации, *5* – плата ПИМ, *6* – аналоговая плата, *7* – разъем для подключения ПИМ, *8* – три порта UART, *9* – разъем для подключения к устройству.

**Рис. 2.** Пример размещения контроллера в корпусе источника питания.

соответствующая корзина управления, в которую можно установить до 16 контроллеров. Импульсы синхронизации вводятся через один из входов любого контроллера и через задний разъем распространяются на все контроллеры, вставленные в корзину. Пример компоновки корзины с контроллерами для управления шестнадцатью источниками питания, размещенными в двух корзинах, показан на рис. 3.

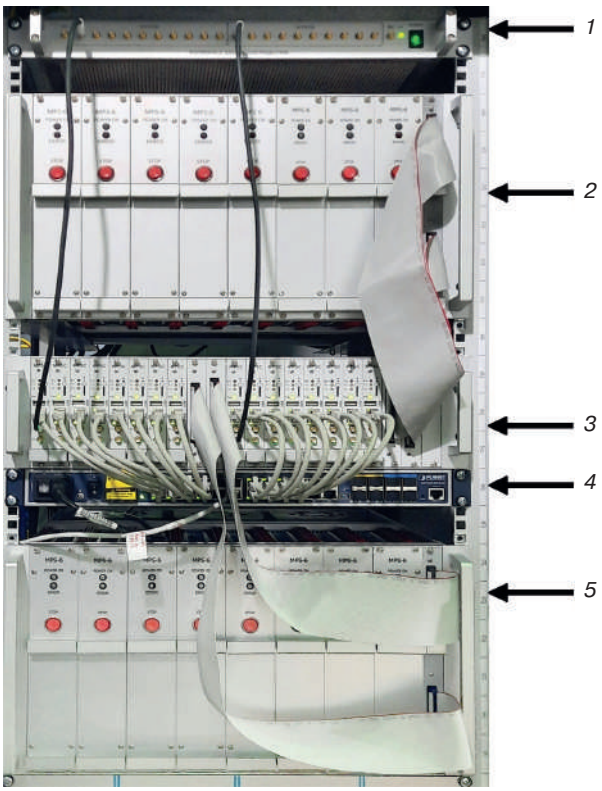



**Рис. 3.** Размещение контроллеров в специальной корзине: *1* – размножитель синхроимпульсов, *2* – корзина с источниками питания MPS-6, *3* – корзина с контроллерами, *4* – коммутатор для подключения контроллеров, *5* – корзина с источниками питания MPS-6.

## 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЛЕРА

Спецификации на модуль ПИМ представлены в работе [2]. Основная аналоговая плата контроллера, на которую устанавливается ПИМ, состоит из нескольких подсистем.

### *3.1. Подсистема ввода аналогового сигнала*

В контроллере имеется шесть одинаковых каналов ввода аналогового сигнала, оцифровываемого с помощью дельта-сигма-АЦП ADS131M06IPBS (аналого-цифровой преоб-

разователь), имеющего следующие основные характеристики:

– диапазон измеряемого напряжения от –10 000 до +10 000 мВ;

– полоса частот по уровню 0.7 не менее 5 кГц;

– абсолютная погрешность измерений во всем диапазоне измерений не хуже ±2 мВ;

– нелинейность во всем диапазоне измерений не хуже 1 мВ;

– температурный дрейф результата измерений не более ±10 ppm/°C;

– уровень шума, измеряемый как P–P, не более 1.5 мВ при максимальном значении частоты дискретизации 10 кГц при количестве выборок 10 000;

– тип измерительного входа по каждому каналу дифференциальный, допустимое синфазное напряжение составляет ±20 В.

Входные цепи измерительных каналов обеспечивают защиту от перенапряжений в диапазоне ±25 В и от разрядов статического электричества.

АЦП работает на частоте 30 кГц. Для получения сигнала в момент прихода тактового импульса, поступающего от системы синхронизации с частотой 10 кГц, используется процедура аппроксимации. Для этой цели на основной плате установлен дополнительный микроконтроллер STM32F410CBU. Через него же обработанные измерения по Serial Peripheral Interface (SPI) попадают в модуль ПИМ.

Для достижения указанных параметров измерительных каналов выполняется процедура заводской калибровки. Полученные поправочные коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти типа Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM).

### *3.2. Подсистема вывода аналогового сигнала*

На аналоговой плате задействован одноканальный ЦАП (DAC80501ZDGS) со следующими характеристиками входного тракта:

– диапазон выходного сигнала от –10 000 В до +10 000 В;

– разрядность цифро-аналогового преобразования равна 16;

– абсолютная погрешность выходного напряжения во всем диапазоне не хуже ±2 мВ, линейность 1 мВ, температурный коэффициент не более ±10 ppm/°C, статический шум (RMS) напряжения на выходе не более 0.5 мВ;

– время установления выходного напряжения ЦАП при изменении задания ступенькой до уровня 0.97 от величины заданного изменения – не более 10 мкс;

– нагрузочная способность выходных цепей не менее ±5 мА, дифференциальное сопротивление на выходе не более 0.2 мВ/мА.

Предусмотрена защита от короткого замыкания в нагрузке, от скачка выходного напряжения при включении контроллера и защита выходов/входов от разрядов статического электричества.

Взаимодействие ПИМ с ЦАП так же, как и с АЦП, осуществляется через интерфейс SPI посредством ранее упомянутого микроконтроллера STM32F4.

Калибровка канала аналогового вывода осуществляется в процессе производства. Поправочные коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти.

### *3.3. Подсистема дискретного ввода/вывода*

В контроллере есть восемь каналов дискретного ввода и четыре канала дискретного вывода. Взаимодействие ПИМ с сигналами цепей дискретного ввода/вывода осуществляется через порты general-purpose input/output (GPIO):

– по всем каналам обеспечивается индивидуальная гальваническая изоляция с уровнем электрической прочности не менее 500 В постоянного напряжения в течение 1 мин;

– напряжение срабатывания дискретного входа не более 3 В, допустимый диапазон входного тока от 3 до 15 мА; при входном напряжении более 9 В ограничение входного тока на уровне 15 мА должно обеспечиваться внешним сопротивлением;

– выходная дискретная цепь – коммутатор на базе твердотельного реле, обеспечивающий управляемое состояние “замкнуто/разомкнуто”, сопротивление выхода в состоянии “замкнуто” не более 25 Ом, в состоянии “разомкнуто” не менее 1 МОм, максимальное рабочее напряжение, коммутируемое выходом, 120 В, ток составляет не менее 100 мА.

### *3.4. Синхронизация контроллера*

Подсистема синхронизации контроллера получает синхроимпульсы от системы управления СКИФ, что обеспечивает синхронную работу всех контроллеров, образующих распределенную систему. Подсистема синхронизирует

работу всех компонентов и встроенного ПО внутри контроллера.

На контроллер подается два синхроимпульса, функции которых определяются программным обеспечением [2]. В случае СКИФ – это импульсы с частотой повторения 10 кГц и 1 Гц. Импульсы частотой 10 кГц задают частоту отработки ЦАП и АЦП, а импульсы частотой 1 Гц определяют цикличность заполнения массивов с измерениями по всем каналам и их передачи в управляющий компьютер, а также задают старт отработки контроллером массива заданий, заранее записанного в его память. Предусмотрена оперативная возможность переключения источника синхроимпульсов с внешнего на внутренний.

Номинальное значение длительности внешних импульсов синхронизации положительной полярности 1 мкс, длительность фронта не более 0.1 мкс. Цепи подключения синхроимпульсов обеспечивают индивидуальную гальваническую развязку от прочих цепей контроллера с электрической прочностью изоляции не менее 1500 В постоянного напряжения в течение 1 мин. Номинальное значение амплитуды входного импульса составляет +3 В, логическому уровню “1” соответствует значение напряжения более 2 В. Входы синхроимпульсов защищены от импульсов отрицательной полярности.

Сопротивления входов синхроимпульсов конфигурируются с помощью перемычек типа “джампер” и принимают значения 10 кОм и 50 Ом.

Сигналы синхронизации заводятся на порты GPIO модуля ПИМ и обрабатываются системой реального времени, работающей на процессоре в SoM [2].

### *3.5. Питание контроллера*

Контроллер питается от постоянного напряжения в диапазоне от 12 до 36 В. Контроллер не имеет гальванической развязки по цепям питания, необходимые изоляционные барьеры обеспечиваются на уровне подсистем. Входные цепи питания обеспечивают защиту от импульсных перенапряжений и инверсии полярности напряжения, а также содержат элементы защиты от токов короткого замыкания, исключающие перегрузку источника питания при возникновении неисправностей в блоке контроллера.

Потребляемая контроллером мощность по цепям питания не превышает 5 Вт.

## 4. ИНТЕРФЕЙСЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы управления СКИФ базируется на EPICS [4] – программной платформе, которая широко используется в мире для создания систем управления ускорительными комплексами. Ядром EPICS является серверная программа Input-Output Controller (IOC), которая взаимодействует с оборудованием и предоставляет данные в системе в виде сетевых переменных, доступных по протоколу CA (Channel Access) [4].

Детально встроенное ПО описано в работе [2]. Блок-диаграмма основных узлов и интерфейсов, включая программные интерфейсы, показана на рис. 4.

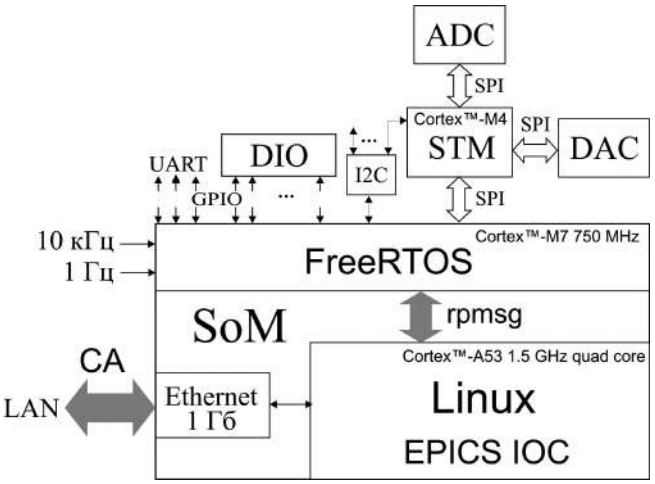



**Рис. 4.** Блок-диаграмма интерфейсов контроллера.

Программное обеспечение для работы с контроллером содержит три части:

– встроенное ПО реального времени, работающее под управлением операционной системы FreeRTOS в процессоре реального времени Cortex M7;

– серверное ПО, работающее под операционной системой Linux в процессоре общего назначения Cortex A53, выполняющее обработку данных и предоставляющее системе данные в виде сетевых переменных, к которым возможен доступ из других приложений;

– клиентские инженерные и операторские приложения, работающие в компьютерах системы управления, взаимодействующие с контроллером через его сетевые переменные.

Поскольку в SoM работает IOC, автоматически обеспечивается полная интеграция контроллера в систему управления. Использова-

ние процессора реального времени позволяет эффективно осуществлять синхронную работу с аналоговыми компонентами контроллера. Обмен данными между процессором реального времени и процессором общего назначения осуществляется с помощью протокола межъядерного обмена Remote Processor Messaging (RPMsg). В процессоре общего назначения выполняется онлайн-обработка измерений, что позволяет разгрузить сеть системы управления от передачи “сырых” данных, т.е. проводятся:

– усреднение по заданному параметру значений, измеренных с частотой 10 кГц, что во многих случаях позволяет подавить случайные шумы и повысить точность измерений;

– преобразование Фурье для выявления гармоник пульсаций;

– поточечное сравнение измерений отработанного значения с заданием (мониторинг), при котором в случае обнаружения недопустимых отклонений контроллер выставляет программный сигнал об ошибке для управляющих приложений, работающих в компьютерах системы управления.

Использование синхросигналов, поступающих на контроллер, позволяет отслеживать отработку устройствами выходных параметров в заданный момент, например во время пролета пучка по каналу транспортировки.

На рис. 5 показан пример контроля отработки источником питания синусоиды амплитудой 1.5 А и частотой 2 Гц. На увеличенном фрагменте видны недопустимые пульсации тока амплитудой 50 мА, по поводу чего контроллер выставляет сигнал для управляющего приложения.

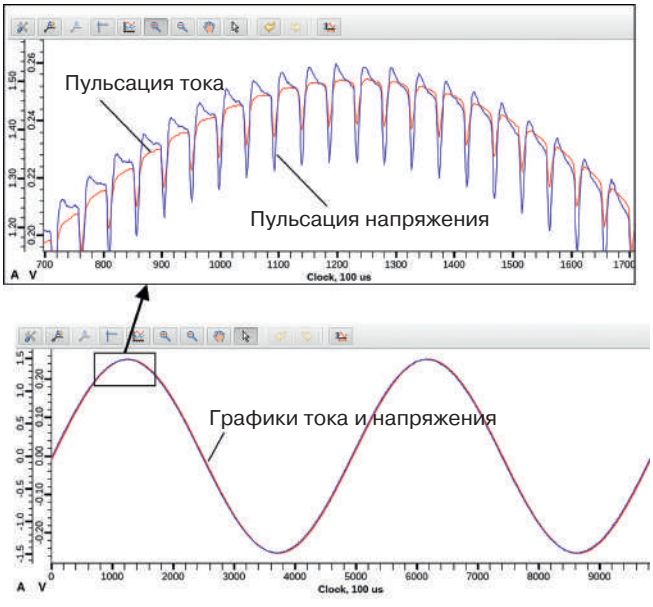



**Рис. 5.** Осциллографические измерения выходных параметров источника питания: тока в нагрузке и выходного напряжения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время изготовлено и настроено 450 контроллеров, что достаточно для управления всеми соответствующими устройствами ускорительного комплекса СКИФ. Разработано встроенное ПО контроллера, и в процессе запуска инжекционного комплекса ведется его отладка. Созданы инженерные приложения для управления источниками питания линака, выполняются отладка алгоритмов управления и разработка программ управления для источников питания магнитной системы бустерного синхротрона.

Кроме СКИФ, рассматриваемый контроллер предполагается применить для управления магнитными системами на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ” ИК СО РАН (FWUR-2024-0041).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бехтенев Е.А., Карпов Г.В., Чеблаков П.Б., Герасев А.В., Карнаев С.Е., Липовый Д.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21. № 3. С. 492.
2. *Герасев А.В., Карнаев С.Е., Липовый Д.А., Чеблаков П.Б.* // Материалы RuPAC’23. Новосибирск, 2023.
3. *Cheblakov P.B., Karnaev S.E., Gerasev A.V., Senkov D.V.* // Proc. ICALEPCS’19. NY, USA. 2020. P 1145. https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2019-WEPHA028
4. https://epics.anl.gov/base/; https://docs.epics-controls.org/en/latest/specs/ca_protocol.html